

Universidad Nacional de Rosario
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura



Tesis Doctoral

Caracterización y variaciones espacio-temporales del transporte de sedimentos en el tramo inferior del río Uruguay

Alejandro Raúl Sócrates Nardin

Director: Dr. Ricardo Nicolás Szupiany
Co-Director: Dr. Pedro Abel Basile

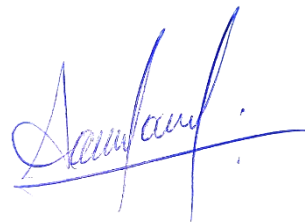
Miembros del Jurado: Dr. Jorge Abad
Dra. Daniela Kröhling
Dr. Francisco Pedocchi

Tesis presentada en la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al título de

Doctor en Ingeniería

Septiembre de 2025

Certifico que el trabajo incluido en esta tesis es el resultado de tareas de investigación originales y que no ha sido presentado para optar a un título de postgrado en ninguna otra Universidad o Institución.



Alejandro Raúl Sócrates Nardin

Agradecimientos

En primera instancia, quiero agradecer a Dios, fuente de toda sabiduría, justicia y verdad. A quien, a través de nuestro esfuerzo limitado, intentamos conocer un poco más con la ayuda de la ciencia. Cómo dijo una vez el Padre Atilio L. Rosso, quien era Doctor en Química y Sacerdote: “*Dios es perfecto, como la ecuación de una elipse*”.

También merece mi gratitud cada argentino, que con su esfuerzo y su trabajo sostiene un sistema de educación público de altísimo nivel internacional, que me permitió graduarme de ingeniero y hacer mis estudios de postgrado. Y a aquellos argentinos que cada día luchan para que este sistema sea cada vez más abierto e inclusivo.

Sin duda, cuando pienso en el primer nombre propio para agradecer, es el de Selva, mi esposa, con quien ya compartimos la mitad de nuestra vida. Quien me ha acompañado en cada instancia de mis estudios superiores de una manera generosa y amorosa. Y quien ha aprendido más de transporte de sedimentos e hidrodinámica de lo que jamás pudo haberse imaginado.

También agradezco profundamente a mis seis hijos, Francisco, Clara, Santiago, Lorenzo, Juan Ignacio y Manuel. Cada uno de ellos ha sido la mejor motivación para seguir adelante en los momentos difíciles, y los guardianes de mi avance consistente durante el último año.

A Selva y mis hijos, GRACIAS, porque cada página escrita de esta tesis es un abrazo que no pude darles o un beso que no llegó. Por eso les estaré agradecido eternamente y trabajaré el resto de mi vida para compensar la cuenta.

Agradezco también al Dr. Ricardo Szupiany, quien accedió a cruzar la provincia de Entre Ríos, hasta el otro lado, para guiarme en este camino de conocer el río Uruguay siendo mi director de Doctorado. También al Dr. Pedro Basile, quien ha acompañado este proceso desde la Universidad Nacional de Rosario.

A mi compañero de cada día de trabajo, el Ing. Alejandro Arcelus, que me acompañó y motivó en cada instancia de investigación que emprendimos, y quien ha hecho aportes extremadamente valiosos a este trabajo.

Al Ing. Eduardo Zamanillo, que fue el primero que me abrió la puerta de su casa como profesional, y que también compartió generosamente su experiencia en Salto Grande, en los temas relacionados a esta tesis.

A los compañeros del Centro de Estudios Fluviales e Hidroambientales (CEFHAL) de la FICH, quienes participaron de las campañas y proveyeron un marco de discusión para cada instancia de

trabajo que emprendimos en colaboración. Me refiero aquí especialmente al Dr. Lucas Domínguez Ruben, a la Dra. Cecilia López Weibel y al Dr. Francisco Latosinski.

También quiero agradecer a tres referentes de la materia a quienes admiro profesionalmente y que me han prestado su generoso aporte: el Dr. Marcelo H. García, que siempre me ha motivado a continuar en la búsqueda del conocimiento y la rigurosidad técnica a través de su ejemplo y consejo, al Ing. Mario Amsler que me aportó ideas valiosas y detalles metodológicos para mejorar los capítulos asociados a dunas y el transporte de fondo, y al Ing. Hector Hugo Prendes quien ha sido un interlocutor valiosísimo en la última etapa de discusión de los resultados alcanzados.

Por último, y especialmente aquí para destacar su valor, a la Comisión Administradora del Río Uruguay (CARU). Esta institución, a través de sus diferentes gestiones en estos últimos 6 años, me ha permitido realizar estos estudios de doctorado financiando el Proyecto de Monitoreo del Transporte de Sedimentos, y proveyendo un marco formal para las colaboraciones académicas realizadas. También dentro de la institución, agradezco especialmente a los compañeros que han colaborado en el desarrollo de tareas de campo.

Se deja constancia aquí de que los hallazgos, puntos de vista y opiniones aquí vertidas en esta tesis no representan necesariamente los de la CARU.

Resumen

El río Uruguay, el segundo en importancia de la Cuenca del Plata, carece de desarrollo científico en áreas clave como la hidráulica fluvial y el transporte de sedimentos. Por este motivo, esta tesis aborda el tema del transporte de sedimentos en los últimos 350 kilómetros del río, estudiando también la constitución del lecho y las formas de fondo predominantes.

Se emplearon mediciones disponibles y tecnología acústica para estimar variables representativas del transporte de sedimentos. Utilizando perfiladores acústicos Doppler y un software desarrollado para este fin, se transformaron los datos relevados con este equipo en estimaciones de transporte de sedimentos en suspensión y de fondo. Además, se calculó el transporte de fondo mediante el ajuste de ecuaciones.

Se documentaron las formas de fondo del río mediante un software automatizado basado en un algoritmo reconocido en la literatura. Esto permitió describir diferencias en las formas de fondo según el sedimento del lecho y la hidrodinámica del río.

Con las mediciones indirectas de transporte de sedimentos, se construyeron curvas de descarga para las distintas componentes del proceso: fondo en suspensión, fondo y material fino o carga de lavado. Estas curvas, junto con datos de altura del río, facilitaron la estimación del transporte de sedimentos en varias secciones y la carga anual para cada modalidad de transporte.

De la serie 1980-2023, se obtuvo una carga sólida media de 4,35 millones de toneladas al año en el tramo analizado del río. El 72% de ese material se transportó como carga de lavado (limos y arcillas), el 18% como arenas finas en suspensión y el 10% como carga de fondo (arenas y gravas finas). También se verificó una relación esperable entre el caudal medio anual y la carga anual de sedimentos, lo cual implica cierta relación del comportamiento sedimentológico con fenómenos meteorológicos.

Palabras clave: características del lecho, formas de fondo, transporte de sedimentos, tramo inferior, río Uruguay.

Abstract

The Uruguay River, the second most important river in the La Plata Basin, lacks scientific development in key areas such as fluvial hydraulics and sediment transport. As a reply to this gap, this thesis estimates sediment transport in the river's last 350 kilometers, studying bed composition and characteristic bedforms.

In the absence of a systematic monitoring plan, acoustic technologies were used to estimate key sediment transport variables. Using acoustic Doppler profilers and custom software, data measurements were converted into estimates of suspended and bedload sediment transport. Bedload transport was further calculated through equations adjusted with field measurements.

River bedforms were documented through automated software based on a recognized algorithm, allowing for descriptions of differences in bedforms related to bed sediment and river hydrodynamics.

With indirect sediment transport measurements, discharge curves were developed for various transport components: suspended bedload, bedload, and fine material (wash load). These curves, combined with water stage data, facilitated estimates of sediment transport in different sections and annual loads for each transport type.

From the 1980-2023 dataset, an average solid load of 4.35 million tons per year was obtained for the analyzed section of the river. Of this material, 72% was transported as wash load (silt and clay), 18% as suspended fine sand, and 10% as bedload (sand and fine gravel). Additionally, a foreseeable correlation was observed between the mean annual discharge and the annual sediment load, indicating a relationship between sedimentological behavior and meteorological phenomena.

Keywords: riverbed characteristics, bedforms, sediment transport, lower reach, Uruguay river.

Índice general

Parte I – Aspectos generales

Capítulo 1

Motivación y objetivos de la investigación	3
1.1. Motivación. Importancia para la región	3
1.2. Objetivos	7
1.3. Ordenamiento de la tesis	8

Capítulo 2

Transporte de sedimentos en ambientes fluviales de llanura. Definiciones básicas y su medición 9	
2.1. Introducción	9
2.2. Modos de transporte de sedimentos	10
2.2.1. Carga de lavado	11
2.2.2. Transporte de material aluvial	11
2.3. Medición del transporte de sedimentos	12
2.3.1. Medición de carga de lavado	14
2.3.2. Medición de sedimentos aluviales en suspensión	15
2.3.3. Medición de sedimentos aluviales transportados por el fondo	17

Capítulo 3

Descripción general del área de estudio	19
3.1. Introducción	19
3.2. Represa de Salto Grande	21
3.3. El Bajo Uruguay	22
3.3.1. Primer subtramo	24
3.3.2. Segundo subtramo o subtramo medio	25
3.3.3. Tercer subtramo o Tramo final	25
3.4. Caracterización hidroclimática	26
3.5. Caracterización sedimentológica	29
3.5.1. Márgenes	29
3.5.2. Lecho	30

Capítulo 4

Antecedentes sobre el transporte de sedimentos en el río Uruguay	33
4.1. Introducción	33
4.2. Sistema Nacional de Información Hídrica	34
4.3. Publicaciones del Comité Científico de la CARU	36
4.4. Proyecto de dragado EIH-INCOIV (2012)	37

Parte II – Cuantificación y análisis de variables sedimentológicas

Capítulo 5

Trabajos de campo: materiales y métodos	43
5.1. Introducción	43
5.2. Instrumental de campo utilizado	45
5.2.1. Embarcaciones menores	45
5.2.2. Embarcación hidrográfica	46
5.2.3. Perfiladores de corriente Acústicos Doppler	47
5.2.4. Muestreadores de sedimento	50
5.3. Relevamientos realizados	53
5.3.1. Secciones de aforo	53
5.3.2. Relevamientos del Proyecto de cuantificación del Transporte de Sedimentos en el río Uruguay	56
5.3.3. Relevamientos batimétricos disponibles	62

Capítulo 6

Evaluación y estimación de la concentración y el transporte de sedimento de fondo en suspensión con tecnología acústica Doppler.....	65
6.1. Introducción.....	65
6.2. Teoría Acústica.....	68
6.2.1. Variables acústicas.....	69
6.2.2. Método de inversión acústica.....	78
6.2.3. Software ASET.....	79
6.3. Desarrollo de ASETSM9.....	81
6.3.1. Problema inverso.....	81
6.3.2. Evaluación del valor A.....	84
6.3.3. Problema directo.....	90
6.3.4. Código ASETSM9.....	91
6.4. Datos para el desarrollo y testeo.....	94
6.5. Resultados y discusión.....	96
6.5.1. Resultados Módulo 1.....	96
6.5.2. Resultados del Módulo 2.....	104

Capítulo 7

Características del lecho y de formas de fondo.....	111
7.1. Introducción.....	111
7.2. Metodología.....	113
7.2.1. Recopilación de información granulométrica.....	113
7.2.2. Mediciones de forma de fondo.....	114
7.2.3. Características geomorfológicas.....	118
7.3. Resultados.....	119
7.3.1. Características sedimentológicas del lecho.....	119
7.3.2. Tamaños de formas de fondo.....	121
7.3.3. Distribución geográfica de las formas de fondo y relación con la geomorfología.....	127
7.4. Conclusiones.....	134

Capítulo 8

Transporte de sedimentos por el fondo.....	137
8.1. Introducción.....	137
8.2. Metodologías y Resultados.....	140
8.2.1. Estimación a partir del análisis de batimetrías del canal de navegación.....	140
8.2.2. Estimación a partir del movimiento de formas de fondo.....	146
8.2.3. Estimación a partir de mediciones estacionarias con ADCP.....	159
8.2.4. Estimación a partir de fórmulas.....	166
8.3. Discusión y conclusiones generales.....	177

Parte III – Integración de resultados y conclusiones

Capítulo 9

Curvas de gasto líquido y sólido en las secciones relevadas.....	181
9.1. Introducción.....	181
9.2. Metodología.....	182
9.2.1. Curvas de gasto líquido.....	182
9.2.2. Curvas de gasto sólido.....	184
9.3. Resultados y discusión.....	189
9.3.1. Carga de lavado.....	189
9.3.2. Curvas de gasto líquido y sólido.....	192
9.4. Conclusiones.....	228

Capítulo 10

Caracterización y variaciones espacio-temporales del transporte de sedimentos.....	231
10.1. Introducción.....	231
10.1.1. Importancia del tema.....	231
10.1.2. Antecedentes técnicos.....	232
10.1.3. Objetivo.....	233
10.2. Metodología.....	233
10.2.1. Análisis espacial y temporal.....	233
10.2.2. Análisis de frecuencia y caudal efectivo.....	234
10.3. Resultados y discusión.....	235
10.3.1. Análisis espacial de la situación actual.....	235
10.3.2. Series de tiempo.....	239
10.3.3. Carga anual.....	243
10.3.4. Análisis de frecuencia de los caudales sólidos.....	250
10.4. Conclusiones.....	253

Capítulo 11

Conclusiones.....	255
11.1. Introducción.....	255
11.2. Respuesta a los objetivos específicos.....	257
11.2.1. Desarrollo y aplicación de nuevas tecnologías de medición y procesamiento de información.....	257
11.2.2. Cuantificación del transporte de material de fondo y carga de lavado.....	258
11.2.3. Relaciones entre hidrodinámica y transporte de sedimentos.....	258
11.2.4. Análisis de las formas de fondo.....	258
11.2.5. Variaciones espaciales y temporales del transporte de sedimentos. Influencia de Salto Grande.....	260
11.2.6. Análisis histórico del transporte de sedimentos.....	260
11.3. Futuro y nuevas líneas de investigación.....	261

Bibliografía.....	263
--------------------------	------------

Índice de figuras

Figura 1.1.- Línea de tiempo sobre proyectos y obras de dragado en el río Uruguay.	6
Figura 2.1.- Modos de transporte de sedimentos.	10
Figura 2.2.- Botella de van Dorn, para toma de muestra puntual de agua.	14
Figura 2.3.- Muestreador isocinético puntual de sedimentos en suspensión US P-61 (FICH-UNL).	16
Figura 2.4.- Ejemplos de muestreadores de fondo. De izquierda a derecha: US BL-84 (apertura de 3 pulgadas), Helley-Smith (apertura de 3 pulgadas), Elwha (apertura de 8 x 4 pulgadas) y Toulte River 2 (apertura de 12 x 6 pulgadas). Tomada de Rennie (2017).	18
Figura 3.1.- Ubicación general de la cuenca en Sudamérica.	20
Figura 3.2.- Perfil longitudinal de elevaciones del lecho del río Uruguay. Modificado de Soldano (1947) en (Di Persia & Neiff, 1986).	20
Figura 3.3.- Tramo denominado “Bajo Uruguay”, limitado por la represa de Salto Grande y el Río de la Plata.	23
Figura 3.4.- Distribución de las precipitaciones medias anuales (serie 1901-1995) en la cuenca del río Uruguay. Tomado de Krepper et al. (2003).	26
Figura 3.5.- Caudales medios mensuales: estación Paso de los libres, serie 1909-2013. Tomado de (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación Argentina, 2014).	28
Figura 3.6.- Caudales erogados por la represa de Salto Grande como función del día calendario.	28
Figura 3.7.- División entre tipos de datos relevados en el marco del Levantamiento Integral del Río Uruguay (relevados entre 1997 y 2009).	31
Figura 3.8.- Ubicación de los pasos de navegación Barrizal, Abrigo y Ñandubaysal.	32
Figura 4.1.- Altura limnimétrica – caudal líquido. Datos del Sistema Nacional de Información Hídrica - Sección Concepción del Uruguay (Subsecretaría de Infraestructura y Política Hídrica de Argentina, 2022).	35
Figura 4.2.- Caudal líquido – Caudal sólido grueso. Datos del Sistema Nacional de Información Hídrica - Sección Concepción del Uruguay (Subsecretaría de Infraestructura y Política Hídrica de Argentina, 2022).	35
Figura 4.3.- Caudal líquido – Caudal sólido fino. Datos del Sistema Nacional de Información Hídrica - Sección Concepción del Uruguay (Subsecretaría de Infraestructura y Política Hídrica de Argentina, 2022).	35
Figura 4.4.- Secciones de aforo MIRU.	36
Figura 4.5.- Vía navegable del río Uruguay y pasos de navegación.	38
Figura 5.1.- Embarcación Río de los Pájaros.	45
Figura 5.2.- Embarcación Río de los Caracoles.	45
Figura 5.3.- Embarcación Anibal Sampayo.	46
Figura 5.4.- Embarcación Ibirapitá.	46
Figura 5.5.- ADCP Sontek M9, adaptado de (Sontek, a Xylem brand, 2022).	48
Figura 5.6.- ADCP Sontek M9 adosado a una embarcación.	48
Figura 5.7.- ADCP Sontek M9 en su Hydroboard.	49
Figura 5.8.- ADCP Teledyne RDI Río Grande, tomado de Teledyne RD Instruments (2007).	49
Figura 5.9.- ADCP Teledyne RDI Río Grande montado en un trimarán.	50
Figura 5.10.- Cono de arrastre.	51
Figura 5.11.- Muestreador de sedimentos en suspensión US P-61.	52
Figura 5.12.- Secciones de aforo MIRU.	54
Figura 5.13.- Ubicación de secciones transversales.	55
Figura 5.14.- Ubicación de secciones de aforo y de verticales seleccionadas para el muestreo de sedimento en suspensión. Tramo medio del río Uruguay, aguas abajo de la represa de Salto Grande (López Weibel, 2023).	57
Figura 5.15.- Ubicación de los perfiles longitudinales en R1. A) Zona Puerto Yerúa; B) Zona Colón. Tomado de López Weibel (2023).	59
Figura 5.16.- Muestras de sedimento de fondo. Río Uruguay en R1 – zona Puerto Yerúa. Tomado de López Weibel (2023).	61
Figura 5.17.- Muestras de sedimento de fondo. Río Uruguay en R1 - zona Colón. Tomado de López Weibel (2023).	61
Figura 6.1.- Atenuación acústica (α_{si}) como función del diámetro para partículas uniformes de diámetro d_i , para distintas frecuencias acústicas.	74
Figura 6.2.- Atenuación acústica viscosa ($\alpha_{si,visc}$) y por dispersión ($\alpha_{si,disp}$) como función del diámetro para partículas uniformes de diámetro d_i y frecuencia acústica de 1000 kHz.	75
Figura 6.3.- Dependencia del factor de forma f , tomado de Thorne & Meral (2008), en comparación con datos de laboratorio.	77
Figura 6.4.- Factor de forma f , calculado según la Ec. [4.19] para una frecuencia acústica de 1000 kHz.	77
Figura 6.5.- Descomposición de la distancia desde el transductor.	85
Figura 6.6.- Factor de corrección de campo cercano (ψ).	88
Figura 6.7.- Término T_3	88
Figura 6.8.- Medición 1 con Sontek M9, 18/12/2018. Software RiverSurveyor®.	95
Figura 6.9.- Medición 2 con Sontek M9, 18/12/2018. Software RiverSurveyor®.	95
Figura 6.10.- Medición 1 con Teledyne RDI Río Grande, 18/12/2018. Software WinRiver II®.	95
Figura 6.11.- Medición 2 con Teledyne RDI Río Grande, 18/12/2018. Software WinRiver II®.	96
Figura 6.12.- Procesamiento con ASET de la medición realizada con ADCP RDI.	96
Figura 6.13.- Valores de A para cada punto de la grilla.	97

Figura 6.14.- Valor de la variable A en función de la profundidad.....	98
Figura 6.15.- A como función de la profundidad, según el tamaño de celda y la frecuencia de la medición.....	98
Figura 6.16.- Valores de retorno (dB) para cada ADCP y T_1	99
Figura 6.17.- Término T_1 como función de la profundidad, según el tamaño de celda y frecuencia de medición.....	100
Figura 6.18.- Ajuste de ecuación [6.45] al término T_1	100
Figura 6.19.- Valores de atenuación acústica (dB) para cada ADCP y T_2 (α indica la suma de la atenuación acústica por el fluido y por los sedimentos).....	102
Figura 6.20.- Término T_2 como función de la profundidad, según la frecuencia acústica de medición.....	102
Figura 6.21.- Término T_{345} como función de la profundidad, según el tamaño de celda y frecuencia de medición.....	103
Figura 6.22.- Resultados de concentración de la fracción gruesa, sobre la información medida.....	104
Figura 6.23.- Comparativa de resultados entre ASET y ASETSM9.....	105
Figura 6.24.- Concentraciones representativas a lo largo de la sección transversal.....	105
Figura 6.25.- Concentraciones ajustadas en la sección transversal y en tres verticales señaladas.....	106
Figura 6.26.- Velocidades ajustadas en la sección transversal y en tres verticales señaladas.....	107
Figura 6.27.- Cálculo del caudal líquido en la sección transversal.....	108
Figura 6.28.- Cálculo del caudal sólido en la sección transversal.....	108
Figura 7.1.- Formas de fondo en el río Uruguay durante la bajante de 2020. Km 232, el Varillal (Baccaro, 2020).....	112
Figura 7.2.- Dimensiones características de las formas de fondo.....	113
Figura 7.3.- Relevamientos batimétricos longitudinales a lo largo del eje del canal de navegación del río Uruguay.....	115
Figura 7.4.- Perfil longitudinal de elevaciones (PLE) utilizado.....	117
Figura 7.5.- Sedimentos en el fondo del río Uruguay.....	119
Figura 7.6.- Curva de frecuencias acumuladas de las muestras disponibles – distribución granulométrica.....	120
Figura 7.7.- Curva de frecuencias acumuladas de las muestras disponibles, señalando el tramo de pertenencia.....	120
Figura 7.8.- Dunas observadas de aproximadamente 0,15 m de altura y 8 m de longitud – Km. 72 de la vía navegable.....	121
Figura 7.9.- Fondo irregular con pequeñas formas de fondo, kilómetro 62.....	122
Figura 7.10.- Fondo con dunas pequeñas, kilómetro 190.....	122
Figura 7.11.- Fondo con dunas grandes, kilómetro 55.....	122
Figura 7.12.- Fondo con dunas grandes con dunas más pequeñas superimpuestas, kilómetro 161.....	123
Figura 7.13.- Fondo irregular (lecho rocoso), kilómetro 309.....	123
Figura 7.14.- Alturas de dunas medidas manualmente.....	124
Figura 7.15.- Longitud de dunas medidas manualmente.....	124
Figura 7.16.- Comparación medición manual con la medición automática de altura y longitud de forma de fondo, para las dos longitudes características del filtro de fondo.....	125
Figura 7.17.- Probabilidad de altura y longitud de dunas.....	127
Figura 7.18.- Altura de dunas (H_d) a lo largo del canal de navegación.....	128
Figura 7.19.- Longitud de dunas (λ_d) a lo largo del canal de navegación.....	128
Figura 7.20.- Ángulo de la cara de aguas abajo de las dunas (θ_d) a lo largo del canal de navegación.....	129
Figura 7.21.- Empinamiento de las dunas (H_d / λ_d) a lo largo del canal de navegación.....	129
Figura 7.22.- Alturas de dunas y ubicación de formas de fondo compuestas (dunitas sobre dunas).....	130
Figura 7.23.- Anchos del río medidos cada 1 kilómetro.....	130
Figura 7.24.- Altura y longitud de dunas con respecto al ancho del cauce principal.....	131
Figura 7.25.- Altura y longitud de dunas con respecto al diámetro representativo (d_{50}).....	132
Figura 7.26.- Altura y longitud de dunas con respecto a la potencia específica potencial de la corriente.....	133
Figura 7.27.- Criterios de movilidad lateral y transporte de sedimentos de Kleinhans & van den Berg (2011) – diámetro representativo y potencia específica potencial de la corriente.....	133
Figura 8.1.- Esquematización de un tramo unidimensional de cauce aluvial. Adaptado de Parker (2004).....	141
Figura 8.2.- Volumen relativo relevado en cada batimetría.....	143
Figura 8.3.- Volumen sedimentado en cada paso de navegación (Tabla 5.8).....	144
Figura 8.4.- Volumen dragado en cada paso de navegación (Tabla 3.8).....	144
Figura 8.5.- Volumen total sedimentado y dragado.....	145
Figura 8.6.- Tasa de sedimentación media en cada paso.....	145
Figura 8.7.- Cambio en el caudal sólido de fondo en la longitud del paso.....	146
Figura 8.8.- Modelo conceptual de la tasa de transporte de forma de fondo.....	147
Figura 8.9.- Sección de aforo sólido en paso San Francisco (Colón, Entre Ríos).....	149
Figura 8.10.- Distribución granulométrica de muestras de sedimento de fondo. Río Uruguay en relevamiento R1 - zona Colón. Modificado de López Weibel (2023).....	149
Figura 8.11.- Relevamientos realizados, Línea Ca-1.....	151
Figura 8.12.- Relevamientos realizados, Línea Ca-2.....	152
Figura 8.13.- Relevamientos realizados, Línea Ca-3.....	153
Figura 8.14.- Relevamientos realizados, Línea Ca-4.....	154
Figura 8.15.- Posiciones relevadas con ADCP.....	163
Figura 8.16.- Caudal sólido por el fondo en la sección de Colón, en función de la altura. Datos de Tabla 8.8.....	165
Figura 8.17.- Caudal sólido por el fondo en la sección de Colón, en función de la altura, con datos de medición por desplazamiento de dunas. Datos de Tabla 8.8 y Tabla 8.5.....	165
Figura 8.18.-Alturas del río Uruguay simuladas en el período 2004-2010.....	170
Figura 8.19.- Componentes y módulo de la velocidad a lo largo del canal de navegación.....	171
Figura 8.20.- Estadística de alturas simuladas.....	171
Figura 8.21.- Aplicación de las ecuaciones de predicción de q_{sf} a los datos medidos en el paso San Francisco (Colón, Entre Ríos).....	174
Figura 8.22.- Cálculo de q_{sf} para datos hidrodinámicos medios, a lo largo del canal de navegación.....	175
Figura 8.23.- Cálculo de q_{sf} para datos hidrodinámicos máximos, a lo largo del canal de navegación.....	176
Figura 8.24.- Tasa de sedimentación media anual medida y calculada.....	178
Figura 9.1.- Linnímetros y secciones de aforo.....	188

Figura 9.2.- Medición directa con USP-61 realizada por CARU-FICH, indirecta (ADCPSM9) y cálculo (calc. van Rijn) de Gss para la Sección Colón y PGA.	188
Figura 9.3.- Medición directa Subsecretaría de Infraestructura y Política Hídrica (SSIPH), indirecta (ADCPSM9) y cálculo (calc. van Rijn) de Gss para la Sección Casablanca/Concepción del Uruguay.	189
Figura 9.4.- Frecuencia relativa de las concentraciones de sedimentos finos en suspensión. Datos del Sistema Nacional de Información Hídrica - Sección Concepción del Uruguay (Subsecretaría de Infraestructura y Política Hídrica de Argentina, 2022).	190
Figura 9.5.- Ajuste curva de gasto sólido fino (G_w) – Sección Concepción del Uruguay.	191
Figura 9.6.- Concentración de sólidos finos en función del caudal líquido – Sección Concepción del Uruguay.	192
Figura 9.7.- Ubicación de la sección transversal Nueva Palmira.	193
Figura 9.8.- Salida del Software RiverSurveyor® para un aforo realizado en la sección, el día 24/04/2019. $Q = 9.637 \text{ m}^3/\text{s}$	193
Figura 9.9.- Panel izquierdo: Caudal y alturas en Nueva Palmira y Fray Bentos, medidas el 23 y 24 de abril de 2019. Panel derecho: Caudal como función de la pendiente del pelo de agua (S_w) observada.	193
Figura 9.10.- Alturas y caudales medidos en la sección de Nueva Palmira.	194
Figura 9.11.- Pares de datos de caudal líquido como función del caudal sólido – Sección Nueva Palmira.	195
Figura 9.12.- Curva de caudal líquido vs. caudal sólido.	195
Figura 9.13.- Salida del Software RiverSurveyor® para un aforo realizado en la sección Punta el Arenal, el día 08/11/2017. $Q = 13.711 \text{ m}^3/\text{s}$	197
Figura 9.14.- Salida del Software RiverSurveyor® para un aforo realizado en la sección Punta Caballos, el día 08/11/2017. $Q = 10.057 \text{ m}^3/\text{s}$	197
Figura 9.15.- Ubicación de la sección transversal Fray Bentos.	197
Figura 9.16.- Salida del Software RiverSurveyor® para un aforo realizado en la sección Fray Bentos, el día 15/05/2017. $Q = 13.130 \text{ m}^3/\text{s}$	198
Figura 9.17.- Ábaco CARU – DNH – INA para Fray Bentos.	198
Figura 9.18.- Pares $H-Q$ junto con el ábaco de la Figura 9.17.	199
Figura 9.19.- Curva de gasto sólido por el fondo – Sección Fray Bentos.	199
Figura 9.20.- Gasto sólido de fondo en suspensión – Sección Fray Bentos.	200
Figura 9.21.- Curva de gasto sólido de fondo en suspensión – Sección Fray Bentos.	201
Figura 9.22.- Gasto sólido de fondo – Sección Fray Bentos.	201
Figura 9.23.- Ubicación de la sección transversal Nuevo Berlín.	203
Figura 9.24.- Salida del Software RiverSurveyor® para un aforo realizado en la sección Nuevo Berlín – Brazo Izquierdo, el día 03/10/2018. $Q = 6.754 \text{ m}^3/\text{s}$	203
Figura 9.25.- Salida del Software RiverSurveyor® para un aforo realizado en la sección Nuevo Berlín – Brazo Derecho, el día 03/10/2018. $Q = 2.553 \text{ m}^3/\text{s}$	203
Figura 9.26.- Curva de gasto líquido – Sección Nuevo Berlín.	204
Figura 9.27.- Curva de gasto sólido por el fondo – Sección Nuevo Berlín.	204
Figura 9.28.- Gasto sólido de fondo en suspensión – Sección Nuevo Berlín.	205
Figura 9.29.- Distribución granulométrica obtenida para las arenas presentes en suspensión en R3 – zona Colón. Modificado de López Weibel (2023).	205
Figura 9.30.- Curva de gasto sólido de fondo en suspensión – Sección Nuevo Berlín.	206
Figura 9.31.- Curva de gasto sólido de fondo – Sección Nuevo Berlín.	206
Figura 9.32.- Ábaco CARU – DNH – INA para Concepción del Uruguay.	208
Figura 9.33.- Curva de gasto líquido – Sección Concepción del Uruguay.	208
Figura 9.34.- Curva de gasto sólido de fondo en suspensión – Sección Concepción del Uruguay.	209
Figura 9.35.- Ubicación de la sección transversal Casablanca.	209
Figura 9.36.- Salida del Software RiverSurveyor® para un aforo realizado en la sección Casablanca, el día 03/10/2018. $Q = 8.226 \text{ m}^3/\text{s}$	210
Figura 9.37.- Curva de gasto líquido – Sección Casablanca.	210
Figura 9.38.- Curva de gasto sólido por el fondo – Sección Casablanca.	211
Figura 9.39.- Gasto sólido de fondo en suspensión – Sección Casablanca.	211
Figura 9.40.- Curva de gasto sólido de fondo – Sección Casablanca.	212
Figura 9.41.- Ubicación de las secciones de medición – Colón y PGA.	213
Figura 9.42.- Salida del Software RiverSurveyor® para un aforo realizado en la sección PGA, el día 18/12/2018. $Q = 5.481 \text{ m}^3/\text{s}$	213
Figura 9.43.- Salida del Software RiverSurveyor® para un aforo realizado en la sección Colón, el día 25/01/2019. $Q = 24.979 \text{ m}^3/\text{s}$	213
Figura 9.44.- Ábaco CARU – DNH – INA para Colón.	214
Figura 9.45.- Curva de gasto líquido – Secciones Colón y PGA.	214
Figura 9.46.- Curva de gasto sólido por el fondo – Secciones Colón y PGA.	215
Figura 9.47.- Gasto sólido de fondo en suspensión – Secciones Colón y PGA.	216
Figura 9.48.- Curva de gasto sólido de fondo en suspensión – Secciones Colón y PGA.	217
Figura 9.49.- Curva de gasto sólido de fondo – Secciones Colón y PGA.	217
Figura 9.50.- Ubicación de la sección de medición – Liebig.	218
Figura 9.51.- Salida del Software RiverSurveyor® para un aforo realizado en la sección Liebig, el día 06/11/2018. $Q = 7.466 \text{ m}^3/\text{s}$	218
Figura 9.52.- Curva de gasto sólido por el fondo – Sección Liebig.	219
Figura 9.53.- Gasto sólido de fondo en suspensión – Sección Liebig.	220
Figura 9.54.- Curva de gasto sólido de fondo en suspensión – Sección Liebig.	220
Figura 9.55.- Curva de gasto sólido de fondo – Sección Liebig.	221
Figura 9.56.- Ubicación de la sección de medición Puerto Yerúa.	221
Figura 9.57.- Salida del Software RiverSurveyor® para un aforo realizado en la sección Puerto Yerúa, el día 07/11/2018. $Q = 10.533 \text{ m}^3/\text{s}$	222
Figura 9.58.- Ábaco CARU – DNH – INA para Concordia.	222
Figura 9.59.- Curva de gasto líquido – Sección Puerto Yerúa.	223
Figura 9.60.- Curva de gasto sólido por el fondo – Sección Puerto Yerúa.	223
Figura 9.61.- Gasto sólido de fondo en suspensión – Sección Puerto Yerúa.	224
Figura 9.62.- Curva de gasto sólido de fondo en suspensión – Sección Puerto Yerúa.	225

Figura 9.63.- Curva de gasto sólido de fondo – Sección Puerto Yerúa.	225
Figura 9.64.- Ubicación de la sección de medición Vertedero.	226
Figura 9.65.- Curva de gasto líquido – Sección Vertedero.	226
Figura 9.66.- Gasto sólido por el fondo – Sección Vertedero.	227
Figura 9.67.- Gasto sólido de fondo en suspensión – Sección Vertedero.	228
Figura 10.1.- Representación de la metodología para determinar el caudal efectivo, tomado de Basile (2018). fr (Q) representa la frecuencia de ocurrencia de los valores de la serie de caudales líquidos, $Q_s(Q)$ la relación entre caudal sólido y caudal líquido ($G_s - Q$).	235
Figura 10.2.- Curvas de gasto sólido de fondo total (G_s).	236
Figura 10.3.- Curvas de gasto sólido por el fondo (G_{sf}).	236
Figura 10.4.- Curvas de gasto sólido de fondo en suspensión (G_{ss}).	236
Figura 10.5.- Relación de transporte de fondo por el fondo y el transporte de fondo total (G_{sf}/G_s).	238
Figura 10.6.- Series de tiempo para Nuevo Berlín.	239
Figura 10.7.- Series de tiempo para Casablanca.	240
Figura 10.8.- Series de tiempo para Colón y PGA.	241
Figura 10.9.- Series de tiempo para Puerto Yerúa.	242
Figura 10.10.- Carga anual de transporte por el fondo, G_s	248
Figura 10.11.- Curva de frecuencia de niveles en el Puerto de Colón (Entre Ríos).	251
Figura 10.12.- Curva de frecuencia de caudales en el Puerto de Colón (Entre Ríos).	251
Figura 10.13.- Aplicación del método de Schaffernak para la determinación del caudal efectivo en la Sección Colón (Entre Ríos).	252
Figura 10.14.- Frecuencia acumulada de caudal líquido vs. Frecuencia acumula de transporte de sedimentos ponderada por la frecuencia del caudal líquido – Sección Colón (Entre Ríos).	252

Índice de tablas

Tabla 4.1.- Datos de sólidos suspendidos totales, MIRU 2018.	37
Tabla 4.2.- Alturas medias de dunas, editado a partir de EIH-Incovic (2012).	39
Tabla 4.3.- Concentración promedio de Finos y Arenas transportados en suspensión, agosto de 2012. Editado a partir de EIH-Incovic (2012).	39
Tabla 4.4.- Estimación del transporte de arenas en suspensión con ADCP. Editado a partir de EIH-Incovic (2012).	39
Tabla 4.5.- Características hidráulicas y sedimentológicas. Q es el caudal líquido, G_{ss} es el caudal sólido del material grueso (arenas) en suspensión, M_{s2} y V son las concentración y velocidades medias en la sección. Editado a partir de EIH-Incovic (2012).	40
Tabla 5.1.- Secciones de aforo y cantidad de mediciones.	54
Tabla 5.2.- Secciones de aforo y cantidad de mediciones.	56
Tabla 5.3.- Resumen de los datos de mediciones y muestreos correspondientes a los relevamientos realizados en el río Uruguay en junio y diciembre de 2017, en octubre y diciembre de 2018, y en octubre de 2022.	57
Tabla 5.4.- Valores de transporte de sedimento de sedimentos en suspensión, para secciones del río Uruguay en Puerto Yerúa, Colón, Concepción del Uruguay, Nuevo Berlín y Fray Bentos.	58
Tabla 5.5.- Relevamientos realizados en Colón para calcular el desplazamiento de dunas.	60
Tabla 5.6.- Mediciones estacionarias con ADCP.	62
Tabla 5.7.- Ubicación de los pasos críticos de navegación.	63
Tabla 5.8.- Pasos críticos relevados en el contexto del dragado de mantenimiento.	64
Tabla 6.1.-Distancia vertical para alcanzar 88	88
Tabla 6.2.- Coeficientes de ajuste de la ecuación [6.45]. 100	100
Tabla 6.3.- Coeficientes de ajuste de la ecuación [6.51]. 103	103
Tabla 8.1.- Progresivas de la sección San Francisco. 149	149
Tabla 8.2.- Relevamientos realizados para la determinación del desplazamiento de dunas. 150	150
Tabla 8.3.- Resultados de la aplicación del algoritmo BTT a los perfiles relevados y resultados de f_d 155	155
Tabla 8.4.- Relevamientos con medición del desplazamiento de dunas. 156	156
Tabla 8.5.- Cálculo de la tasa de transporte de forma de fondo. 157	157
Tabla 8.6.- Aforos sólidos. 158	158
Tabla 8.7.- Resumen de aforos sólidos. 159	159
Tabla 8.8.- Cálculo del caudal sólido por el fondo. 164	164
Tabla 8.9.- Ecuaciones disponibles para la predicción del transporte de sedimentos de fondo. 168	168
Tabla 9.1.- Secciones relevadas y alturas limnimétricas asociadas. 183	183
Tabla 9.2.- Diámetros representativos del sedimento de fondo. 185	185
Tabla 9.3.- Concentraciones de sedimentos finos y diámetros utilizados en la aplicación del software ASETSM9. 187	187
Tabla 9.4.- Valores estadísticos muestrales de la serie de concentración de sedimentos finos en suspensión. Datos del Sistema Nacional de Información Hídrica - Sección Concepción del Uruguay (Subsecretaría de Infraestructura y Política Hídrica de Argentina, 2022). 189	189
Tabla 9.5.- Análisis de frecuencias de concentración de sedimentos finos en suspensión. Datos del Sistema Nacional de Información Hídrica - Sección Concepción del Uruguay (Subsecretaría de Infraestructura y Política Hídrica de Argentina, 2022). 190	190
Tabla 9.6.- Resumen de las curvas de descarga ajustadas. 230	230
Tabla 10.1.- Caudal líquido para el cual el transporte de fondo (G_{sf}) es nulo. 237	237
Tabla 10.2.- Valores medios de transporte para las distintas secciones, de la serie 1980-2023. 243	243
Tabla 10.3.- Carga anual en la sección Nuevo Berlín. 244	244
Tabla 10.4.- Carga anual en la sección Casablanca. 245	245
Tabla 10.5.- Carga anual en la sección Colón y Puente General Artigas. 246	246
Tabla 10.6.- Carga anual en la sección Puerto Yerúa. 247	247
Tabla 10.7.- Carga anual promedio de transporte de sedimentos de fondo. 249	249

PARTE I – ASPECTOS GENERALES

Capítulo 1

Motivación y objetivos de la investigación

1.1. Motivación. Importancia para la región

La cuenca del río Uruguay es el segundo sistema fluvial en importancia dentro de la cuenca del Plata (*e.g.*: Paoli et al., 2000). A pesar de su aprovechamiento actual en navegación, extracción de áridos, pesca, hidroenergía, entre otros usos, el conocimiento científico sobre su dinámica hidro-sedimentológica sigue siendo limitado. Este vacío en el conocimiento ha sido documentado desde hace casi cuatro décadas (Di Persia & Neiff, 1986), y se mantiene en la actualidad (Colombo et al., 2014). En palabras de Iriondo & Kröhling (2008):

“Desde el punto de vista científico, el Uruguay es el gran río olvidado de Sudamérica. Suele no estar presente en la mente de brasileños, uruguayos y argentinos cuando pensamos en nuestros respectivos países; por alguna razón, no provoca emociones de identidad o pertenencia como el Paraná, el Amazonas o el Río de la Plata (o el mismo río Negro).”

El río Uruguay nace de la confluencia de los ríos Pelotas y Canoas, en Brasil. A lo largo de sus 1.838 km de longitud, el río experimenta cambios significativos en sus características físicas, químicas, sedimentológicas y biológicas (Abadie, 1998). La presencia de la represa de Salto Grande genera una marcada discontinuidad en estas características (Di Persia & Neiff, 1986). Diversos estudios sobre sedimentación en el embalse de Salto Grande han demostrado que este elemento antrópico interrumpe el transporte de sedimentos hacia aguas abajo (Acre-Hidrosud, 1971; Comisión Técnica Mixta de Salto Grande, 1995; Mangini et al., 2007; Collazos et al., 2021).

El tramo de río que abarca desde la represa hasta la desembocadura en el Río de la Plata, a la altura del Paralelo de Punta Gorda (Uruguay), es importante para Argentina y Uruguay desde las perspectivas económica, social y ambiental. Existen cinco ciudades sobre la margen argentina y nueve sobre la margen uruguaya. La población de las mismas alcanza los 600.000 habitantes, los cuales hacen uso del río para la obtención de agua para potabilización, vertido de efluentes y recreación (Junes, 2020). Además, la actividad turística asociada a las playas es un fuerte movilizador de la economía regional. Por ejemplo, la ciudad de Colón (Entre Ríos, Argentina) llegó a recibir, por esta actividad, alrededor de 100 millones de dólares estadounidenses anuales (Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda, 2017). Este tramo de río cuenta también con puertos comerciales y deportivos de distinta escala, siendo los más relevantes Nueva Palmira, Fray Bentos, Paysandú y Concepción del Uruguay. Los buques que circulan por el río mueven cargas del orden de los 3 a 4 millones de toneladas anuales (Junes, 2020), excluyendo al Puerto de Nueva Palmira.

La actividad portuaria y de transporte fluvial de cargas implica la necesidad de realización de tareas de dragados del canal de navegación del río, a los efectos de asegurar la navegabilidad a una profundidad de diseño. Tanto la República Oriental del Uruguay como la República Argentina entendieron conveniente que la administración de estas tareas sea llevada adelante por la Comisión Administradora del Río Uruguay (CARU).

El 16 de marzo de 2011 se celebró el Acuerdo Ministerial argentino-uruguayo que encomendó a la CARU la elaboración de un proyecto de dragado y balizamiento. Dicho acuerdo estableció que el canal debería contar, entre Punta Gorda y Concepción del Uruguay (kilómetro 0 y el kilómetro 187,1), con 23 pies de navegación (25 pies de profundidad), y entre Concepción del Uruguay y Paysandú (kilómetros 187,1 y 206,8), 17 pies de navegación (19 pies de profundidad). El diseño de la vía navegable fue adjudicado al consorcio integrado por EIH SA (Uruguay) e Incociv SRL (Argentina). El proyecto se desarrolló entre el 2012 y el 2014, y tuvo un costo total de poco menos de U\$S 400.000.

El día 13 de marzo de 2014, los cancilleres de la Argentina y Uruguay instruyeron a la Comisión Administradora del Río Uruguay para que instrumente el desarrollo de la obra proyectada entre los kilómetros 0 (Punta Gorda) y 206,8 (Puerto de Paysandú). Mediante Acuerdo suscripto el día 7 de abril de 2015, la Dirección Nacional de Vías Navegables en Argentina y la Administración Nacional de Puertos del Uruguay asumieron el

compromiso de su ejecución. En tales conceptos se abonaron casi 4 millones de dólares estadounidenses.

El 26 de noviembre de 2015, la CARU dispuso la contratación de los trabajos de Dragado de fondos duros en los pasos críticos “Montaña” (km 167 al 170,1) y “Casa Blanca” (km, 196,6 al 200,3). La contratación se efectuó a través del procedimiento de Licitación Pública Internacional. Se abonaron por este concepto casi 12 millones de dólares estadounidenses a la compañía belga Jan de Nul nv.

El 10 de Julio de 2017, la CARU resolvió la “Contratación de trabajos de dragado de apertura, profundización y mantenimiento en el Río Uruguay entre el km 0 (Punta Gorda) y 206,8 (Puerto de Paysandú), incluido el Canal de acceso al Puerto de Concepción del Uruguay”. El día 7 de diciembre de 2017, la CARU adjudicó la obra a la empresa Jan de Nul nv, por la suma de casi 40 millones de dólares estadounidenses, monto que contempló el mantenimiento del canal de navegación hasta marzo de 2022.

El 17 de noviembre de 2022 se firmó contrato con la misma empresa belga, por el dragado de mantenimiento en el período 2022-2025, por un monto mínimo de 12,5 millones de dólares.

Simultáneamente, la CARU aprobó las Resoluciones CARU N° 75/22 y 76/22. La primera creó un grupo de trabajo para estudiar una posible profundización de la vía navegable entre el km 0 (Nueva Palmira, ROU) y el km 186 (Puerto de Concepción del Uruguay, RA) a 34 pies, en sus aspectos de ingeniería y ambientales. Por otra parte, la segunda creó otro grupo de trabajo con la finalidad de realizar los estudios hidro-sedimentológicos y ambientales para poner en funcionamiento el dragado y balizamiento del tramo entre los kilómetros 207,8 (Puerto de Paysandú, ROU) y 336 (Puerto de Salto, ROU).

Esta línea del tiempo expresada, resumida en la Figura 1.1, en conjunto con la inversión de más de 56 millones de dólares estadounidenses realizada hasta la fecha, son datos concretos de la importancia de la vía navegable para los Estados que la administran.

En este contexto, el estudio del comportamiento hidro-sedimentológico del río Uruguay se vuelve absolutamente necesario a fin de diagramar y planificar los trabajos de dragado, y evaluar la potencial sedimentación en los pasos de navegación. La incertidumbre en esta variable es habitualmente considerada por las empresas dragadoras en el análisis de costo del servicio, y luego traducida en un mayor precio de la obra.



Figura 1.1.- Línea de tiempo sobre proyectos y obras de dragado en el río Uruguay.

A pesar de la explícita importancia de la región, y las implicancias del transporte de sedimentos en el contexto social, económico y ambiental del tramo de río aguas abajo de la represa de Salto Grande, existen casi nulos estudios de esta variable en la zona. Se pueden mencionar aquellos encargados por la Comisión Técnica Mixta de Salto Grande (2004) y la Comisión Administradora del Río Uruguay (EIH-INCOCIV, 2012) para el desarrollo de la vía navegable. Sin embargo, los enfoques utilizados han sido principalmente desde la perspectiva de la navegabilidad y carecen de datos suficientes para realizar un análisis integral de su comportamiento. Asimismo, existen datos de la Subsecretaría de Infraestructura y Política Hídrica (2022) referidos a caudales sólidos en una sección transversal (Concepción del Uruguay), los cuales resultan insuficientes desde el punto de vista espacial y temporal.

En el ámbito científico, existen publicaciones que presentan valores de las variables asociadas al transporte de sedimentos (Depetris & Griffin, 1968; Urien, 1972; Latrubesse et al., 2005; Menéndez & Re, 2009; Re et al., 2009; Colombo et al., 2014; Hopwood, 2015; Moreira, 2016; Moreira & Simionato, 2019), pero no desarrollan metodologías explícitas ni mediciones para llegar a dicho valor. Quizá la única explicación se encuentra en Re et al. (2009), trabajo en el cual se produjo un valor de transporte de sedimentos para el río Uruguay basado en las mediciones de la Subsecretaría de Infraestructura y Política Hídrica.

En el año 2023, se presentó una tesis doctoral con los primeros análisis espacio-temporales del transporte de sedimentos, su medición y estimación con instrumentos acústicos, concentrada en la dinámica en una unidad de bifurcación (López Weibel, 2023). Esta investigación, la cual se enmarcó parcialmente en el mismo proyecto interno ejecutado la Comisión Administradora del Río Uruguay de la presente tesis, dejó en evidencia algunos de los vacíos de conocimiento más evidentes.

Esta tesis viene a contribuir principalmente en la comprensión de la dinámica hidro-sedimentológica del río, aportando información con mayor detalle espacial y temporal, nuevas técnicas para la estimación del transporte de sedimentos y análisis más profundo de los procesos hidro-sedimentológicos. Asimismo, se espera que este documento sirva como una herramienta básica y necesaria para la mejor gestión de los recursos naturales, la interpretación de los datos ambientales y el desarrollo de la vía navegable. Además, se busca generar tecnologías y métodos propios para la cuantificación de variables sedimentológicas que permitan incrementar sustancialmente su cantidad y calidad.

1.2. Objetivos

Como resultado del examen de los antecedentes disponibles, y considerando las carencias en el conocimiento específico antes mencionado, se ha planteado como objetivo general de este trabajo de tesis *analizar y cuantificar los distintos modos de transporte de sedimentos, y sus variaciones temporales y espaciales en el tramo inferior del río Uruguay*. Se entiende este tramo como el que va desde la desembocadura en el Río de la Plata hasta la represa de Salto Grande, 350 km aguas arriba. Atendiendo al acercamiento ingenieril de los fenómenos estudiados, la escala temporal analizada se acota al período de los últimos 45 años, que coincide con el período de operación de la represa.

A los efectos de contribuir al objetivo general, y en virtud de los distintos enfoques metodológicos que se pueden desarrollar, se contemplan en esta tesis los siguientes objetivos específicos:

OE1: desarrollar y aplicar metodologías de medición y procesamiento de información, basadas en nuevas tecnologías.

OE2: cuantificar y analizar el transporte de sedimentos que compone el lecho, teniendo en cuenta los distintos mecanismos observables.

OE3: cuantificar y analizar el comportamiento de las arcillas y limos transportados por el río producto de la erosión en la cuenca (carga de lavado).

OE4: evaluar la aplicabilidad y ajustar las ecuaciones que relacionan la hidrodinámica y el transporte de sedimentos.

OE5: analizar las formas de fondo presentes, su variabilidad espacial y temporal, y su posible influencia en el desarrollo de la vía navegable.

OE6: evaluar las variaciones espaciales y temporales del transporte de sedimentos en el período de operación de la represa de Salto Grande (1980-actualidad). Determinar, a partir de ello, una posible influencia de la obra en este fenómeno.

OE7: realizar un análisis histórico de la evolución del transporte de sedimentos en el tramo mencionado.

1.3. Ordenamiento de la tesis

La tesis se estructura en tres partes que abordan de forma progresiva el desarrollo de los objetivos planteados, desde la contextualización del problema hasta la presentación de resultados aplicables a la gestión del tramo inferior del río Uruguay.

En la Parte I – Aspectos generales, se introduce el marco conceptual, territorial, técnico y metodológico del estudio. Se presentan los objetivos, el área de estudio, la problemática del transporte de sedimentos y una revisión de antecedentes relevantes. También se sintetiza la información disponible, incluyendo registros históricos, trabajos previos y datos instrumentales, que fundamentan la necesidad de avanzar en metodologías de cuantificación del transporte de sedimentos en ríos de llanura. Por último, en esta Parte, se exhiben las herramientas y métodos de campo para la obtención de la información de base para este trabajo.

Luego, en la Parte II – Cuantificación y análisis de variables sedimentológicas, se desarrollan las herramientas técnicas utilizadas para estudiar del transporte de sedimentos, con énfasis en los métodos de medición acústicos y batimétricos. Se describen los procedimientos de gabinete y las técnicas de tratamiento de datos. Además, se incluyen los desarrollos propios, como algoritmos para el análisis morfológico y modelos de inversión acústica, que permiten interpretar la dinámica de los sedimentos en el río a partir de mediciones en condiciones actuales.

Por último, en la Parte III – Integración de resultados y conclusiones, se compilan y analizan los resultados obtenidos mediante las metodologías aplicadas. Se construyen series de descarga sólida y se estiman cargas anuales, identificando patrones de comportamiento en relación con las condiciones hidrológicas e hidro-sedimentológicas. Se evalúa la aplicabilidad de las herramientas desarrolladas y se discuten sus ventajas y limitaciones. Se presentan también las conclusiones generales de la tesis como respuesta a los objetivos planteados, y se proponen líneas de investigación futuras.

Capítulo 2

Transporte de sedimentos en ambientes fluviales de llanura. Definiciones básicas y su medición

2.1. Introducción

El transporte de sedimentos en general, y en particular en ambientes fluviales de llanura, se define como el transporte de partículas granulares por la acción de un fluido, lo que implica un flujo bifásico con una fase sólida y una líquida (García, 2008). En este caso, la fase sólida está constituida por el material granular (arena, limo y arcilla) y la fase líquida que es el agua de río. Este tema es tan ubicuo como fascinante. El mismo Albert Einstein realizó incursiones en la morfodinámica aluvial, y alentó a su hijo Hans a perseguir una carrera en dicha área del conocimiento (Ettema & Muttel, 2004).

La interacción entre el flujo y el material aluvial constituye uno de los principales agentes modeladores del paisaje fluvial. En términos generales, el sedimento transportado en la columna de agua, impacta de diversas maneras en el comportamiento del río, su hábitat y en sus diferentes aprovechamientos. Esta variable adquiere particular relevancia en problemas asociados al transporte de metales pesados, la colmatación de embalses, la sedimentación en zonas portuarias y en “pasos críticos” de navegación fluvial, y en la estabilidad morfodinámica de los cauces (Rennie, 2017).

Los registros de datos de transporte de sedimentos son escasos en la mayoría de los ríos del mundo, por la dificultad de su medición y altos costos relativos.

2.2. Modos de transporte de sedimentos

Las variables que miden el transporte de sedimentos en un curso aluvial se asocian a una sección transversal y tienen magnitudes de masa de los sedimentos [M] que cruzan dicha sección en un tiempo determinado [T]. En el Sistema Internacional esto se mide en kg/s.

Hay dos maneras de clasificar el transporte de sedimentos en ambientes fluviales: según el tamaño de los materiales transportados y según el mecanismo de transporte de los mismos (García, 2008).

En la primera clasificación se distinguen dos variables que engloban dos tipos de transporte de sedimentos: transporte de material de lavado de la cuenca, o carga de lavado (G_w), y transporte de material aluvial, de lecho o de fondo (G_s).

La segunda clasificación, con un enfoque mecanicista, separa al transporte de material aluvial en transporte, carga o arrastre de fondo (G_{sf}) y transporte o carga de material de fondo en suspensión (G_{ss}). Estos dos modos de transporte tienen, efectivamente, influencia en los procesos de erosión y sedimentación de ríos aluviales (Basile, 2018), lo que es particularmente relevante en sistemas fluviales que se utilizan como vía navegable, como el caso del río Uruguay. Esta separación excluye a la carga de lavado (G_w), ya que tanto G_{sf} como G_{ss} tienen correlación con la hidrodinámica del cauce, mientras que el valor de G_w es producto de diferentes fenómenos a escala de cuenca. De manera gráfica, se presentan en la Figura 2.1 las definiciones vertidas *ut supra*.

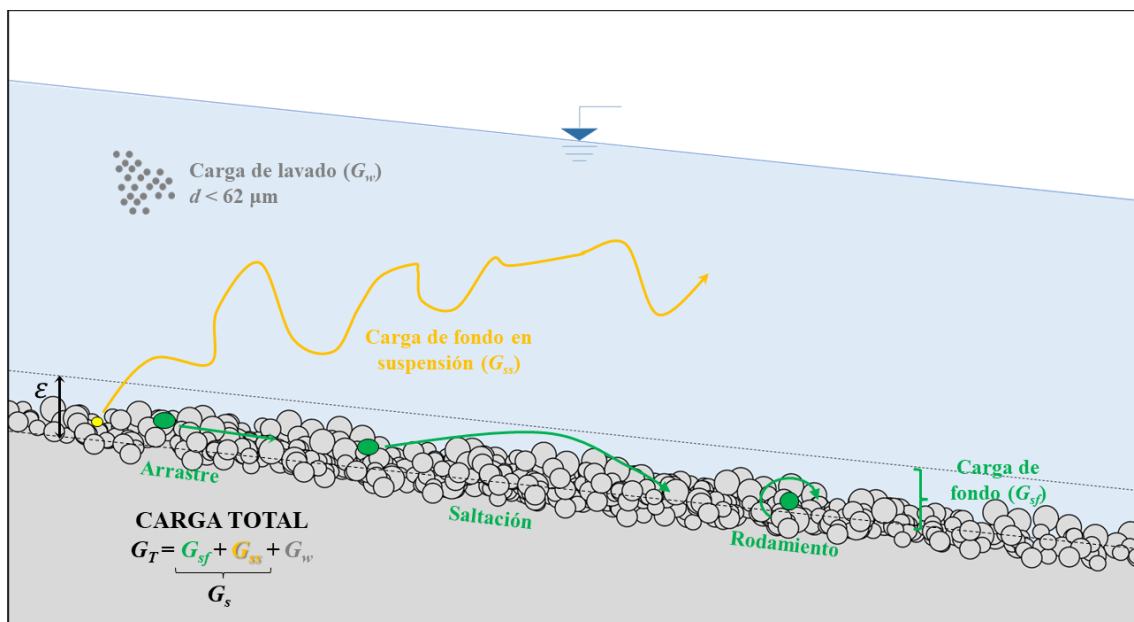


Figura 2.1.- Modos de transporte de sedimentos.

2.2.1. Carga de lavado

Si bien el límite de tamaño de las partículas transportadas como carga de lavado (G_w) es variable y puede depender de las características de la corriente (Hill, et al., 2017), el criterio más aceptado en hidráulica fluvial es considerar aquellas cuyo diámetro medio (d) es menor a 62 μm . En la escala de Wentworth (Wentworth, 1922), comprende limos y arcillas. El límite establecido es un valor razonable para que las fuerzas electroquímicas de las partículas puedan contraponerse a los efectos de la gravedad sobre las mismas, y en el hecho de que este tipo de sedimentos (G_w) normalmente no interviene en los procesos de erosión y sedimentación (García, 2008; Basile, 2018). La presencia de este tipo de partículas en el lecho aluvial es en porcentajes bajos (García, 2008) ya que son mantenidas en suspensión con gran facilidad por la turbulencia de la corriente (Latosinski, 2014). Además, este tipo de carga se distribuye de manera relativamente homogénea en una sección transversal (Baronas, et al., 2020).

Desde el punto ambiental, G_w es significativamente más importante. Las partículas de menor diámetro tienen la capacidad de adsorber y, en ciertas circunstancias, aglutinarse y formar flóculos con sustancias químicas potencialmente contaminantes. Asimismo, este tipo de transporte es relevante en obras civiles donde se generan condiciones para la sedimentación, como por ejemplo en embalses, dársenas y puertos. La denominación carga de lavado obedece a que las partículas tienen origen en la cuenca de aportes al cauce aluvial, producto del lavado realizado por las precipitaciones.

2.2.2. Transporte de material aluvial

En contraposición a la carga de lavado, el transporte de material aluvial (G_s), está compuesto por las partículas mayores a 62 μm de diámetro, que se desplazan por la acción de corriente sobre las mismas. La cantidad de material transportado responde de manera directa a las tensiones que ejerce el flujo sobre el lecho. Como ya se mencionó, esta carga se divide, según el mecanismo preponderante en el desplazamiento de las partículas, en transporte de fondo (G_{sf}) y transporte de fondo en suspensión (G_{ss}).

El transporte de fondo, G_{sf} , es aquel en el que las partículas son arrastradas, ruedan o saltan por distancias comparables al diámetro de las mismas. Está directamente vinculado a la tensión de corte actuante sobre el fondo del cauce y al diámetro de las partículas transportadas. En este modo, las partículas se mueven en un estrato de espesor ε (Figura

2.1) que se halla en el orden de la dimensión de los mayores diámetros del sedimento del lecho (Latosinski, 2014).

El transporte de carga de fondo en suspensión, G_{ss} , ocurre cuando las fluctuaciones turbulentas del campo de flujo ejercen suficiente empuje hacia arriba sobre las partículas para compensar, en términos medios, el peso de las mismas. De esta manera las partículas se desplazan, por encima del estrato de fondo, por trayectorias relativamente largas comparables con la profundidad del flujo (García, 2008; Basile, 2018)

El transporte de sedimentos total (G_T) en una sección transversal se compone de la suma de la carga de lavado (G_w) y del transporte de sedimentos de fondo (G_s).

En términos matemáticos, se presentan las equivalencias en la ecuación [2.1]. En la bibliografía específica de la materia, puede encontrarse que los desarrollos de formulaciones se encuentran realizados para el transporte de sedimentos en un ancho unitario de canal. Esto se representa como se señala en la ecuación [2.2], indicando la carga por unidad de ancho con la letra “g” minúscula.

$$G_T = G_{sf} + G_{ss} + G_w = G_s + G_w \quad [2.1]$$

$$g_T = g_{sf} + g_{ss} + g_w = g_s + g_w \quad [2.2]$$

También es uso y costumbre en la bibliografía referir al transporte de sedimentos en términos volumétricos. Esto es, dividiendo cada componente de las ecuaciones [2.1] y [2.2] entre la densidad promedio de las partículas transportadas (ρ_s). A los efectos del presente, esta variable se simboliza con la letra q , siendo cada subíndice homólogo a los ya expuestos.

2.3. Medición del transporte de sedimentos

Una correcta gestión del recurso hídrico contempla la medición del transporte de sedimentos en un curso fluvial y su interacción con los procesos hidrológicos en la cuenca de drenaje correspondiente (Organización Meteorológica Mundial, 2011). Edwards & Glysson (1999), Diplas et al. (2008), Anderson et al. (2010), Latosinski (2014), Rennie (2017), Basile (2018), solo por nombrar algunos de los más recientes, han publicado capítulos completos dedicados a esta temática, con un nivel de detalle que hacen que el desarrollo de este tema resulte redundante. No obstante, se presentan a continuación las metodologías asociadas al presente trabajo, a los efectos de proveer contexto al aporte de este documento.

La medición de la cantidad de sedimentos que atraviesa una sección transversal de una corriente aluvial, en un momento determinado, es conocida como aforo sólido. Para esta tarea existen métodos directos e indirectos (Rhoads, 2020). Los primeros implican una contabilización, a través de un muestreo, de las partículas que atraviesan dicha sección transversal. Este muestreo puede ser total o de una porción estadísticamente representativa de las partículas. Los segundos, es decir los métodos indirectos, utilizan tecnologías subrogantes que permiten correlacionar otras variables con el contenido de partículas de sedimentos en la corriente fluvial.

Según el tipo de transporte que se quiera medir, y el objetivo en particular que se persigue con la medición, existen distintos tipos de equipos muestreadores o distintas técnicas que pueden utilizarse. A continuación, se describen de acuerdo al tipo de carga de sedimentos.

Los métodos estándares directos para la medición de G_w y/o G_s en grandes ríos implican la medición de la concentración de sedimentos, M_w (o M_{s1}) y M_s , respectivamente. Esta última variable representa la masa de determinado tipo de partículas de sedimentos en un volumen de muestra de mezcla agua-sedimento. Esta variable tiene magnitudes de masa [M] sobre volumen [L^3], que en el Sistema Internacional expresa en kg/m^3 o sus múltiplos.

Para esta medición, se requieren de captadores puntuales o integradores en la vertical, cuya operación generalmente exige la utilización de una embarcación que permanezca anclada durante un cierto intervalo de tiempo. Si bien estos métodos han sido y continúan siendo usados hasta el presente por haber demostrado ser aptos y confiables (van Rijn, 1993; Rennie, 2017), usualmente implican elevados tiempos de medición y procesamiento en laboratorio de las muestras obtenidas.

Los equipamientos utilizados para medir el transporte de sedimentos en suspensión se dividen entre aquellos capaces de captar las arenas en suspensión (G_{ss}) y aquellos que no. Los primeros deben respetar la condición de orientarse con el flujo, y permitir el ingreso de la mezcla agua/sedimento al muestreador con la misma velocidad de la corriente. A esta propiedad se la denomina “isocinética”. Si esta propiedad no se cumple, se introduce un error en los valores obtenidos de concentración y distribución del tamaño de sedimento de la muestra, error que se incrementa a medida que aumenta el tamaño de las partículas en suspensión (García, 2008).

Los muestreadores que no cumplen con la propiedad isocinética, normalmente son de más sencilla operación, y son aptos para mediciones de calidad del agua o donde el objetivo es la captación del sedimento fino (limos y arcillas).

2.3.1. Medición de carga de lavado

Esta es la modalidad de transporte sobre la cual se tienen mayor información, en términos generales, y particularmente en el río Uruguay. Esto se debe a que la concentración de este tipo de material en suspensión es relativamente homogénea en la sección transversal (Baronas, et al., 2020) y, consecuentemente, su medición es más sencilla. Esto implica que las muestras superficiales suelen ser un buen indicador de su valor medio y, por lo tanto, más fáciles de obtener. Con una concentración representativa de la sección transversal, el producto de esta por el caudal líquido en dicha sección da como resultado G_w .

La cuantificación de esta variable tiene fundamental implicancia a la hora de evaluar el transporte de contaminantes, que viajan adsorbidos en la superficie de las partículas o en agregados (*e.g.* flóculos), y la sedimentación en zonas portuarias (*e.g.* dársenas de puertos). En la Figura 2.2 se presenta una botella de van Dorn, la cual es un muestreador típico para la medición de esta variable.



Figura 2.2.-Botella de van Dorn, para toma de muestra puntual de agua.

2.3.2. Medición de sedimentos aluviales en suspensión

Esta modalidad de transporte consiste en el movimiento de los granos de sedimento, cuyo diámetro es mayor a 62 micrones, suspendidos en el curso fluvial debido a que las fluctuaciones turbulentas contrarrestan la velocidad de caída de las partículas (Niño & García, 1998). Para su medición se utilizan muestreadores isocinéticos. Estos se clasifican en dos tipos, de acuerdo al tipo de muestra que recolectan: los muestreadores integradores en la vertical y los puntuales. Un muestreador integrador en la vertical recoge y acumula una muestra ponderada por la velocidad de la corriente (o caudal) mientras ocurre su descenso y ascenso por la columna de agua. Esto es válido siempre y cuando dicho descenso-ascenso se realice a una tasa constante y se evite que el recipiente contenedor se complete. En cambio, un muestreador puntual (o integrador de la vertical por puntos) utiliza un sistema eléctrico o mecánico de activación de la válvula de ingreso. Una vez establecida la ubicación del muestreador, se acciona la válvula durante un tiempo determinado, a los efectos de que se colecte la muestra. Ambos tipos de muestreadores poseen un rango vertical de muestreo que va desde la superficie del agua hasta aproximadamente 0,1 m del fondo.

En el sitio web https://water.usgs.gov/fisp/catalog_index.html (United States Federal Interagency Sedimentation Project, 2021), puede encontrarse una lista de muestreadores de sedimentos en suspensión. Allí también se puede encontrar un diagrama de flujo para la selección del muestreador más apropiado de acuerdo al tipo de transporte y características del cauce donde se desee medir.

Estos muestreadores se pueden utilizar para obtener muestras representativas de la concentración y distribución de tamaños del material en suspensión en una determinada sección del río.

Si bien este tipo de muestreadores son escasos en Argentina y Uruguay, tanto la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral (FICH-UNL, Argentina), el Instituto Nacional del Agua (INA, Argentina) y la DINAGUA (Dirección Nacional de Aguas - Uruguay) cuentan con equipos del modelo US P-61 (Figura 2.3).

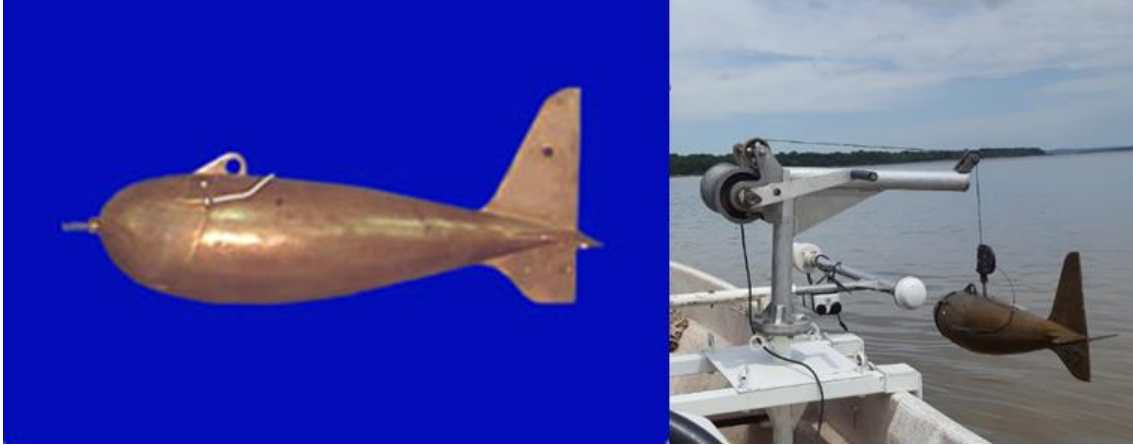


Figura 2.3.- Muestreador isocinético puntual de sedimentos en suspensión US P-61 (FICH-UNL).

Edwards & Glysson (1999) presentaron los pormenores de los métodos de integración transversal de las muestras obtenidas para la obtención del aforo sólido. Existen dos métodos principales: Incrementos Iguales de Caudal y de Incrementos Iguales de Ancho (*EDI* y *EWI* por sus siglas en inglés, respectivamente).

Si bien los métodos tradicionales son indefectibles para conocer el valor del transporte de sedimentos en una sección transversal, los inconvenientes relacionados a su implementación hicieron que la comunidad científica, durante los últimos 20 años, busque alternativas a su implementación.

Entre la variedad de técnicas en la bibliografía, las siguientes cinco han tenido un mayor desarrollo (Latosinski, 2014): óptica, difracción láser, imagen óptica digital, diferencia de presión y acústica Doppler. Estas técnicas tienen un desarrollo detallado en Gray & Gartner (2010), a los efectos del presente trabajo se analizan las técnicas basadas en la acústica Doppler.

Los perfiladores de corriente acústicos Doppler (ADCP, sigla de la voz inglesa *Acoustic Doppler Current Profiler*) fueron diseñados originalmente para la medición del caudal líquido en corrientes naturales, no obstante, han sido reconocidos como una potencial herramienta para cuantificar la concentración del sedimento suspendido y su transporte (Gray & Gartner, 2010), a través del análisis de la intensidad de la señal de retorno. Estos instrumentos poseen claras ventajas en comparación con los equipos tradicionales y las otras nuevas tecnologías: no son intrusivos, miden la velocidad del flujo simultáneamente, presentan elevadas resoluciones temporales y espaciales, y sólo requieren toma y procesamiento de muestras sedimentológicas en laboratorio durante su calibración. Esto

último cobra especial relevancia, ya que implica una reducción sustancial de los tiempos de operación en campo y gabinete y, consecuentemente, los costos asociados.

En el río Uruguay, el antecedente con mayor relevancia de medición de esta variable, data del año 2013, en el marco del “Proyecto de Dragado y Balizamiento del Río Uruguay desde el km 0 al km 187,1, incluyendo el Canal de Acceso al Puerto de Concepción del Uruguay y los Canales entre el km 187,1 y el km 206,8 Puerto de Paysandú” (EIH-INCOIV, 2012). Se realizaron mediciones de G_{ss} , en distintos pasos de navegación, con un muestreador USP-61. Luego, estas mediciones fueron extrapoladas utilizando métodos en base a mediciones de señal acústica con ADCP.

2.3.3. Medición de sedimentos aluviales transportados por el fondo

El transporte de fondo varía drásticamente con el tiempo en un punto y a lo largo de una sección de un cauce, incluso cuando el flujo es estacionario (García, 2008). Es por este motivo que existe una variedad de muestreadores y técnicas para su medición, sin ser ninguna de ellas la más apropiada para adoptar como regla general (Latosinski, 2014).

Existen cinco métodos para determinar el transporte de fondo:

- 1) Las mediciones directas, que se realizan con instrumentos que se diseñan a tal fin, con sus limitaciones y eficiencias diferentes (van Rijn, 2007; Rennie, 2017; Basile, 2018). El principio de funcionamiento consiste en atrapar la porción de los sedimentos que circulan por el fondo en un recipiente colector, normalmente provisto de una malla que permite el pasaje del flujo, pero no de las partículas del diámetro de interés. El transporte de fondo se calcula como la relación entre el peso de sedimentos colectado y el tiempo de muestreo. Luego, G_{sf} se calcula con uno de los métodos de integración en la sección transversal propuestos por Edwards & Glysson (1999). En la Figura 2.4 se pueden observar algunos ejemplos de muestreadores.
- 2) El método de mediciones de material del fondo erosionado o depositado en áreas confinadas. Consiste en contabilizar la masa de sedimentos capturada por un cuenco en un tiempo determinado, o la masa removida de una sección en un tiempo determinado. *Se puede considerar la tasa de llenado de un paso de navegación dragado como parte de este método.*
- 3) El método indirecto basado en el seguimiento de dunas. Este método requiere que el fondo del curso posea formas de fondo. La metodología de muestreo depende

del equipamiento a emplear, esto es sondas de haz simple o haces múltiples. Este método puede ser aplicado tanto a datos de laboratorio como a datos de campo.

- 4) El método que utiliza fórmulas de cálculo que se basan en variables hidráulicas medidas en campo. Al ser calibradas en zonas específicas funcionan muy bien, sin embargo, ninguna ha demostrado una aplicabilidad general, llegando incluso a presentar errores de hasta un 100 % (Vanoni, 2006).
- 5) Los métodos hidroacústicos, tanto pasivo como activo. La hidroacústica pasiva tiene que ver con la recepción de la acústica del movimiento del material del fondo a través de distintos dispositivos o sensores específicos (Latosinski, 2014; Rennie, 2017). Luego, corresponde relacionar los valores medidos con el transporte de fondo medido tradicionalmente para obtener una calibración. La hidroacústica activa consiste en obtener la velocidad aparente de desplazamiento del fondo con un ADCP (v_B), a partir de la diferencia entre la velocidad de la corriente medida con referencia a la posición dada por posicionamiento satelital (v_{GPS}), y la velocidad con referencia al fondo (v_{BT}), obtenida mediante el sistema de posicionamiento respecto del lecho, “*Bottom Track*”, que utilizan los ADCPs.

Los métodos del 2 al 5, para la obtención de G_{sf} , son explorados y expandidos en el Capítulo 8 de la presente tesis.

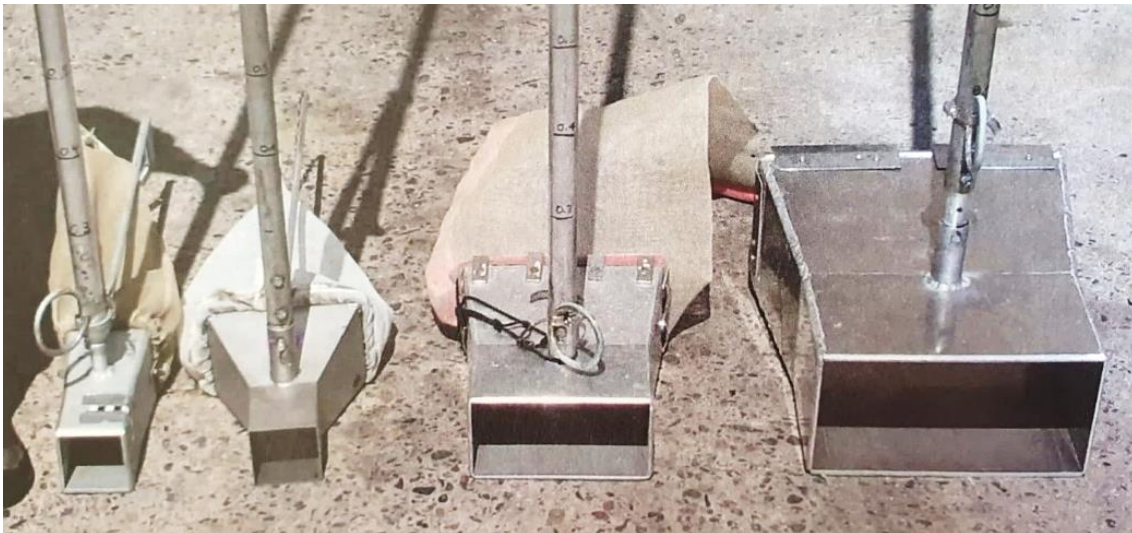


Figura 2.4.- Ejemplos de muestreadores de fondo. De izquierda a derecha: US BL-84 (apertura de 3 pulgadas), Helley-Smith (apertura de 3 pulgadas), Elwha (apertura de 8 x 4 pulgadas) y Toulte River 2 (apertura de 12 x 6 pulgadas). Tomada de Rennie (2017).

Capítulo 3

Descripción general del área de estudio

3.1. Introducción

El río Uruguay drena una cuenca de más de 365.000 km² con una geología y geomorfología que varía fuertemente en toda su extensión, y particularmente a lo largo del curso fluvial. El cauce principal tiene sus nacientes en la confluencia de los ríos Canoas y Pelotas. Estos tienen sus respectivas nacientes en las Serra do Mar y Serra Geral, a una altitud de aproximadamente 1.800 metros sobre el nivel del mar (mnsnm) (Iriondo & Kröhling, 2008). La unión de estos ríos ocurre a unos 500 msnm. A partir de allí, el río discurre por una longitud total de 1.838 km hasta Nueva Palmira (hasta la latitud que pasa por Punta Gorda, Uruguay), donde comienza el Río de la Plata. En esta zona de desembocadura, el delta actual del Paraná llega muy cerca de la costa uruguaya, produciendo un estrechamiento que reduce el ancho del río Uruguay de 12 a 1 km aproximadamente (Abadie, 1998; Iriondo & Kröhling, 2008). Ver Figura 3.1.

El Uruguay se presenta sinuoso y accidentado desde las nacientes hasta la frontera argentina, siendo frecuentes los rápidos y pequeños saltos en cascada. Los más destacados, con una altura de entre 5 y 10 m, son los Saltos de Moconá (Abadie, 1998). A medida que el curso se convierte en la frontera entre Argentina y Brasil, cambia su curso en dirección hacia el Sudoeste. En este tramo, las aguas fluyen con menor velocidad, debido a la disminución de la pendiente longitudinal (Figura 3.2). Nuevamente, a la altura del eje Monte Caseros – Bella Unión, el río modifica su rumbo hacia el Sur. Desde allí se extiende un tramo de 500 km hasta la desembocadura, formando el límite entre Argentina y Uruguay (Abadie, 1998; Larenze, 1998). Este último tramo se denomina en la bibliografía como bajo Uruguay. Una característica fundamental para este es la presencia de la represa de Salto Grande, que genera una fuerte discontinuidad hidro-

sedimentológica. La presente tesis se enfoca en el tramo del río Uruguay aguas abajo de la represa antes mencionada, el cual comprende un tramo de 350 kilómetros hasta su desembocadura (Figura 3.3), y que a los efectos del presente se denomina bajo Uruguay (Abadie, 1998).

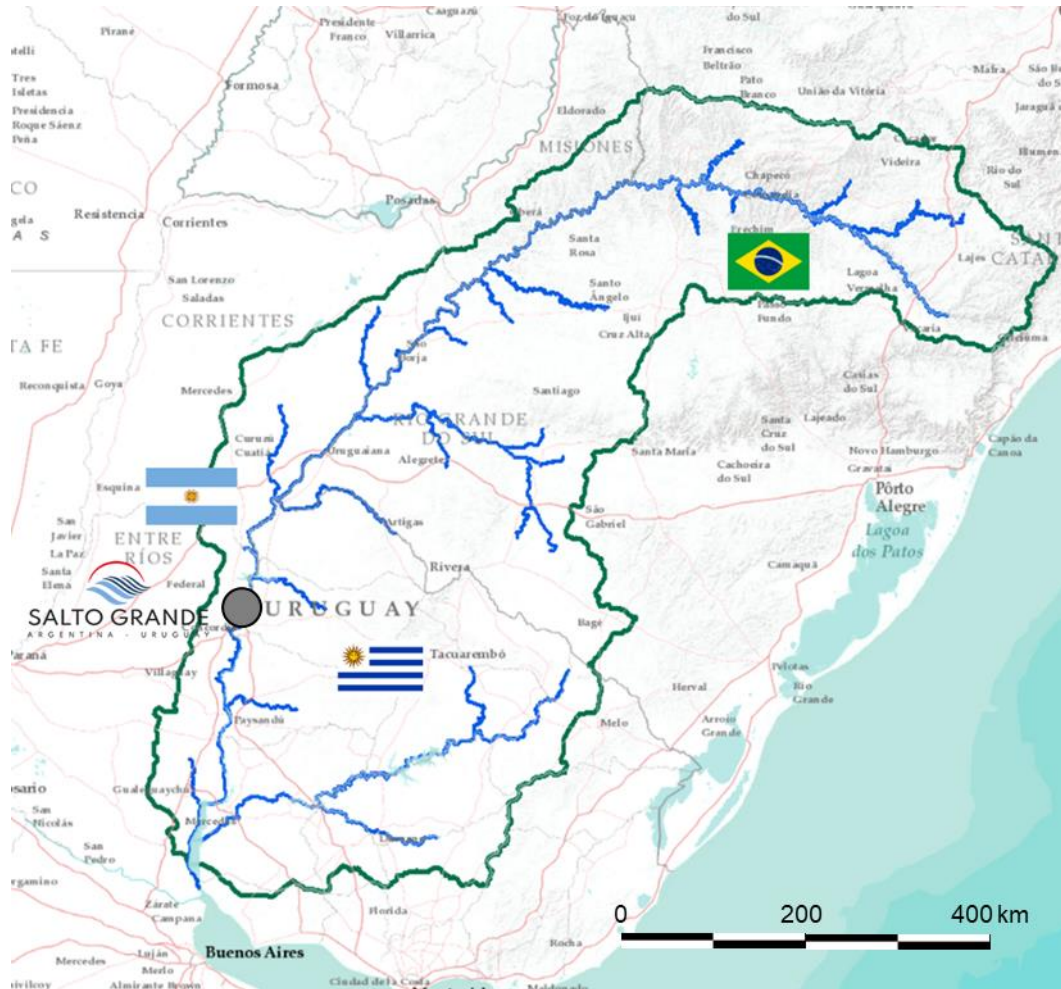


Figura 3.1.- Ubicación general de la cuenca en Sudamérica.

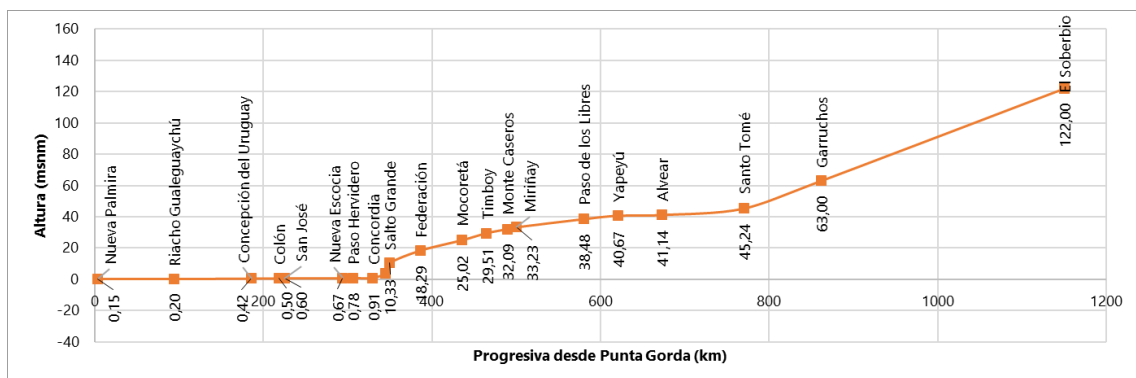


Figura 3.2.- Perfil longitudinal de elevaciones del lecho del río Uruguay. Modificado de Soldano (1947) en (Di Persia & Neiff, 1986).

3.2. Represa de Salto Grande

Partiendo desde la desembocadura del río Uruguay, la ruta de navegación fluvial tiene su kilómetro 0 en el paralelo que pasa por el Hito de Punta Gorda (Uruguay). En el kilómetro 350 de dicha ruta se emplaza el Complejo Hidroeléctrico Salto Grande. La principal obra del complejo consiste en una represa hormigón y materiales sueltos que genera el embalse homónimo hacia aguas arriba.

Como características principales del embalse puede señalarse que recibe un caudal medio de $5.522 \text{ m}^3/\text{s}$ (Serie 1979-2016), posee una superficie de 783 km^2 y un volumen de 5.000 hm^3 (Comisión Técnica Mixta de Salto Grande, 2022). La relación entre el volumen del embalse y su caudal medio (10 días) permiten clasificarlo como una central hidroeléctrica de pasada, aunque la Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico de Argentina (CAMMESA) lo define como un “Embalse Semanal” (CAMMESA, 2022).

La represa en si misma consta de 3 tramos, dos de materiales sueltos a ambos márgenes y un sector central de hormigón, donde se ubica la central hidroeléctrica y el vertedero. La central cuenta con 14 turbinas Kaplan, cuya erogación máxima nominal conjunta es de $8.680 \text{ m}^3/\text{s}$, pero ha alcanzado los $9.760 \text{ m}^3/\text{s}$ en condiciones de sobrecarga hidráulica. Los caudales que superan este valor, necesariamente son erogados a través del vertedero. En este sentido, el Manual del Agua elaborado por la Comisión Técnica Mixta de Salto Grande (Comisión Técnica Mixta de Salto Grande, 2006) define los caudales de modulación ($12.000 \text{ m}^3/\text{s}$) y de navegación ($600 \text{ m}^3/\text{s}$) sobre los cuales establece cuatro mecanismos de operación de la central, a saber:

- Modo de Operación Energética: se prioriza la producción energética. Es el modo de operación por defecto.
- Modo de Operación en Crecida: se da cuando los caudales de aporte a la represa, o el pronóstico de los mismos, generan una programación de erogación con caudal superior al de modulación.
- Modo de Operación en Estiaje: se da cuando el caudal de aporte, o su pronóstico, es menor al caudal de navegación.
- Modo de Operación Especial: Contempla situaciones especiales, programadas o no, que pueden alterar la evacuación.

De lo expuesto surge que la mayor parte del tiempo el régimen de erogación está controlado en función de los pulsos de producción energética necesarios, que se caracteriza por su variación horaria en función de la demanda energética. Superado cierto

umbral de erogación (caudal de modulación), el criterio operación es cambiado por uno que atenúe los efectos adversos de las crecidas. Lo último implica la desaparición de los cambios horarios en la erogación, fenómeno que es fundamental para comprender los procesos hidrodinámicos e hidrosedimentológicos en todo el tramo aguas abajo, particularmente los que ocurren en la transición entre los dos regímenes, máxime en las cercanías de la represa.

3.3. El Bajo Uruguay

Este tramo constituye un sistema fluvial que cuenta, en la actualidad, con condiciones de borde bien definidas aguas arriba y aguas abajo. Aguas arriba está limitado por la represa de Salto Grande, que regula el caudal líquido y sólido en su ingreso. Aguas abajo, el Río de la Plata controla la descarga con su nivel, que depende fuertemente del nivel del mar y los vientos.

El balance entre los caudales erogados por la represa y el nivel del Río de la Plata, configuran diferentes escenarios hidrodinámicos de circulación del flujo. Si bien este es predominante de Norte a Sur, para condiciones extremas pueden registrarse reversiones del flujo que pueden detectarse hasta 250 km aguas arriba de la desembocadura (Junes, 2020).

Los aportes laterales más importantes en este tramo del Uruguay son el Río Gualeguaychú, por margen derecha, y el Río Negro por margen izquierda, a la altura de los kilómetros 95 y 60 respectivamente. Los caudales medios de dichos aportes suelen ser despreciables para la escala del río, con la excepción de los escenarios de fuertes precipitaciones en sus respectivas cuencas y caudales bajos erogados por la represa de Salto Grande. Respecto al aporte de sedimentos de estos ríos, no existe literatura disponible. No obstante, el río Negro también cuenta con una discontinuidad en el transporte de sedimentos gruesos, debido a la represa El Palmar, ubicada aproximadamente 100 km aguas arriba de la desembocadura.

Para el área de estudio, la bibliografía disponible es escasa y, por lo general, poco profunda. El denominado Bajo Uruguay comprende tres subtramos diferenciados según sus características geomorfológicas por los autores. El primer subtramo abarca entre el Complejo Hidroeléctrico Salto Grande y Concepción del Uruguay, el segundo hasta el kilómetro 85 (10 km aguas abajo de Fray Bentos) y el último subtramo abarca hasta la desembocadura, lo cual puede observarse en la Figura 3.3. Se enuncia a continuación un

resumen del texto de Iriondo & Kröhling (2008), que tiene como finalidad resaltar los elementos relacionados, o que pueden utilizarse para explicar el funcionamiento hidro-sedimentológico del área de estudio.

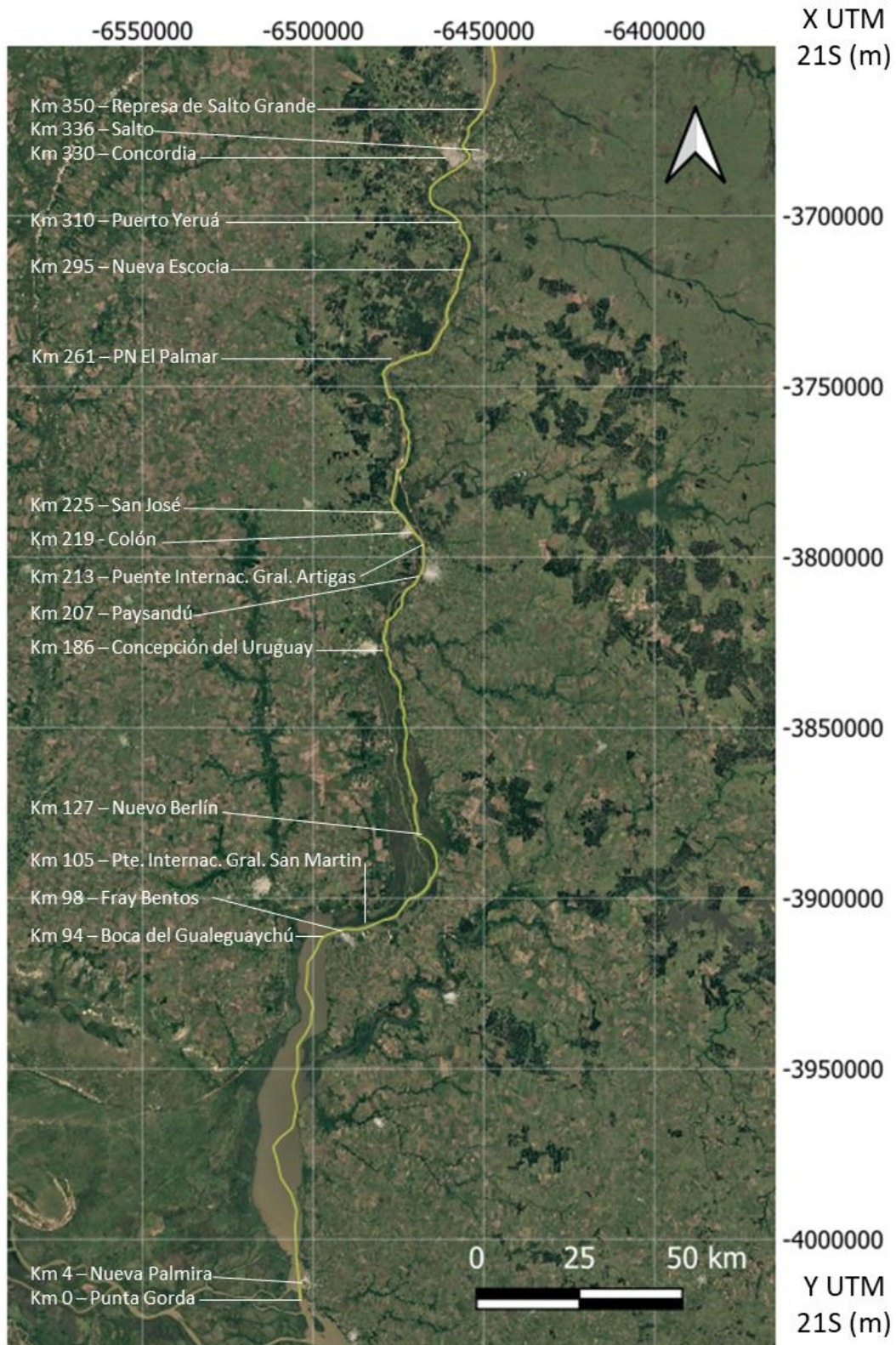


Figura 3.3.- Tramo denominado “Bajo Uruguay”, limitado por la represa de Salto Grande y el Río de la Plata.

3.3.1. Primer subtramo

Comienza inmediatamente aguas abajo del embalse de Salto Grande (km 350) hasta aguas arriba de Concepción del Uruguay (km 186). Desde la represa hasta el Parque Nacional El Palmar (km 260) el río corre encajado en rocas cretácicas que afloran en algunos lugares. Morfológicamente, este sector septentrional está compuesto por dos grandes meandros unidos por un tramo recto de 29 km de extensión. Este sector aumenta su ancho hacia aguas abajo y presenta bancos de arena e islas alargadas y estrechas, de evidente control estructural, estas últimas recostadas sobre la margen uruguaya. Es notable la persistente tendencia hacia la acumulación de sedimentos en dicha margen.

El meandro ubicado aguas abajo está encajado en rocas sedimentarias sobre ambas márgenes. Tiene 10 km de amplitud y ancho variable entre 1 y 1,7 km. Numerosos bancos grandes de arena estables aparecen en ese sector, y le otorgan al río características transicionales a la cuenca inferior.

Hacia aguas abajo del Parque Nacional El Palmar, dentro de este subtramo, el ancho del río oscila entre 1 y 2,5 km de ancho. Una característica persistente de la dinámica actual en todo el subtramo en análisis es el adosamiento de bancos de arena en el extremo de aguas arriba de las islas. La arena de los bancos de cauce ha sido deflacionada en algunos puntos favorables por vientos del sur, formando campos de dunas de 1 km de ancho típico, como los que aparecen entre Colón y Concepción del Uruguay. El Puente Internacional General Artigas (Colón-Paysandú) y su acceso sobre la margen derecha, atraviesan un perfil del sistema morfológico del Holoceno fluvial del río Uruguay. Al acceder al río desde la margen argentina, se encuentra la terraza baja bien preservada, a la que se han adosado 12 albardones sucesivos con la misma altura que ésta. El adosamiento de albardones produce un relieve local del orden de los 2 m, con valores extremos de 4 m. Las depresiones interalbardón presentan irregularidades de varios decímetros de altura y están ocupadas por lagunas, pantanos y pajonales. La distancia entre albardones varía entre 20 y 100 m; dichos elementos morfológicos tienen un relieve interno del orden de los 0,70 m, y sobre ellos se desarrolla actualmente vegetación arbórea. Este proceso de adosamiento más o menos regular de albardones dio origen a una amplia superficie frente a la desembocadura del río Queguay, en la margen izquierda; un brazo del río Uruguay la atravesó posteriormente, formándose la actual isla del Queguay, isla San Francisco e islas aledañas. El río Queguay Grande (Uruguay) formó por migración lateral de su tramo final

una amplia terraza de 3 km de ancho, que se une en forma transicional con el área de sedimentación del río Uruguay.

3.3.2. Segundo subtramo o subtramo medio

Es también denominado por Iriondo & Kröhling (2008) como Delta Holoceno del Río Uruguay. Los autores definen este lugar como el inicio del tramo inferior del río Uruguay, considerando sus características geológicas y geomorfológicas. Este subtramo comienza en la latitud de Concepción del Uruguay hasta aguas abajo de Fray Bentos. Dicho delta holoceno tiene un patrón distributivo en los 20 km finales; aguas arriba presenta una morfología anastomosada. El sistema de canales tiene una dinámica intensa, con importantes variaciones en las profundidades. En el sector superior hay una llanura de bancos actuales que crece por adosamiento de nuevas acumulaciones de arena en la punta de aguas arriba de islas preexistentes. Hacia aguas abajo se exhibe un comportamiento geomorfológico de llanura de mareas.

En la parte inferior del delta, el patrón distributivo indica que el río ha invadido una llanura de mareas, atravesándola con varios brazos, debido al evidente aumento de su caudal. Las islas están formadas por un albardón perimetral y una depresión central compuesta por los depósitos de marea, con la parte de aguas abajo sin albardón, o sea, abierta a la entrada de agua. La cota de la depresión central es de alrededor de 1 msnm y está ocupada por un pantano.

El delta holoceno del río Uruguay llega hasta la gran curva del río, ubicada frente a Gualeguaychú-Fray Bentos, donde el patrón distributivo forma diez brazos. Se trata de un frente en retroceso; los brazos tienden a ensancharse, erosionando lateralmente las islas formadas durante el período de acumulación de la llanura de mareas. No hay progradación actual en el sector inferior del delta. Inmediatamente aguas abajo el río corre de este a oeste en un trecho de 20 km. Se ubica allí un grupo de islas pequeñas y más espaciadas, que representan un estadio más avanzado de destrucción (Iriondo & Kröhling, 2008).

3.3.3. Tercer subtramo o Tramo final

El tercer y último subtramo se denomina, según Iriondo & Kröhling (2008), Tramo final del río Uruguay. Se extiende desde el km 85 hasta la desembocadura y constituye una amplia depresión tectónica de 85 km de longitud y entre 5 y 12 km de ancho. No se trata de un cauce fluvial propiamente dicho, sino de una depresión inundada que contiene al

cañón labrado en su lecho, reconocido por Iriondo & Kröhling (2008) en varios segmentos del río. Este subtramo presenta una dinámica fuertemente influenciada por los niveles del Río de la Plata, especialmente en aguas bajas.

3.4. Caracterización hidroclimática

La cuenca del río Uruguay, por su ubicación latitudinal en Sudamérica, recibe fuerte insolación y está sujeta a masas de aire húmedo provenientes de altas latitudes del Atlántico Sur (Larenze, 1998). Casi toda la cuenca se clasifica como Clima Subtropical Húmedo (*Cfa*) según Köppen-Geiger, aunque la cuenca alta presenta Clima Subtropical Templado (*Cfb*) (Beck et al., 2018).

El régimen de precipitaciones es diferente al de los otros grandes ríos de la cuenca del Plata ya que existen dos zonas distintivas (Di Persia & Neiff, 1986), con una división aproximada en el paralelo que pasa por Paso de los Libres. En la cuenca alta, se registran valores mayores, decreciendo hacia el Océano Atlántico (Díaz, et al., 1998). La distribución de las precipitaciones medias es más uniforme hacia el sur, con mínimas en la región sudeste y sudoeste de la cuenca (Figura 3.4).

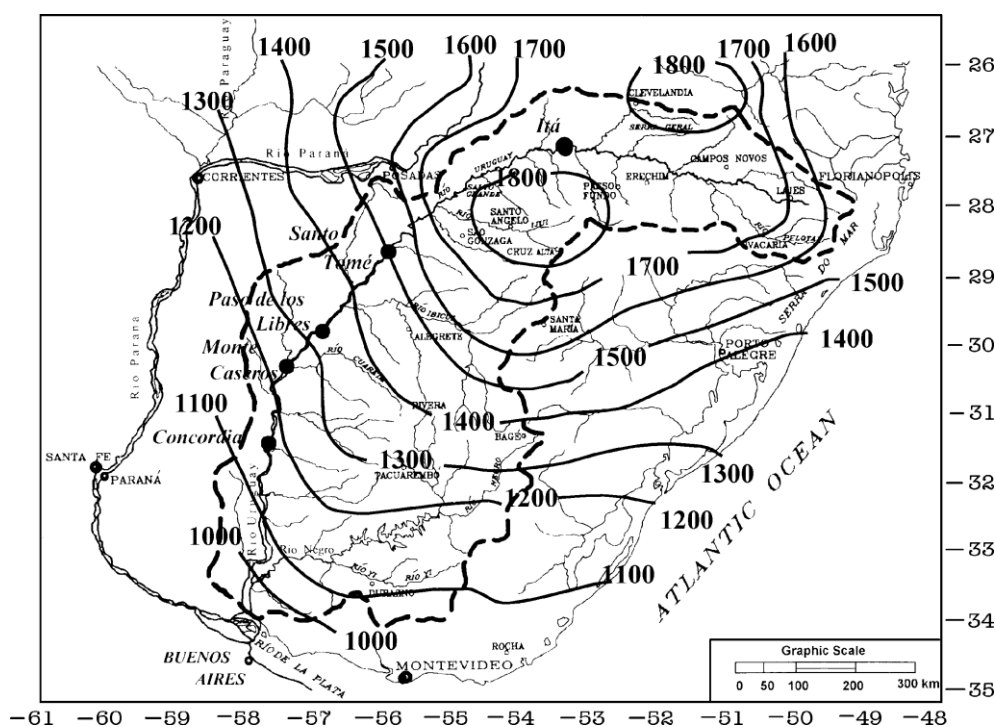


Figura 3.4.- Distribución de las precipitaciones medias anuales (serie 1901-1995) en la cuenca del río Uruguay. Tomado de Krepper et al. (2003).

El ciclo anual tiene una considerable variabilidad espacial y temporal (García & Vargas, 1998; Krepper, et al., 2003; Iriondo & Kröhling, 2008). Durante el invierno, en la cuenca

alta, las precipitaciones se asocian a la circulación general atmosférica de gran escala, con ciclogénesis en la primavera y otoño, y precipitaciones convectivas en verano (García & Vargas, 1998).

En noviembre-diciembre existe una leve asociación de los eventos frontales con los eventos del fenómeno El Niño (ENSO-*El Niño Southern Oscillation*) tal y como reporta Aceituno (1988). Krepper et al. (2003) determinaron que la cuenca situada aguas arriba de Santo Tomé (Corrientes), si bien tiene un área del 33% del total que aporta a la represa de Salto Grande, genera el 65% del escurrimiento que allí se verifica. En dicho sector existe una asociación directa del fenómeno con las precipitaciones en la cuenca, en un período de retorno de 3,5 y 6 años.

La cuenca tiene una sección transversal relativamente estrecha en comparación a su longitud, lo cual en conjunto con el bajo gradiente longitudinal de la cuenca hace que el retardo de la esorrentía sea relativamente pequeño (Tossini, 1959). Este factor, en conjunto con las características climáticas de la cuenca, hace que el régimen hidrológico sea irregular y que puedan producirse crecidas de diversas magnitudes en cualquier momento del año, particularmente ante eventos de lluvias intensas, rápidas y concentradas en pequeñas áreas (Coronel & Menéndez, 2006).

En términos medios, el régimen hidrológico puede ser caracterizado por un módulo de alrededor de 5.522 m³/s en el ingreso a la represa de Salto Grande (Comisión Técnica Mixta de Salto Grande, 2022), aguas bajas en verano y caudales altos en invierno, junto con un amplio rango de extremos históricos que van desde <100 hasta 35.000 m³/s (Colombo, et al., 2014). Si se analiza la serie completa disponible en la Estación Paso de los Libres se observa que el pico de caudales ocurre en octubre (Figura 3.5) y no en la temporada estival como los ríos Paraná e Iguazú (Pasquini & Depetris, 2007).

Jaime & Menéndez (2002) señalan en términos históricos (serie de datos 1931-2001) que la estacionalidad del río Uruguay es menos evidente que en el Paraná. Pero que puede hablarse de dos picos máximos, con el segundo siempre significativo y fijo en octubre y el primero, de relativamente poca envergadura durante el ciclo 44-70, produciéndose entre mayo y julio. El mínimo es único y se da en enero.

Aguas abajo de la represa de Salto Grande, el régimen se ve controlado por el modo de operación energética (Comisión Técnica Mixta de Salto Grande, 2006) hasta el caudal de modulación definido (12.000 m³/s), con máximos diarios del orden de la erogación

máxima nominal de las turbinas ($8.680 \text{ m}^3/\text{s}$). Superado este valor, se comienza el modo de Operación en Crecida, cuya finalidad es mitigar los efectos de la crecida del río. No obstante, Colombo et al. (2014) sugieren que, debido al tamaño relativo del embalse, este efecto es acotado. En la Figura 3.6 se observa claramente esta modulación, por sobre la cual emergen las crecidas como eventos o pulsos distinguibles.

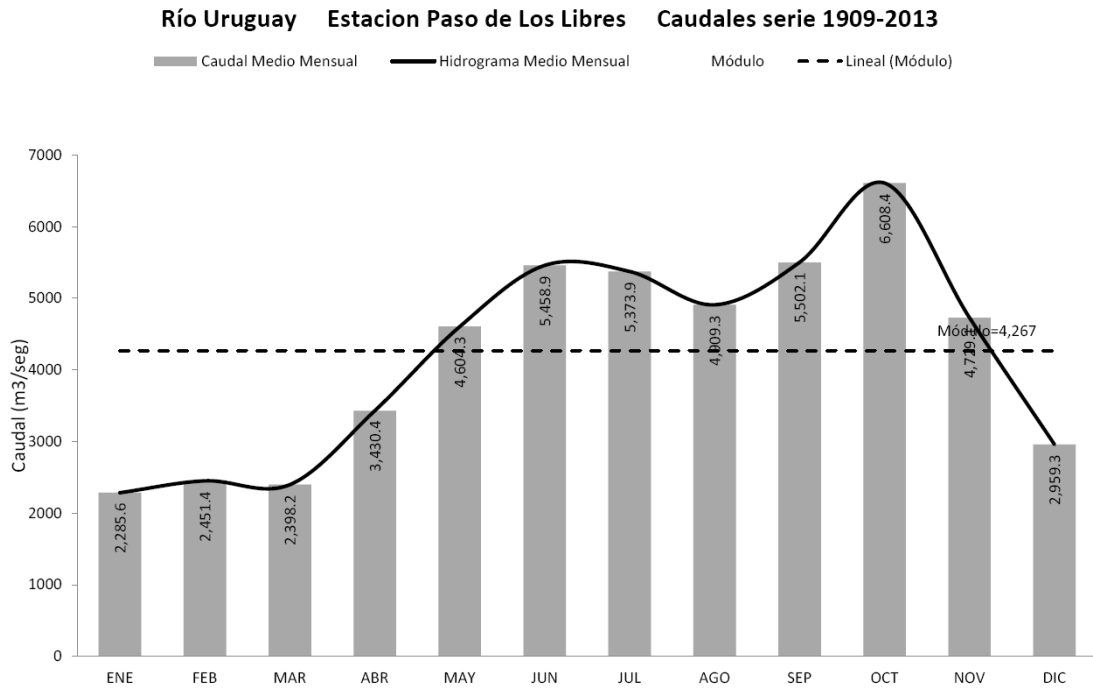


Figura 3.5.- Caudales medios mensuales: estación Paso de los libres, serie 1909-2013. Tomado de (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación Argentina, 2014).

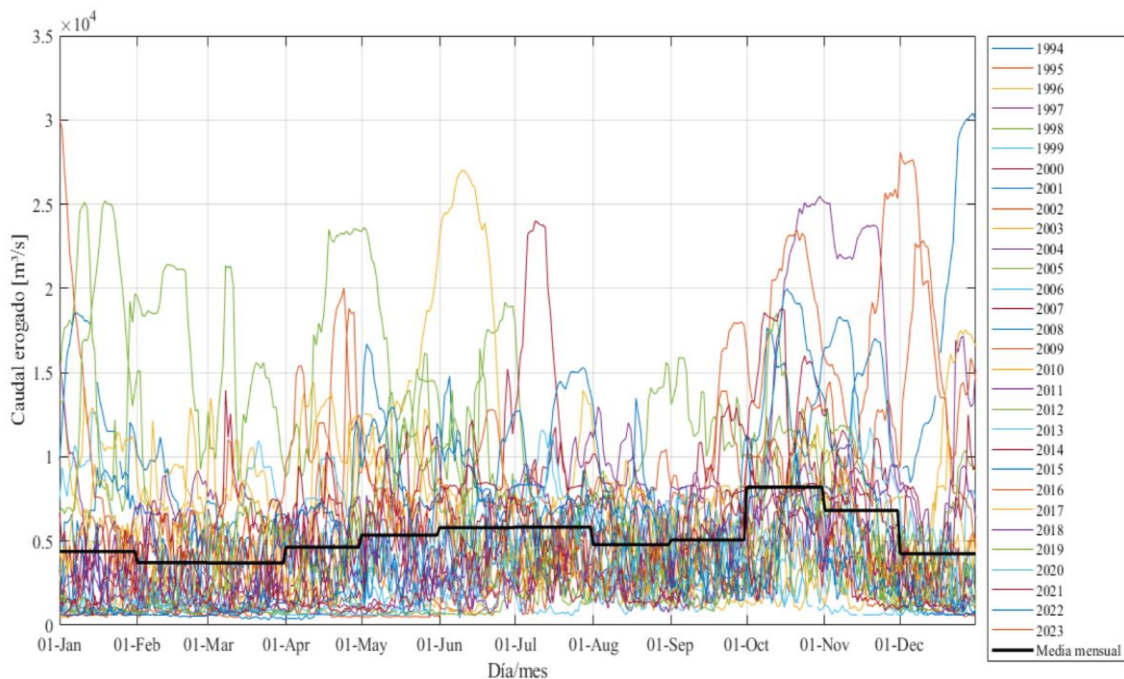


Figura 3.6.- Caudales erogados por la represa de Salto Grande como función del día calendario.

3.5. Caracterización sedimentológica

3.5.1. Márgenes

El cuerpo sedimentario de la terraza alta del río Uruguay, sobre la margen argentina entre Concordia y Concepción del Uruguay (Entre Ríos), está formado por la Formación Geológica El Palmar, formalmente definida por Iriondo (1980). Esta formación se correlaciona estratigráficamente con parte de la Formación Salto aflorante en barrancas sobre la margen uruguaya hacia el Norte del área de estudio (Iriondo & Kröhling, 2008; Kröhling, 2009).

La Fm. El Palmar, con espesores típicos de 10 a 15 m, está dominada por estratos arenosos con lentes de gravas intercaladas, de color rojo a marrón amarillento. La unidad constituye secuencias características de un gran sistema deposicional fluvial, principalmente representadas por el canal fluvial del Uruguay, con barras longitudinales formadas por gravas arenosas a arenas gravosas, con depósitos asociados de inundación y de canales abandonados (Iriondo & Kröhling, 2008; Patterer, et al., 2020).

En la terraza baja del río Uruguay en el área mencionada prevalecen sedimentos limo-arenosos a arenas arcillosas de la Formación Concordia, en general muy groseramente estratificados y friables, cuyo color característico es marrón rojizo a marrón grisáceo según la latitud. Estos corresponden a depósitos en facies de inundación con un paleosuelo intercalado y estratos cineríticos en la sección inferior de la unidad (Iriondo & Kröhling, 2008).

En esta zona se observan también afloramientos de areniscas de la Formación Puerto Yeruá (Guichón) (Goso Aguilar, et al., 1999; Aceñolaza, 2007), limolitas de la Formación Fray Bentos y afloramientos basálticos de la Formación Serra Geral, particularmente en las cercanías de Concordia (Aceñolaza, 2007; Iriondo & Kröhling, 2008).

Hacia aguas abajo, el segmento inferior del río Uruguay está determinado por dos características ambientales importantes: la principal es la influencia directa del mar, que penetró profundamente en el valle durante la ingresión del Holoceno Medio; la otra es la gran abundancia de arena y sedimentos finos, que generan gran cantidad de bancos e islas (Iriondo & Kröhling, 2008).

En la margen uruguaya, las formaciones geológicas presentes son diversas, y los materiales en las márgenes fluviales están formados por depósitos recientes de arenas, limos y turba, del Cuaternario y Holoceno (Preciozzi Porta et al., 1985), destacándose

para el Cuaternario a las Fm. El Palmar/Salto y Fm. Concordia, en el noroeste de Uruguay (Iriando & Kröhling, 2008). Las formaciones subyacentes a los depósitos cuaternarios son: Fray Bentos, Camacho, y en ciertas partes la Fm. Villa Soriano (Preciozzi Porta, et al., 1985).

Sobre la margen argentina de este tramo inferior predomina la dinámica fluvial, y los depósitos recientes de limos y arcillas. El ancho excesivo del cuerpo de agua que caracteriza este tramo está dado por procesos erosivos y deposiciones laterales que se deben a la erosión lateral de los depósitos holocenos litorales sueltos por la acción de los vientos dominantes y las tormentas del sudeste (Iriando & Kröhling, 2008).

3.5.2. Lecho

Entre 1997 y 2009, en el marco del Levantamiento Integral del Río Uruguay, la CARU financió el desarrollo de 4 campañas de relevamiento de muestras de fondo del río Uruguay. Las mismas fueron realizadas por el Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada (ROU) y el Servicio de Hidrografía Naval (RA). En el tramo de estudio se tomaron 825 muestras, tratando de respetar el espaciamiento de 1 km sobre la longitudinal, y donde fuera posible, en los veriles del canal de navegación establecido. En la Figura 3.7 se presenta la división entre los tipos de datos relevados entre cualitativos y cuantitativos. Los datos cuantitativos comprenden las curvas granulométricas en algunos casos, el diámetro medio (d_{50}) y el índice geométrico de Trask ($S_o = \sqrt{d_{75}/d_{25}}$, definido por Friedman, 1962), en otros (los subíndices representan el porcentaje de partículas que son más pequeñas). Los resultados cualitativos de los relevamientos establecen la textura del fondo en función de los porcentajes de arcilla, limo, arena y grava presentes. En algunos casos se cuenta con los porcentajes que dieron lugar a la clasificación textural. En Capítulo 7 se presentan los datos y análisis de dichas muestras.

Durante el período 2018-2021, en el marco del “Proyecto de Dragado y Balizamiento del Río Uruguay desde el km 0 al km 187,1, incluyendo el Canal de Acceso al Puerto de Concepción del Uruguay y los Canales entre el km 187,1 y el km 206,8 Puerto de Paysandú” (EIH-INCOIV, 2012), la Comisión Administradora del Río Uruguay realizó, mediante la inspección de la obra, un total de 98 muestras de características texturales del fondo. Los datos obtenidos en estos relevamientos no presentan variaciones significativas con la información presentada hasta al momento. El mayor aporte para el presente se encuentra entre los kilómetros 86 y 112, a la altura del eje Gualeguaychú-Fray Bentos,

entre los pasos de navegación Barrizal y Ñandubaysal. Allí se observaron arenas hacia el sur, y una mayor proporción de limos hacia el norte, siendo los fondos en el Paso Ñandubaysal (km 112 de la vía navegable) un limo de alta compresibilidad. Se destaca que los limos aparecen hacia aguas arriba de la curva que experimenta el río en el kilómetro 94 (Figura 3.8).

Si se tiene en cuenta que Iriondo & Kröhling (2008) refieren que el afluente más importante sobre la margen derecha es el río Gualeguaychú, y que su cuenca abarca un área dominada por formaciones predominantemente palustres y fluviales finas, y sedimentos litorales de la ingresión marina holocena (dominada por una llanura de mareas), la presencia de sedimentos finos (limos) en el fondo del RU en ese tramo próximo a la desembocadura de dicho afluente es altamente probable.

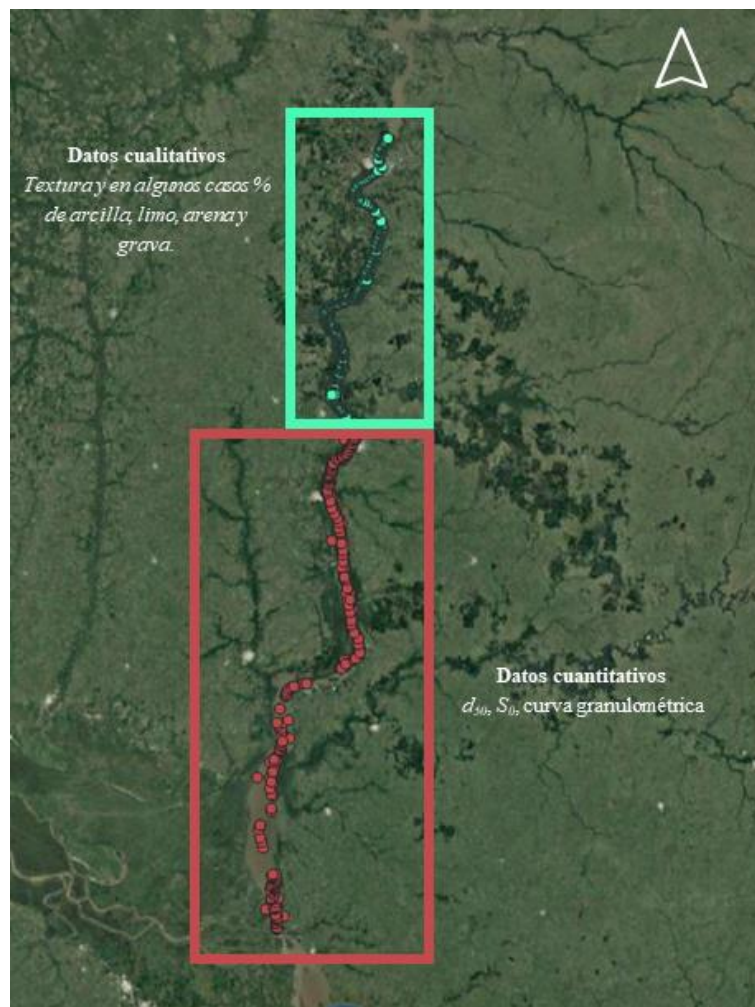


Figura 3.7.- División entre tipos de datos relevados en el marco del Levantamiento Integral del Río Uruguay (relevados entre 1997 y 2009).

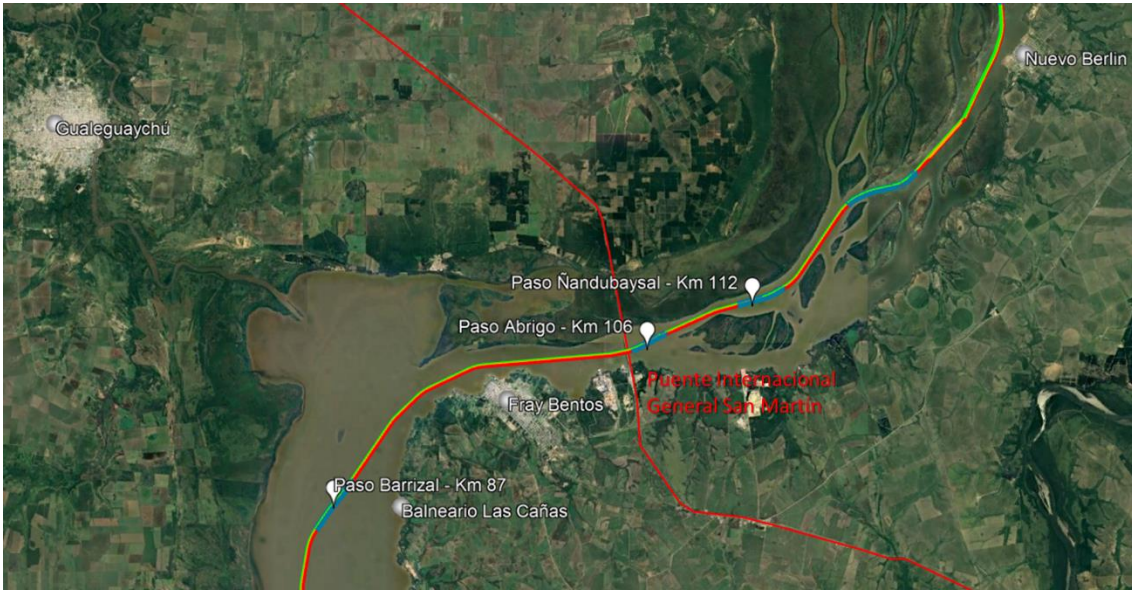


Figura 3.8.- Ubicación de los pasos de navegación Barrizal, Abrigo y Ñandubaysal.

Capítulo 4

Antecedentes sobre el transporte de sedimentos en el área de estudio

4.1. Introducción

Los registros de datos de transporte de sedimentos son escasos en la mayoría de los ríos del mundo, por la dificultad de su medición y altos costos relativos. Particularmente, en el río Uruguay son escasos para el desarrollo de cualquier proyecto de ingeniería que involucre esta variable. Incluso con la construcción de la represa de Salto Grande, esta situación no fue soslayada. Diversos estudios se han realizado para evaluar la colmatación del embalse desde su creación a la fecha (Acres-Hidrosud, 1971; Comisión Técnica Mixta de Salto Grande, 1995; Prendes, et al., 2005; Mangini, et al., 2007), concluyendo que la obra es impermeable para las arenas y limos (partículas mayores a 20 micrones). Pese a esta premisa, poco se hizo hacia aguas abajo ante los insistentes reclamos de los gobiernos municipales por erosión en las márgenes.

No fue hasta el 2018, con el inicio de la obra de dragado del canal de navegación del río Uruguay entre los km 0 y 206,8, que se evidenció la necesidad de la información sobre transporte de sedimentos para poder discutir, sobre una base científica, los contratos de obra de mantenimiento de la vía navegable.

Por otra parte, los conceptos actuales de gestión integrada de cuencas vinculan directamente la gestión del uso de los recursos hídricos con una evaluación continua de la calidad ambiental. En este sentido, en los últimos años se ha avanzado en el desarrollo de distintos planes de monitoreo en el ámbito de la Comisión Administradora del Río Uruguay y la Comisión Técnica Mixta de Salto Grande. No obstante, en ambos

organismos se ha puesto el foco en la detección de contaminantes de distinto tipo, y el transporte de sedimentos ha sido ignorado bajo la suposición de poca importancia relativa. El objetivo de este capítulo es contextualizar, presentar y analizar la escasa información disponible sobre el río Uruguay, a los efectos de servir como punto de partida para evaluar la contribución de la presente tesis.

4.2. Sistema Nacional de Información Hídrica

En el área de estudio definida, la base de datos del Sistema Nacional de Información Hídrica de la Subsecretaría de Infraestructura y Política Hídrica cuenta con información histórica de transporte de sedimentos, con las limitaciones ya mencionadas, en el kilómetro 185 de la vía navegable, sección Concepción del Uruguay (Subsecretaría de Infraestructura y Política Hídrica de Argentina, 2022). Particularmente, la serie de datos disponibles cuenta con 192 aforos sólidos que van desde 1992 hasta la actualidad. Allí se distinguen tres variables de interés, el caudal líquido (medido en m^3/s), el caudal sólido grueso (kg/s) y el caudal sólido fino (kg/s), asociadas a la fecha y a la altura limnimétrica en el puerto de Concepción del Uruguay. La falta de una monografía de las mediciones no permite saber con certeza documental cuál es la división entre fracciones, no obstante, por comunicaciones informales con personal que realizó algunas de las mediciones analizadas se supo que el valor de corte entre ambas fracciones es 62 micrones, lo cual tiene cierta razonabilidad teniendo en cuenta los criterios disponibles para la separación de carga de material de fondo (G_s) y lavado (G_w). Asimismo, se pudo saber que el caudal sólido grueso se mide por un aforo sólido que consiste en 10 verticales, con una muestra en cada una de ellas.

A los efectos de presentar la información disponible de una manera compacta, se muestra en la Figura 4.1 la serie de puntos de caudal líquido graficada como función de la altura limnimétrica. De la misma manera, se exhiben en la Figura 4.2 y la Figura 4.3 las correspondencias entre el caudal líquido y caudal sólido grueso, así como también caudal líquido y caudal sólido fino, respectivamente.

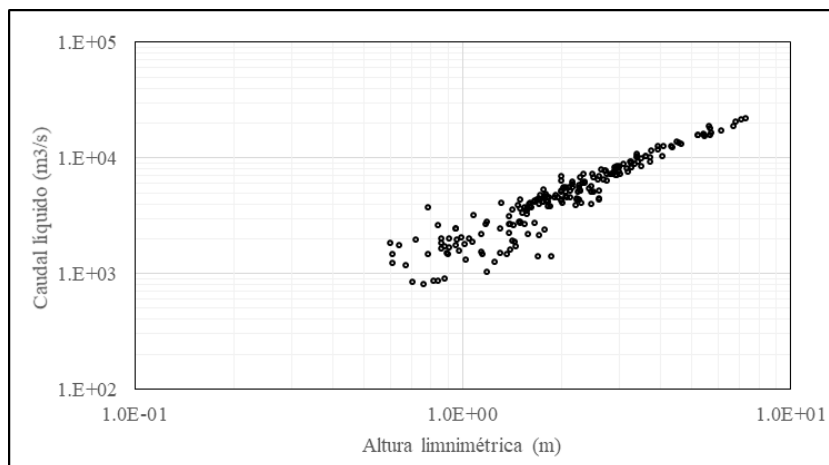


Figura 4.1.- Altura limnimétrica – caudal líquido. Datos del Sistema Nacional de Información Hídrica - Sección Concepción del Uruguay (Subsecretaría de Infraestructura y Política Hídrica de Argentina, 2022).

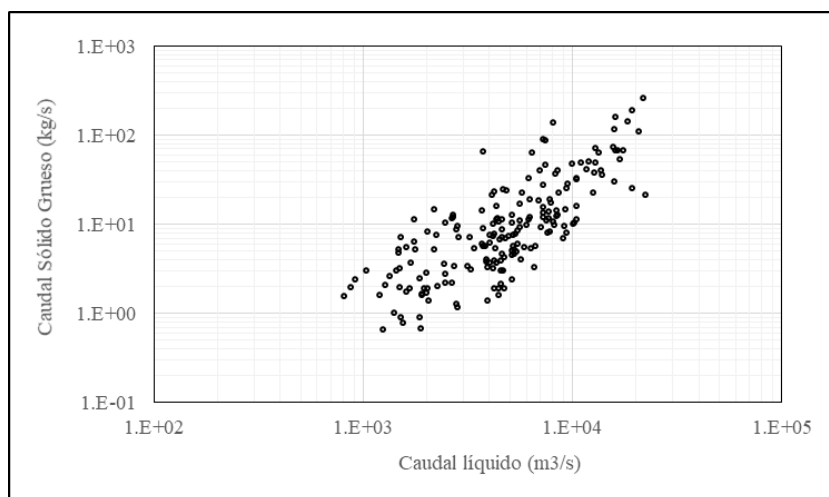


Figura 4.2.- Caudal líquido – Caudal sólido grueso. Datos del Sistema Nacional de Información Hídrica - Sección Concepción del Uruguay (Subsecretaría de Infraestructura y Política Hídrica de Argentina, 2022).

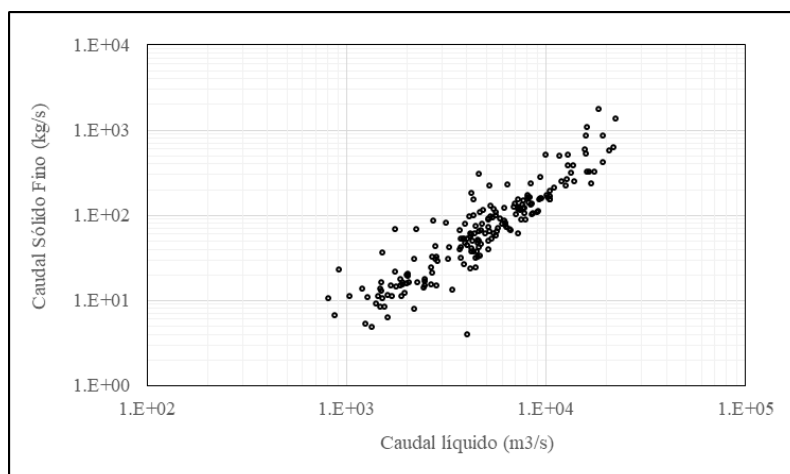


Figura 4.3.- Caudal líquido – Caudal sólido fino. Datos del Sistema Nacional de Información Hídrica - Sección Concepción del Uruguay (Subsecretaría de Infraestructura y Política Hídrica de Argentina, 2022).

4.3. Publicaciones del Comité Científico de la CARU

También en el área de estudio, durante el año 2018 la Comisión Administradora del Río Uruguay comenzó un Plan de Monitoreo Integral del Río Uruguay (MIRU) ejecutado por el Comité Científico que depende de esta. En dicho monitoreo, entre otras variables de calidad de aguas, se midió el parámetro sólidos suspendidos totales (División Laboratorio Ambiental DINAMA, 2017). Se tomaron puntos en 7 secciones transversales (Figura 4.4).

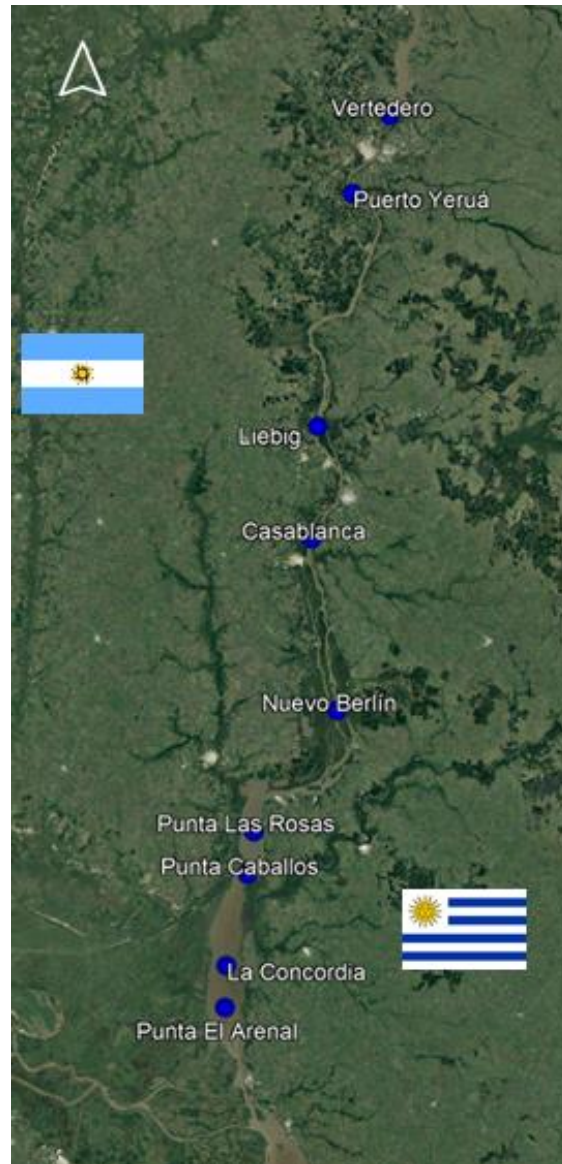


Figura 4.4.- Secciones de aforo MIRU.

En cada una de ellas se tomaron muestras a 0,50 m de profundidad, en puntos ubicados sobre margen izquierda (MI), margen derecha (MD) y canal de navegación (C). La excepción a la regla se da en Nuevo Berlín, ya que, al estar el río bifurcado en la sección transversal, las muestras CI y CD representan el canal sobre el brazo izquierdo y derecho respectivamente. En la Tabla 4.1 se muestran los datos del relevamiento.

Este parámetro, si bien difiere de la concentración de sedimentos finos, obra como una cota superior del mismo ya que contiene los sólidos volátiles o incinerables, generalmente constituidos por materia orgánica (División Laboratorio Ambiental DINAMA, 2017). Para las mismas campañas, el Comité Científico de la Comisión Administradora del Río Uruguay (2019) reportó valores de sólidos suspendidos volátiles, en la mitad de los casos por debajo del límite de detección y el resto por debajo del límite de cuantificación. A pesar de esto, el valor medio de los datos cuantificados es 15,91 mg/L, dato que es consistente con el correspondiente al reportado por la Subsecretaría de Infraestructura y Política Hídrica de Argentina (2022).

Tabla 4.1.- Datos de sólidos suspendidos totales, MIRU 2018.

Nombre	Identificación	Km vía navegable	jun-18	ago-18	sep-18	oct-18	nov-18
Vertedero Salto Grande	VR-C	349	<10	<3	15	<3	11
	VR-MD	349	<10	<10	<10	<10	11
	VR-MI	349	<10	<10	<3	<10	<10
Puerto Yerúa	PY-C	319	<3	14	13	<3	<3
	PY-MD	319	<3	<10	17	12	<10
	PY-MI	319	<3	13	<3	11	<3
Liebig	LI-C	231	<10	<3	15	22	<10
	LI-MD	231	<10	<10	24	18	<10
	LI-MI	231	<10	<3	13	17	<10
Casablanca	CB-C	190	<3	<3	19	<10	<10
	CB-MD	190	<10	<3	22	<3	10
	CB-MI	190	<10	12	33	<10	11
Nuevo Berlín	NB-CD	139	<10	<10	25	<10	<10
	NB-CI	139	<10	<10	26	15	<10
	NB-MD	139	<10	<10	<3	15	11
	NB-MI	139	<10	<10	20	16	<3
Punta Las Rosas	PR-C	83	<10	<10	17	15	<3
	PR-MD	83	<10	<10	<10	11	<3
	PR-MI	83	<10	<10	<10	16	<3
La Concordia	LC-C	43	<10	<10	<3	14	<3
	LC-MD	43	<3	<10	15	11	15
	LC-MI	43	<10	<10	<10	14	<3

4.4. Proyecto de dragado EIH-INCOIV (2012)

Ante la escasez previa de información hidrosedimentológica, el “Proyecto De Dragado Y Balizamiento Del Río Uruguay Desde El km 0 Al km 187,1, Incluyendo El Canal De Acceso Al Puerto De Concepción Del Uruguay Y Los Canales Entre El km 187,1 Y El km 206,8 Puerto De Paysandú” incluyó trabajos tan diversos como el estudio estadístico de los niveles en cada puerto hasta una modelación hidrodinámica a fondo móvil de todo el tramo en cuestión. En este sentido, el “INFORME DE ETAPA 2 - I. ESTUDIOS - TRABAJOS DE CAMPO Y LABORATORIO” abarca los relevamientos batimétricos,

las mediciones de dunas, la composición granulométrica del fondo (sobre el lecho y por cateo en profundidad), muestreos de agua y sedimentos para estudios de calidad, medición de velocidades, medición de sedimentos en suspensión con muestreadores y cálculo de esta variable a partir de los datos relevados con ADCP.

El “INFORME DE ETAPA 2 - I. ESTUDIOS - ESTUDIOS EN MODELOS” reporta sobre la modelación hidrodinámica unidimensional, bidimensional hidrodinámica e hidrosedimentológica, y la aplicación de este último modelo para la estimación de la sedimentación anual y el estudio de plumas de turbidez en el vertido.

Este proyecto de dragado tiene como precedente los “Estudios complementarios del Proyecto: Desarrollo Regional y Mejora de la Navegabilidad del Río Uruguay” (Comisión Técnica Mixta de Salto Grande, 2004). No obstante, toda la información disponible allí fue actualizada y revisada. Por este motivo, este proyecto es el único set de datos válidos en su conjunto para el contraste de esta tesis. A los efectos comparativos, se tabulan a continuación los resultados más destacables (Tabla 4.2, Tabla 4.3, Tabla 4.4 y Tabla 4.5), con la Figura 4.5 como referencia de ubicación.

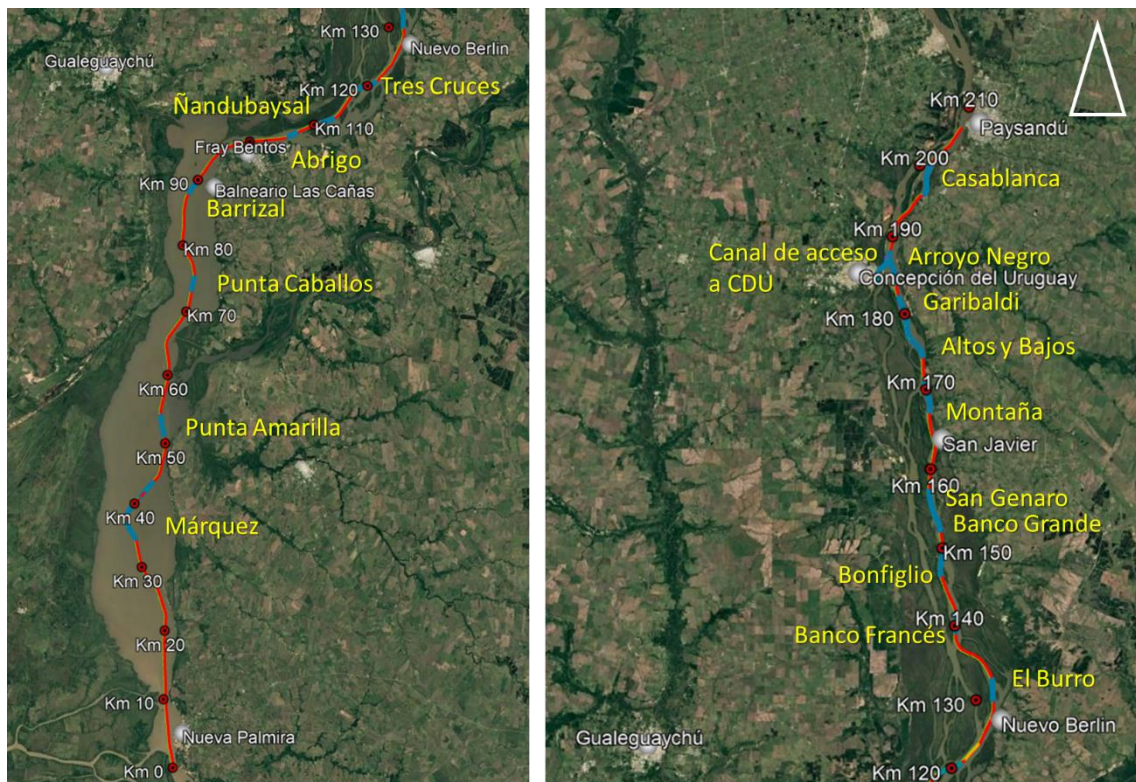


Figura 4.5.- Vía navegable del río Uruguay y pasos de navegación.

Tabla 4.2.- Alturas medias de dunas, editado a partir de EIH-Incociv (2012).

Paso	Kilómetro		Altura media de duna del Paso (m)	
	Desde	Hasta	2003*	2012
<i>Almirón Grande</i>	198,0	202,0	0,50	0,50
Casablanca	194,0	198,0		1,00
<i>Urquiza</i>	194,0	198,0	0,80	0,59
Arroyo Negro	184,0	188,0	1,35	1,31
Garibaldi	179,6	182,0	1,10	0,69
Altos y bajos	175,0	179,6	1,43	0,85
Montaña	167,0	171,0	0,95	1,12
San Genaro	155,0	159,0	1,30	0,69
Banco Grande	152,0	154,0	1,7	1,46
Bonfiglio	147,0	150,0	1,20	0,76
<i>Román</i>	147,0	150,0		0,96
Banco Francés	140,0	142,0	0,80	0,85
<i>San Lorenzo</i>	137,5	138,5	0,80	0,54
<i>Filomena Inferior</i>	125,5	127,1	0,80	0,91
<i>Filomena Medio</i>	129,0	132,6	1,00	0,96
<i>Filomena Superior</i>	133,0	134,6	0,50	0,44
El Burro	129,5	131,2	0,60	0,59
Tres Cruces	119,0	120,4	0,70	0,83
Ñandubaysal	111,0	113,0	0,40	0,70
<i>Zapatero Inferior</i>			0,70	0,59
<i>Zapatero Superior</i>	112,0	115,0	0,70	0,79
Abrigo	105,0	107,0	1,00	0,50

*Esta columna de datos corresponde a las mediciones efectuadas en el contexto del estudio de (Comisión Técnica Mixta de Salto Grande, 2004). Los datos en cursiva corresponden a pasos de navegación en canales alternativos a la vía navegable actual.

Tabla 4.3.- Concentración promedio de Finos y Arenas transportados en suspensión, agosto de 2012. Editado a partir de EIH-Incociv (2012).

Muestra	Concentración en mg/L	
	Finos	Arenas
Casablanca	7,0	Vestigios
<i>Filomena Medio</i>	14,8	<i>Vestigios</i>
Altos y Bajos	12,1	2,8
Bonfiglio	31,7	2,1
Arroyo Negro	7,7	0,3

*Los datos en cursiva corresponden a pasos de navegación en canales alternativos a la vía navegable actual.

Tabla 4.4.- Estimación del transporte de arenas en suspensión con ADCP. Editado a partir de EIH-Incociv (2012).

Paso	G_{ss} medido	G_{ss} estimado
	(kg/s)	con ADCP (kg/s)
Casablanca	0,73	1,6
Urquiza	0,33	0,73
Arroyo Negro	1,82	3,2
Altos y Bajos	1,97	3,6
<i>Román</i>	12,95	21,6
Bonfiglio	20,80	31,7
El Burro	3,32	5,7
<i>Filomena</i>	6,23	9,63

*Los datos en cursiva corresponden a pasos de navegación en canales alternativos a la vía navegable actual.

Tabla 4.5.- Características hidráulicas y sedimentológicas. Q es el caudal líquido, G_{ss} es el caudal sólido del material grueso (arenas) en suspensión, M_{s2} y V son las concentración y velocidades medias en la sección. Editado a partir de EIH-Incociv (2012).

Paso	Q (m³/s)	G_{ss} (kg/s)	M_{s2} media (mg/L)	V media (m/s)
Casablanca	1.145,8	1,6	1,40	0,55
Urquiza	676,9	0,73	1,08	0,49
Arroyo Negro	2.218,9	3,2	1,44	0,41
Altos y Bajos	2.159,1	3,6	1,67	0,38
<i>Roman</i>	<i>2.192,9</i>	<i>21,6</i>	<i>9,85</i>	<i>0,54</i>
Bonfiglio	2.495,0	31,7	12,71	0,64
El Burro	1.139,5	5,7	5,00	0,37
<i>Filomena</i>	<i>1.360,2</i>	<i>9,62</i>	<i>7,07</i>	<i>0,46</i>

*Los datos en cursiva corresponden a pasos de navegación en canales alternativos a la vía navegable actual.

PARTE II – CUANTIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE VARIABLES SEDIMENTOLÓGICAS

Capítulo 5

Trabajos de campo: materiales y métodos

5.1. Introducción

La Comisión Administradora del Río Uruguay (CARU), en función de sus facultades atribuidas por los Estados Parte que la componen (Argentina y Uruguay), lleva adelante diferentes monitoreos de cantidad y calidad de agua. El organismo internacional cuenta con una Secretaría Técnica (SET), que a su vez dispone de tres departamentos técnicos a saber: Ambiente, Hidrología y Navegación, Navegabilidad y Obras. Asimismo, a partir del fallo del Tribunal Arbitral Internacional de La Haya por el conflicto surgido de la instalación de la productora de pasta celulosa UPM (ex Botnia), se creó un órgano subsidiario denominado Comité Científico (CC), encargado de un monitoreo integral del río.

Entre la SET y el CC se llevan adelante diversos planes de monitoreo y actividades donde se realizan mediciones de diferente índole.

El programa más comprehensivo que se ejecuta en la actualidad es denominado Programa de Monitoreo Integral del Río Uruguay, que es coordinado por el Comité Científico (CC), y donde también colabora la SET. Este programa contempla el monitoreo de cantidad de agua con aforos y calidad con variables que van desde las básicas: pH, temperatura y conductividad in situ, a componentes químicos complejos como Sustancias Activas de Azul de Metileno, AOX, Dioxinas y Furanos, contaminantes emergentes como fármacos o glifosato en sus diferentes indicadores, o muestreos novedosos como microplásticos (Comité Científico CARU, 2019). Todo esto último se refiere a muestreos en la matriz agua, aunque el programa también incluyó, en el último tiempo, la determinación de contaminantes en músculos de peces, bivalvos y sedimentos de fondo.

En relación al transporte de sedimentos se puede mencionar que, desde antes del comienzo del dragado de apertura del río en el año 2014, se comenzaron a realizar batimetrías para el conocimiento y control del fondo en el canal de navegación. La continuidad de los relevamientos en el tiempo ha permitido construir una base de datos del lecho que no tiene precedentes en la zona. Esta tarea normalmente es ejecutada por el Departamento de Navegación, Navegabilidad y Obras, aunque en sus inicios el Departamento de Hidrología tuvo una participación del 100%. Los proyectos creados en la plataforma de medición Hypack (HYPACK / Xylem Inc., 2021), así como también la configuración de equipos y esquemas de medición y almacenamiento de la información fueron creados por el autor de la presente tesis en su carácter de jefe del Departamento de Hidrología y colaborador en la inspección del dragado.

Durante el año 2017, a partir de una beca CARU, se inició un Proyecto de medición del transporte de sedimentos del río Uruguay coordinado por el Departamento de Hidrología. Por cuestiones operativas, presupuestarias y de pandemia, su implementación siempre fue dificultosa. A pesar de ello, se pudieron realizar algunas mediciones prepandemia. En estas campañas colaboró personal de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH), entre ellos el director de esta tesis, Dr. Ricardo Szupiany y miembros de su grupo de trabajo (Dra. Cecilia López Weibel, Dr. Francisco Latosinski y Dr. Lucas Domínguez Rúbén). Además de su participación, los profesionales de la FICH facilitaron un equipo de medición de sedimentos en suspensión, y un ADCP que será descrito en este capítulo. Asimismo, en la FICH se realizaron los análisis de laboratorio de datos sedimentológicos de muestras recolectadas.

Con excepción de los aportes de personal y equipos de la FICH mencionados, todos los equipamientos utilizados y los costos asociados a estos monitoreos fueron y son cubiertos por la Comisión Administradora del Río Uruguay. A continuación, se presenta una descripción de dichos equipos y metodologías de medición empleadas, las cuales comprenden aquellas utilizadas para el logro de los objetivos de este estudio y con participación del autor de la presente tesis.

La presentación de los equipos, metodologías y resultados directos de estas mediciones, así como también de los procedimientos llevados adelante, se constituye en el objetivo del presente capítulo.

5.2. Instrumental de campo utilizado

5.2.1. Embarcaciones menores

La CARU cuenta con 3 embarcaciones tipo tracker para diferentes tipos de tareas, que fueron utilizadas para los trabajos de campo aquí reportados. Dos de ellas son de 6,00 m de eslora por 2,00 m de manga y 0,60 de puntal, y cuentan con sendos motores de 60 HP de potencia. Éstas se denominan Río de los Pájaros, matrícula CLON0448 (Figura 5.1) y Río de los Caracoles, matrícula CLON0465 (Figura 5.2).

La tercera embarcación, denominada Aníbal Sampayo (REY069997), tiene 6,40 m, 1,89 m y 0,81 m de eslora, manga y puntal respectivamente, y cuenta con un motor de 75 HP (Figura 5.3).

Las tres embarcaciones resultan versátiles para el botado y varado, por lo cual se ocupan en una sección transversal, y luego son desplazadas por tierra en los monitoreos habituales.



Figura 5.1.- Embarcación Río de los Pájaros.



Figura 5.2.- Embarcación Río de los Caracoles.



Figura 5.3.- Embarcación Aníbal Sampayo.

5.2.2. *Embarcación hidrográfica*

En el año 2014, con el comienzo inminente de las tareas de dragado, la CARU decidió adquirir una embarcación tipo yate-motor, y equiparla para tareas hidrográficas. Esta embarcación, denominada Ibirapitá, matrícula REY 030222 (Figura 5.4), tiene 10,54 m de eslora, 3,94 m de manga y 2,13 m de puntal, con dos motores Cummins de 320 HP cada uno.

Además del equipo de navegación por defecto de una embarcación de este porte (GPS, ecosonda y radar), se le agregó un transductor de doble frecuencia (33 y 200 kHz) de una ecosonda Knudsen 1612, un receptor GNSS de dos antenas Hemisphere V330, y una unidad de medición inercial (IMU, por sus siglas en inglés) marca InertialLabs, modelo MRU-B. El receptor GNSS incorpora a la línea de datos recibida la corrección Marinestar de FUGRO para la solución de la posición, que permite alcanzar precisiones submétricas en entornos acuáticos. El equipamiento se completa con una computadora, con el Sistema Hypack (HYPACK / Xylem Inc., 2021) que administra los equipos instalados para la navegación, relevamiento y postprocesamiento de los datos adquiridos.



Figura 5.4.- Embarcación Ibirapitá.

5.2.3. Perfiladores de corriente Acústicos Doppler

Los Perfiladores de Corriente Acústicos Doppler (ADCPs, por sus siglas en inglés) son equipos que utilizan el efecto Doppler del sonido en un medio líquido para estimar la velocidad de movimiento de las partículas presentes en dicho medio (Teledyne RD Instruments, 2011). En los últimos 30 años estos equipos han pasado de ser instrumentos experimentales a una de las principales herramientas para los científicos y profesionales de la hidráulica e hidrología que se dedican a la medición de caudales en ambientes naturales (Mueller, et al., 2013).

Si bien este equipo tiene por objetivo la medición de caudal en una sección transversal de un curso fluvial, diferentes investigadores han utilizado la potencialidad de su tecnología con diversas finalidades, desde su explotación para relevamientos batimétricos hasta la estimación de concentración de sedimentos en suspensión.

Los principales proveedores de esta tecnología son las marcas Sontek (Xylem), Teledyne RD Instruments y Nortek, con equipos de diverso desarrollo y finalidades. Para el caso particular de mediciones en grandes ríos, particularmente en América, son utilizados los equipos Sontek y Teledyne.

La Comisión Administradora adquirió el primer equipo M9 de la marca Sontek en 2013. En esta tesis fue también utilizado un equipo Teledyne RD Instruments Río Grande de 1200 kHz de frecuencia, propiedad de la FICH-UNL. Las principales características de estos equipos se mencionan a continuación.

5.2.3.1. ADCP Sontek M9

El equipo M9 de Sontek (SM9) es un ADCP que, como su nombre lo indica, tiene 9 transductores acústicos que operan en tres frecuencias diferentes (Sontek, a Xylem brand, 2022). Este equipo se comercializa como un sistema de medición de caudales denominado RiverSurveyor (Sontek, a Xylem brand, 2022). Este sistema incluye el software de relevamiento homónimo, el SM9, un receptor GNSS y un módulo de comunicaciones y energía (PCM, *power and communications module*).

De los nueve transductores, cinco operan simultáneamente: el central, y los 4 correspondientes a cada frecuencia acústica (1 o 3 MHz). El sistema es capaz de adaptar la frecuencia acústica, así como también el tamaño de la celda de medición en función de las condiciones hidrodinámicas (profundidad y velocidad de la corriente) dentro de una

misma medición. Esto último permite relevar una sección con profundidades que van desde decímetros hasta más de veinte metros.

Los cuatro transductores correspondientes a cada frecuencia se ubican en configuración Janus (Dewey & Stringer, 2007), lo que permite una mejor solución de la velocidad (Mueller, et al., 2013). Esta configuración se denomina así debido al antiguo dios romano, Jano, que tenía dos caras opuestas entre sí.

En esta configuración, cada transductor se ubica centrado en cada cuadrante del círculo que forma la cara instrumental del equipo. Cada par de transductores opuestos forma entre sí un ángulo de 50° , es decir, 25° desde el eje radial del equipo. Los transductores de diferentes frecuencias se ubican rotados 45° sobre el plano de la cara de instrumentos (Figura 5.5).

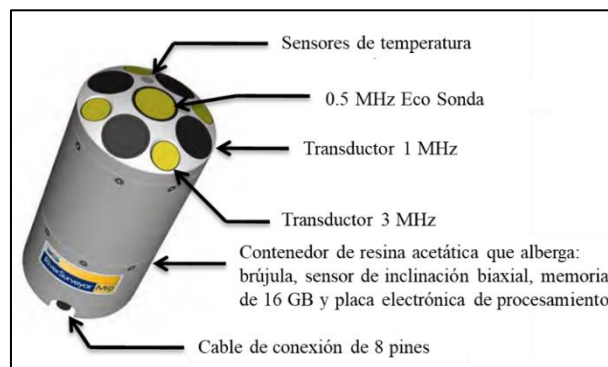


Figura 5.5.- ADCP Sontek M9, adaptado de (Sontek, a Xylem brand, 2022).

En los trabajos de campo para la presente tesis, el equipo se utilizó adosado a una embarcación mediante un brazo de sujeción como se muestra en la Figura 5.6, o bien montado en un dispositivo de flotación (*Hydroboard*) y arrastrado a través de la corriente por una cuerda (Figura 5.7).



Figura 5.6.- ADCP Sontek M9 adosado a una embarcación.



Figura 5.7.- ADCP Sontek M9 en su *Hydroboard*.

5.2.3.2. *Teledyne RD Instruments Río Grande*

El Río Grande es un ADCP de banda ancha que opera con cuatro transductores en configuración Janus (Teledyne RD Instruments, 2007) con una frecuencia de 1200 kHz (Figura 5.8). A los efectos prácticos, se toma la abreviatura RDI como indicadora de este equipo.



Figura 5.8.- ADCP Teledyne RDI Río Grande, tomado de Teledyne RD Instruments (2007).

El sistema Río Grande Workhorse se administra con el software WinRiver II, incluye los transductores, un sensor de temperatura, un sensor de presión y una brújula interna. El sistema se completa con un receptor GPS externo, o bien puede operarse con la opción *Bottom Track*, que permite posicionar el equipo en función de su desplazamiento respecto del fondo (Mueller, et al., 2013).

Los cuatro transductores emiten sus haces con un ángulo de 20° respecto de la vertical. La frecuencia acústica de operación es fija durante las mediciones, mientras que el modo de operación, el tamaño de celda e intervalos de medición pueden ser configurados por el operario. A diferencia del ADCP Sontek M9, estas variables permanecen constantes a lo largo de una sección transversal.

Para las mediciones con este instrumento se utilizó un trimarán, tal como se observa en Figura 5.9.



Figura 5.9.- ADCP Teldeyne RDI Río Grande montado en un trimarán.

5.2.4. Muestreadores de sedimento

Estos equipos, de diversa índole y complejidad fueron introducidos en el capítulo anterior. Aquí se describen los dos equipos utilizados en las campañas llevadas adelante en el marco de la tesis.

5.2.4.1. Muestreador de fondo

Este equipo, denominado cono de arrastre, es por su simplicidad un equipo muy útil para extraer muestras de arena del fondo. Consiste en dos conos de 20 cm de diámetro y 25 cm de altura, ubicados en serie, separados 0,50 m entre sí (Figura 5.10).

Se sujeta con una cadena o cuerda, y se le adiciona un contrapeso en su parte inferior. Se opera arrastrando el cono sobre la superficie del fondo a los efectos de capturar en el recipiente la mayor cantidad posible de sedimentos.

Para las campañas correspondientes a esta tesis se utilizaron dos equipos, uno propiedad de la FICH-UNL y el otro de CARU.

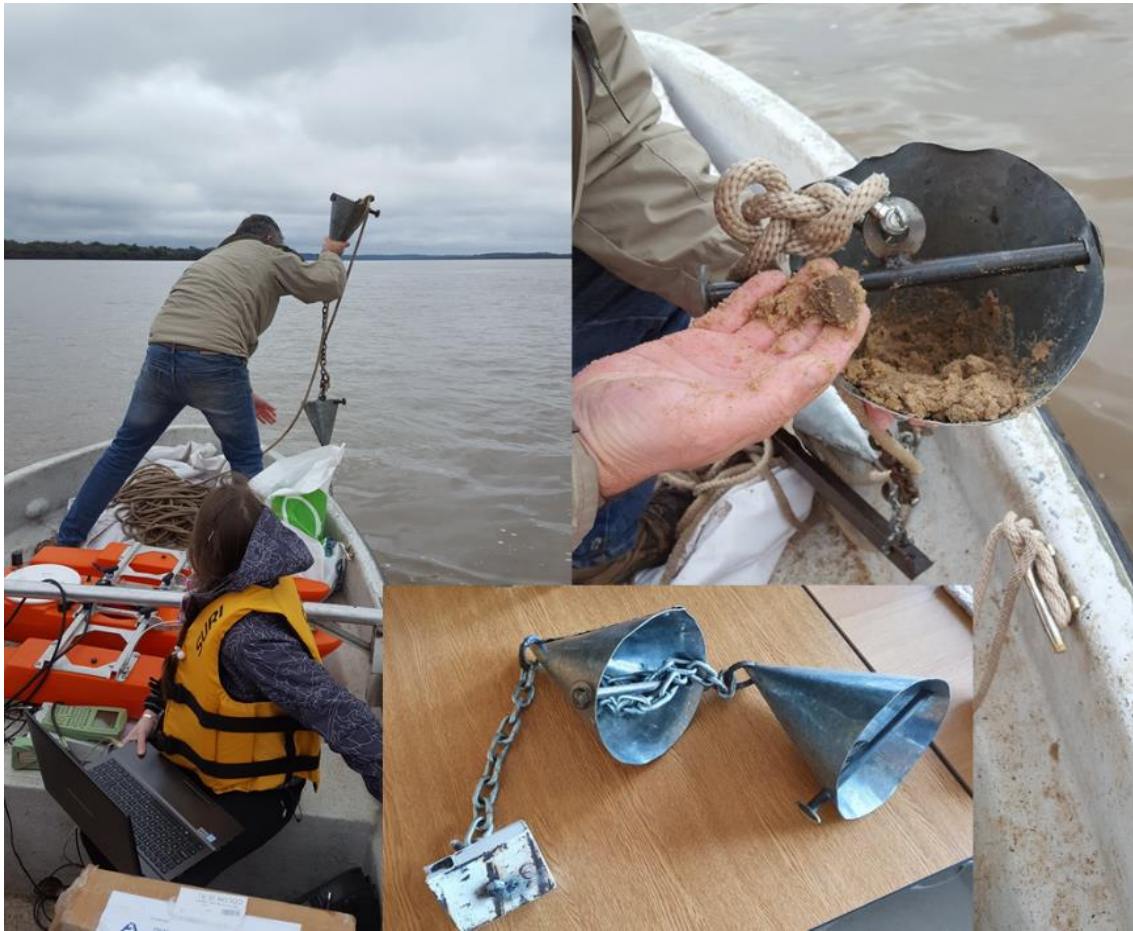


Figura 5.10.- Cono de arrastre.

5.2.4.2. Muestreador de sedimento en suspensión

El US P-61 es un muestreador de sedimentos en suspensión puntual, ya mencionado en el capítulo anterior, que pertenece en este caso a la FICH-UNL. Éste consiste en un cuerpo de fundición de bronce de 50 kg, cuya forma le permite alinearse con la corriente (Figura 5.11). El equipo contiene una botella de aproximadamente 500 mL, que se llena mediante la operación de un relé que abre el obturador de la boquilla a través de un solenoide (van Rijn, 2007). Se accede a la botella mediante la parte frontal del muestreador, que tiene una bisagra que permite su apertura.

Para eliminar cambios bruscos en la presión interna originados por la apertura de la boquilla, la presión interna es balanceada con la presión hidrostática antes de abrir la válvula. Esto se logra mediante una campana de aire en la cavidad del muestreador, que conecta la botella con el flujo exterior (United States Federal Interagency Sedimentation Project, 2021). Luego de abrir la válvula, el aire puede escapar de la botella a través de un tubo que apunta hacia aguas abajo, en la parte frontal del muestreador.



Figura 5.11.- Muestreador de sedimentos en suspensión US P-61.

El tiempo de llenado es variable, dependiendo de la velocidad del flujo (varía entre 30 y 70 segundos para las condiciones hidráulicas del río Uruguay). Se recomienda llenar la botella no más de un 75% para evitar recirculación de agua y acumulación de sedimento.

Este muestreador mantiene la propiedad isocinética en un rango de velocidades compatibles a las observadas en el río Uruguay (Diplas, et al., 2008).

El equipo se completa con una pluma y malacate, que permite el descenso del equipo a la profundidad deseada. El cable del malacate, además de sujeción, provee una conexión eléctrica con el muestreador que permite el accionamiento del relé mencionado.

5.3. Relevamientos realizados

Teniendo en cuenta el objetivo general de cuantificar el transporte de sedimentos en toda el área de estudio, se trabajó con la premisa de sistematizar la mayor cantidad de información disponible en la CARU respecto del transporte de sedimentos y sus variables asociadas, particularmente el campo de velocidades y caudal líquido.

En este apartado se enumeran no solo los trabajos realizados en el marco de esta tesis, sino también aquellos realizados en el marco de las actividades habituales de la Comisión Administradora del Río Uruguay de las cuales se participó.

Estos trabajos incluyen aforos, relevamientos especiales diseñados para el proyecto de cuantificación del transporte de sedimentos y batimetrías.

5.3.1. Secciones de aforo

En este punto se presentan los relevamientos sistemáticos de caudales que se realizan en la CARU. Se organizan teniendo en cuenta el objetivo del relevamiento. En el programa de Monitoreo Integral del Río Uruguay (MIRU), los aforos se caracterizan por estar orientados a complementar la información de calidad de aguas relevada. Las otras secciones, denominadas “especiales” a los efectos del presente, fueron pensadas con criterios de monitoreo hidrológico o para medición del transporte de sedimentos en el tramo de estudio.

5.3.1.1. Secciones MIRU

Como se mencionó al comienzo de este capítulo, el Comité Científico de la CARU lleva adelante un Monitoreo Integral de la calidad del agua del Río Uruguay (MIRU) en el tramo compartido entre Argentina y Uruguay. Este programa incluye 10 secciones transversales que están en el área de estudio de la tesis (Figura 5.12), sobre las cuales se cuenta con la información señalada en la Tabla 5.1.

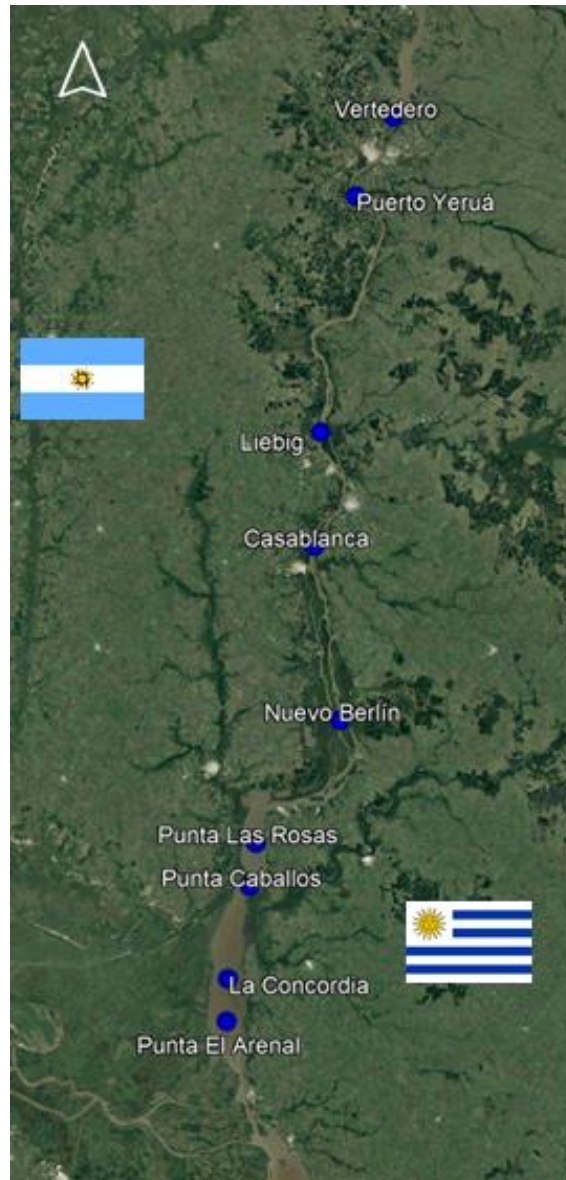


Figura 5.12.- Secciones de aforo MIRU.

Tabla 5.1.- Secciones de aforo y cantidad de mediciones.

Km aprox.	Sección	Cantidad de mediciones* aforos disponibles
25	Punta El Arenal	11
40	La Concordia	2
70	Punta Caballos	12
85	Punta Las Rosas	2
140	Nuevo Berlín Brazo Derecho	30
140	Nuevo Berlín Brazo Izquierdo	29
190	Casablanca	39
230	Liebig	58
320	Puerto Yerúa	65
350	Vertedero	59

*Debido a las dimensiones del río Uruguay, cada aforo incluye 2 mediciones (pasadas) con ADCP. Este número refleja la cantidad de pasadas disponibles.

5.3.1.2. Secciones especiales

En los términos establecidos en la práctica hidrológica clásica, el Departamento de Hidrología de la CARU estableció secciones de aforo con los criterios de la OMM (2011), a los efectos de contabilizar la cantidad de agua circulante.

Desde aguas abajo hacia aguas arriba, estas son Nueva Palmira (km 9), Puente Internacional Libertador General San Martín (PLGSM, km 105), Puente Internacional General Artigas (PGA, km 213) y Colón (km 219). Esta última complementa a la sección PGA en caso de crecidas, debido a que la sección PGA tiene cursos laterales por donde se detectó un desvío de hasta el 20% del caudal para descargas mayores a los 10.000 m³/s.

Estas secciones, debido a la participación del Departamento en otras actividades, tienen mediciones esporádicas, con excepción del PLGSM que forma parte de otro monitoreo asociado al Comité Científico de la CARU. En la Figura 5.13 se presentan las secciones transversales, mientras que en la Tabla 5.2 se enuncia la cantidad de mediciones disponibles para cada sección.



Figura 5.13.- Ubicación de secciones transversales.

Tabla 5.2.- Secciones de aforo y cantidad de mediciones.

Km aprox.	Sección	Cantidad de mediciones* aforos disponibles
9	Nueva Palmira	29
105	PLGSM	117
213	PGA	
219	Colón	69

*Debido a las dimensiones del río Uruguay, cada aforo incluye 2 mediciones (pasadas) con ADCP. Este número refleja la cantidad de pasadas disponibles.

5.3.2. Relevamientos del Proyecto de cuantificación del Transporte de Sedimentos en el río Uruguay

En el marco del proyecto mencionado en el título del presente apartado, se realizaron cuatro relevamientos de campo denominados *R1*, *R2*, *R3* y *R4* en orden cronológico. Los mismos se ejecutaron en junio y diciembre de 2017, y en octubre y diciembre de 2018.

Las tareas de campo incluyeron realización de aforos líquidos y sólidos, toma de muestras de sedimento en suspensión, medición de perfiles batimétricos longitudinales y toma de muestras de sedimento del lecho. Estas tareas se realizaron en conjunto con la Dra. Cecilia López Weibel en el marco del desarrollo de su tesis de doctorado, por cuanto ciertas figuras remiten a dicha tesis que ya fue publicada (López Weibel, 2023).

5.3.2.1. Aforos líquidos y sólidos

En los cuatro relevamientos que comprende este proyecto, se midieron sectores cercanos a las localidades de Colón (C), Puerto Yerúa (PY), Concepción del Uruguay (CU), y Fray Bentos (F) y Nuevo Berlín (NB) (ver Figura 3.3). El único sector relevado en las cuatro ocasiones fue el aledaño a Colón.

En la Figura 5.14 se observan las secciones relevadas y los puntos de muestreo de concentración de sedimentos en suspensión. En la Tabla 5.3 se muestra un resumen de las mediciones efectuadas, junto con los resultados de los aforos líquidos. Estos últimos se realizaron intentando cumplir con la norma internacional de un tiempo de exposición de 720 segundos (Mueller, et al., 2013), y cuando fue posible, respetando la paridad de mediciones a los efectos de evitar el sesgo direccional (Huang, 2019).

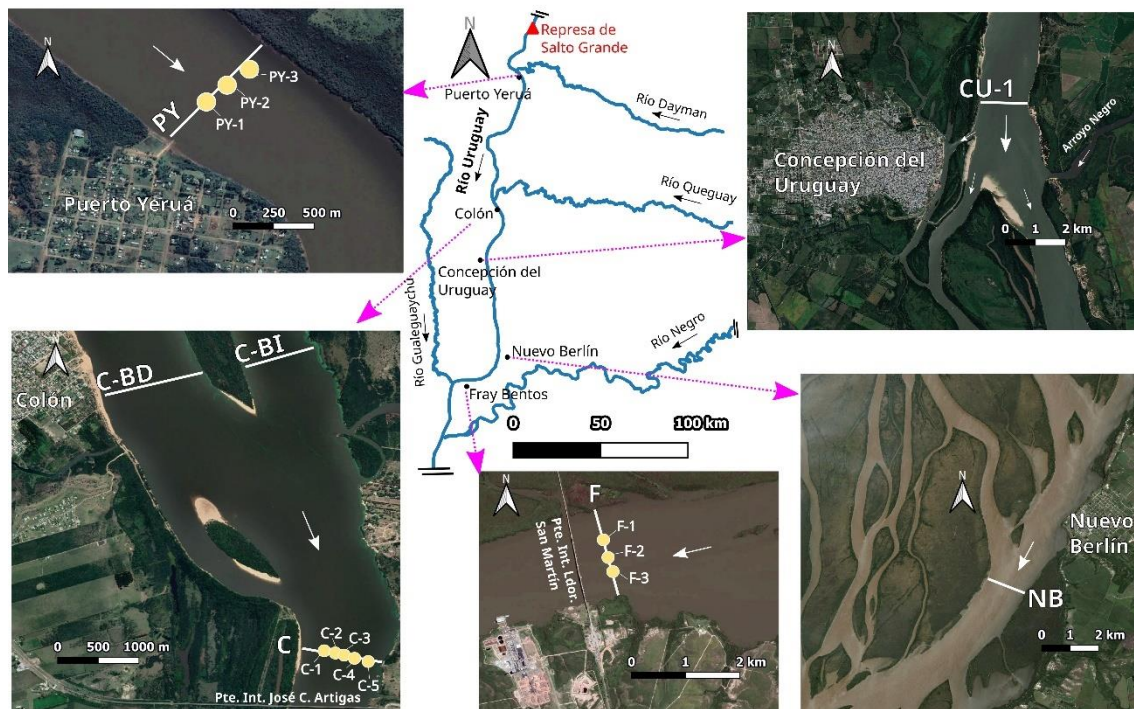


Figura 5.14.- Ubicación de secciones de aforo y de verticales seleccionadas para el muestreo de sedimento en suspensión. Tramo medio del río Uruguay, aguas abajo de la represa de Salto Grande (López Weibel, 2023).

Tabla 5.3.- Resumen de los datos de mediciones y muestreos correspondientes a los relevamientos realizados en el río Uruguay en junio y diciembre de 2017, en octubre y diciembre de 2018, y en octubre de 2022.

Zona	Fecha	Medición de caudal líquido		Muestras de sedimento en suspensión				
		Equipo utilizado	Caudal (m ³ /s)	Equipo utilizado	Método de selección de verticales	Cantidad de verticales	Tipo y cantidad de muestras	
R1	PY	28/6/17			-	-	1 muestra superficial	
	C (C-BD)	29/6/17	RDI y SM9	7418	Frasco	-	-	1 muestra superficial
	C (C-BI)	29/6/17			-	-		
R2	PY	14/12/17			Margen derecha, centro y margen izquierda	3	3 muestras integradoras en la vertical	
	C	14/12/17	RDI y SM9	2193	Muestreador US P-61	5	17 muestras puntuales (5 en Cb1 a 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 0.9 de la profundidad total <i>H</i> ; 3 en Cb2 a Cb5 a 0.2, 0.6 y 0.8 de la profundidad - <i>H</i>)	
	F	15/12/17			Margen derecha, centro y margen izquierda	3	9 muestras puntuales (a 0.2, 0.6 y 0.8 de <i>H</i> en cada vertical)	
R3	C	8/10/18	RDI	8826	Muestreador US P-61	5	20 muestras puntuales (4 en Cc1 a 0.2, 0.6, 0.8 y 0.9 de <i>h</i> , y 4 en Cc2 a Cc5 a 0.4, 0.6, 0.8 y 0.9 de <i>H</i>)	
R4	PY	19/12/18			-	-	-	
	C	18/12/18			Frasco	-	-	1 muestra superficial
	CU-1	19/12/18	RDI y SM9	5404		-	-	-
	NB	20/12/18				-	-	-
	F	20/12/18				-	-	-

Para los aforos sólidos, las muestras obtenidas en campo fueron procesadas en el Laboratorio de Sedimentología y en el Laboratorio de Química y Ambiente, de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) perteneciente a la Universidad Nacional del Litoral (UNL). Teniendo en cuenta las diferentes características del material del lecho y del transportado en suspensión, se aplicaron diferentes metodologías para el procesamiento de las muestras recolectadas en campo.

En la Tabla 5.4 se resumen los valores de caudal líquido (Q), concentraciones medias de la fracción fina (M_{s1}) y gruesa (M_{s2}) y los correspondientes caudales sólidos para cada fracción (G_w y G_{ss} , respectivamente). Más adelante se presentarán en detalle los resultados de los relevamientos, incluyendo los datos granulométricos.

Tabla 5.4.- Valores de transporte de sedimentos en suspensión, para secciones del río Uruguay en Puerto Yerúa, Colón, Concepción del Uruguay, Nuevo Berlín y Fray Bentos.

Relevamiento	Sección	Q	M_{s1}	G_w	M_{s2}	G_{ss}
		(m ³ /s)	(mg/L)	(kg/s)	(mg/L)	(kg/s)
R1	Puerto Yerúa	7.530	12,9	97,1	-	-
	Colón	7.418	15,1	112,0	-	-
R2	Puerto Yerúa	1.621	14,8	24,0	0	0
	Colón	2.193	16,9	37,1	0	0
	Fray Bentos	2.289	15,8	36,2	0	0
R3	Colón	8.826	18,0	158,9	0,83	7,3
R4	Puerto Yerúa	7.016				
	Colón	5.404	18,5	100,0	-	-
	Concepción del Uruguay	8.359				
	Nuevo Berlín	6.540				
	Fray Bentos	9.763				

5.3.2.2. Desplazamiento de dunas y material de fondo

En R1 se realizaron perfiles longitudinales en las dos zonas de estudio (Puerto Yerúa y Colón), utilizando un ADCP Sontek y la Ecosonda Monohaz Knudsen 1612. En Puerto Yerúa se efectuaron dos perfiles longitudinales, en cercanías a la margen izquierda y a la margen derecha del cauce (PY-MD y PY-MI, respectivamente, Figura 5.15, panel A). En esta sección no se detectaron dunas en el perfil.

En Colón se realizaron cuatro perfiles longitudinales. En esta zona, el tramo seleccionado para la medición se encuentra dividido en dos brazos por la Isla San Francisco. Tres perfiles longitudinales fueron realizados sobre el brazo derecho del tramo (Ca-1, Ca-2 y Ca-3) y un perfil longitudinal sobre el brazo izquierdo (Ca-4) (Figura 5.15, panel B).

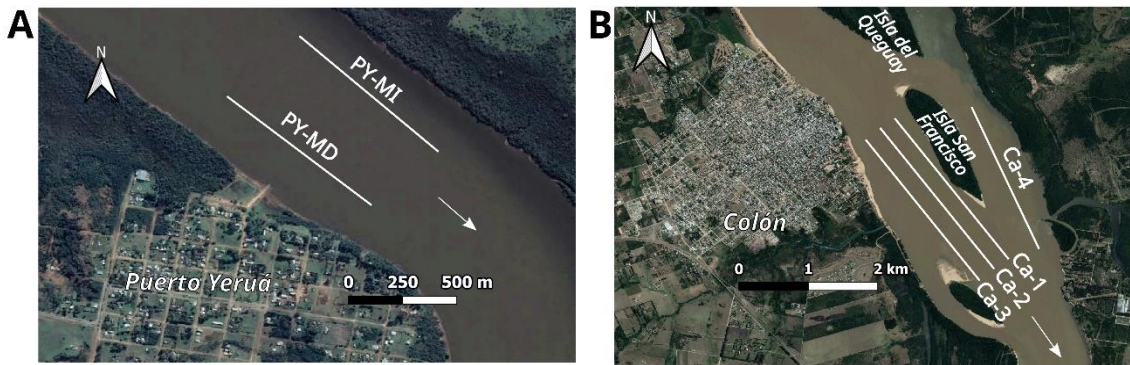


Figura 5.15.- Ubicación de los perfiles longitudinales en *R1*. A) Zona Puerto Yeruá; B) Zona Colón. Tomado de López Weibel (2023).

Con el objeto de computar los desplazamientos de las formas de fondo en un lapso determinado y, de esta forma, calcular el transporte de sedimento por fondo (G_{sf}), los perfiles longitudinales fueron repetidos los días 30/6/17 y 6/7/17, es decir, al pasar uno y siete días desde la primera medición.

En el intervalo de tiempo entre *R1* y *R2* se realizaron dos mediciones más de dichos perfiles longitudinales en la zona de Colón. Estos relevamientos, a los efectos del presente, se denominan *RA* y *RB*. El primero de ellos tuvo lugar en agosto de 2017 (22 y 30), mientras que el segundo fue en noviembre del mismo año (1, 8 y 10), aunque este último solo contempló el relevamiento del perfil central del brazo derecho (Ca-2).

Se realizó el mismo procedimiento para *R4*. Esta vez se relevaron Ca-2 y Ca-3. El 18/12/2018 se realizó el primer relevamiento, que fue continuado el 21/12/2018, es decir, 3 días después.

Un mes después del relevamiento *R4*, se realizó un nuevo levantamiento longitudinal (*R5*). Este se realizó en la sección Colón durante un escenario de crecida, con un caudal de aproximadamente $25.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Allí se realizó un levantamiento de los perfiles Ca-1 a Ca-4, los días 25, 28 y 30/1/2019. Debido a la cercanía en el tiempo de los relevamientos *R4* y *R5*, se evaluará en el punto 6.2.2 su validez para la estimación de G_{sf} . En la Tabla 5.5 se resumen los relevamientos correspondientes a esta tarea.

En cuanto a los sedimentos que integran el fondo, utilizando conos de arrastre (Figura 5.10), en *R1* se tomaron muestras de sedimento del lecho en coincidencia con la ubicación de los perfiles longitudinales medidos (Figura 5.15). De este modo, en la sección Puerto Yeruá se tomaron dos muestras, una en cercanías a la margen derecha y la otra en cercanías a la margen izquierda del cauce (de aquí en adelante MD y MI, respectivamente). Por su parte, en la sección Colón se tomaron 3 muestras sobre el brazo derecho de la

bifurcación, y una muestra sobre el brazo izquierdo. Dado que las muestras de sedimento de fondo fueron coincidentes con los perfiles longitudinales relevados, las mismas se denominaron de igual forma que estos, siendo PY-MD y PY-MI, las muestras tomadas en la sección Puerto Yeruá, y Ca-1, Ca-2, Ca-3 y Ca-4, las muestras tomadas en la sección Colón.

Tabla 5.5.- Relevamientos realizados en Colón para calcular el desplazamiento de dunas.

Relevamiento	Fecha	Líneas	Equipo
<i>RI</i>	29/06/2017	Ca-1 a Ca-4	ADCP
<i>RI</i>	30/06/2017	Ca-1 a Ca-4	ADCP
<i>RI</i>	06/07/2017	Ca-1 a Ca-4	ADCP
<i>RA</i>	22/08/2017	Ca-1 a Ca-4	Ecosonda
<i>RA</i>	31/08/2017	Ca-1 a Ca-4	Ecosonda
<i>RB</i>	01/11/2017	Ca-2	Ecosonda
<i>RB</i>	08/11/2017	Ca-2	Ecosonda
<i>RB</i>	10/11/2017	Ca-2	Ecosonda
<i>R4</i>	18/12/2018	Ca-2 y Ca-3	ADCP
<i>R4</i>	21/12/2018	Ca-2 y Ca-3	ADCP
<i>R5</i>	25/01/2019	Ca-1 a Ca-4	ADCP
<i>R5</i>	28/01/2019	Ca-1 a Ca-4	ADCP
<i>R5</i>	30/01/2019	Ca-1 a Ca-4	ADCP

La distribución granulométrica de las muestras de fondo recolectadas fue determinada mediante tamizado en seco (Guy, 1969). El tamaño d_{50} de las muestras fue clasificado de acuerdo a la escala de tamaños de sedimentos de la Tabla 2.3 de García (2008). El desvío estándar $\sigma_g = (d_{84}/d_{16})^{1/2}$ fue utilizado para clasificar las distribuciones de tamaño de grano como perfectamente uniforme ($\sigma_g = 1$), bien graduado ($\sigma_g < 1,3$) y mal graduado ($\sigma_g > 1,6$) (García, 2008).

En la Figura 5.16 y Figura 5.17 se presentan fotografías de las muestras de fondo recolectadas en *RI* para las zonas Puerto Yeruá y Colón, respectivamente. Las muestras recolectadas en Puerto Yeruá se hallaron compuestas de cantos rodados. En este caso, de acuerdo al peso de los clastos de mayor tamaño recolectados en cada muestra, éstas resultaron insuficientes para determinar la distribución granulométrica del sedimento de fondo.



Figura 5.16.- Muestras de sedimento de fondo. Río Uruguay en RI – zona Puerto Yeruá. Tomado de López Weibel (2023).

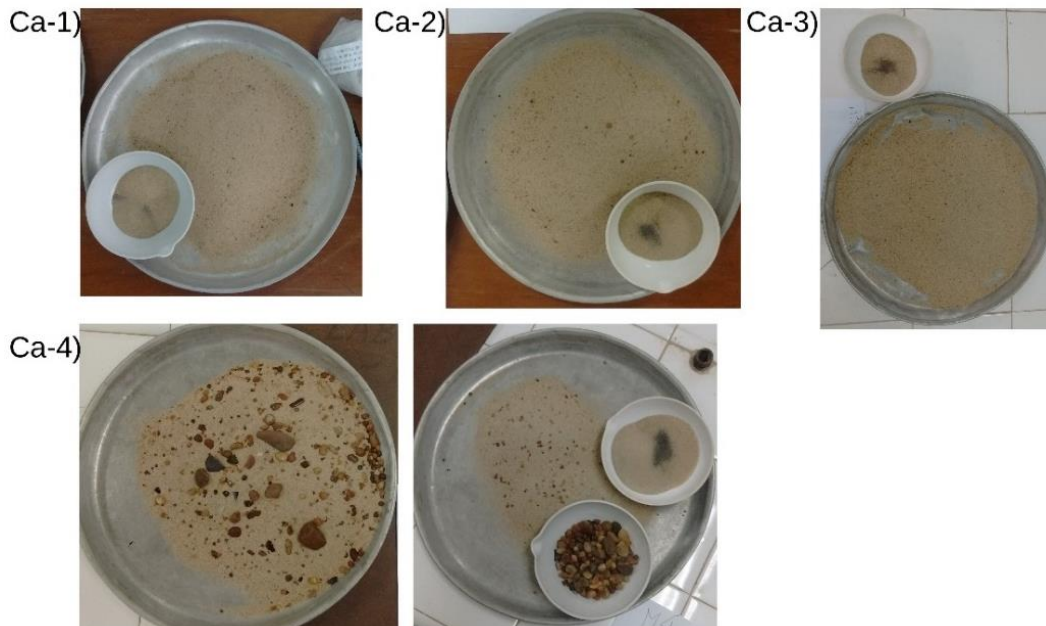


Figura 5.17.- Muestras de sedimento de fondo. Río Uruguay en R1 - zona Colón. Tomado de López Weibel (2023).

5.3.2.3. Medición estacionaria con ADCP

En las últimas dos décadas, se comenzaron a explorar distintas metodologías basadas en ADCPs para la cuantificación de G_{sf} , no obstante, el número de publicaciones es más limitado que para el caso de G_{ss} . La metodología se basa en la estimación del transporte de fondo a partir de la medición de la velocidad aparente de desplazamiento del fondo, v_a , que se computa como la diferencia entre la velocidad del bote registrada con sistemas de posicionamiento global (DGPS), v_{DGPS} , y la velocidad del bote registrada por un sistema que poseen los ADCPs llamado “BottomTrack” (BT), v_{BT} . Con este concepto se puede correlacionar v_a con el transporte de sedimentos de fondo volumétrico, q_{sf} . Esto se

logra utilizando el concepto de capa activa, es decir, una distancia perpendicular al fondo donde ocurre el movimiento de sedimentos.

Para la aplicación de esta técnica, en el marco del Proyecto de Medición del Transporte de Sedimentos en CARU, se realizaron mediciones en diferentes escenarios hidrológicos y en diferentes localizaciones. En todos los casos, la medición consistió en un intervalo de tiempo entre 5 y 15 minutos en el cual se dejó la embarcación anclada con el ADCP midiendo. Luego, el desplazamiento aparente del fondo está dado por la distancia aparente recorrida en la función “*bottom track*” respecto de la posición cuasi-estable, dada por el ADCP.

Se realizaron 12 mediciones que se detallan en la Tabla 5.6. De ellas, a priori solo algunas presentaron velocidades aparentes significativas. La metodología se abordará en el título 8.2.3.

Tabla 5.6.- Mediciones estacionarias con ADCP.

Fecha	Software de relevamiento	Ubicación	Tiempo de medición (minutos)
29/06/2017	RiverSurveyor	Colón	10:11
30/06/2017	RiverSurveyor	Colón	10:19
18/12/2018	RiverSurveyor	Colón	10:15
19/12/2018	RiverSurveyor	Concepción del Uruguay	15:12
20/12/2018	RiverSurveyor	Nuevo Berlín	15:11
20/12/2018	RiverSurveyor	Puente Lib. Gral. San Martín	8:04
25/01/2019	RiverSurveyor	Colón	15:23
28/01/2019	RiverSurveyor	Colón	15:23
30/01/2019	RiverSurveyor	Colón	15:41
09/04/2019	RiverSurveyor	Liebig	7:25
10/04/2019	RiverSurveyor	Nuevo Berlín	15:18
10/04/2019	RiverSurveyor	Nuevo Berlín	8:11

5.3.3. Relevamientos batimétricos disponibles

Se contó con diversa información batimétrica relevada entre 2014 y 2022 por los Departamentos de Hidrología y Navegación, Navegabilidad y Obras de la CARU, así como también de relevamientos ejecutados por contratistas de la CARU.

Entre los primeros relevamientos disponibles se encuentra una batimetría longitudinal del canal de navegación, relevada en marzo de 2016 para el tramo entre el km 0 y el 206, y en marzo de 2018 para el tramo hacia aguas arriba.

También se encuentran disponibles más de 200 batimetrías que se realizaron en el período 2015-2022 por el Departamento de Navegación, Navegabilidad y Obras. Estas batimetrías fueron realizadas en el contexto de los diferentes estudios, y abarcan el tramo entre los kilómetros 0 y 350 (Tabla 5.7).

Tabla 5.7.- Ubicación de los pasos críticos de navegación.

Progresiva aproximada (km)	Acrónimo	Paso
36	MI	Márquez Inferior
38	MM	Márquez Medio
41	MS	Márquez Superior
53	PA	Punta Amarilla
74	PC	Punta Caballos
88	BA	Barrizal
106	AB	Abrigo
112	NB	Ñandubaysal
120	TC	Tres Cruces
125	FI	Filomena Inferior
130	BU	El Burro
131	FM	Filomena Medio
134	FS	Filomena Superior
140	BF	Banco Francés
148	RO	Román
149	BO	Bonfiglio
153	BG	Banco Grande
156	SG	San Genaro
168	MN	Montaña
178	AS	Altos y Bajos
181	GA	Garibaldi
185	CDU	Canal de Acceso a Concepción del Uruguay
186	AN	Arroyo Negro
196	UR	Urquiza
196	CB	Casablanca
198	AL	Almirón
216	CO	Colón
218	SF	San Francisco
229	PV	Perucho Verne
239	GR	Grasería
246	PE	Pepeají
258	CS	Cancha Seca
265	SJ	San José
278	SO	Sombbrero
285	GU	Guaviyú
290	RE	Redonda
293	CH	Chapicuy
310	HE	Hervidero
315	DA	Daymán
316	BD	Barcazas Daymán
324	YU	Yuquerí
328	CO	Corralito
331	LC	La Caballada

Además, se contó con relevamientos sistemáticos de los pasos críticos de navegación en el tramo del kilómetro 0 al 206,8, que es donde está habilitada actualmente la vía navegable. Se entiende por paso crítico de navegación a un sector de la vía navegable fluvial donde las profundidades disponibles para la navegación son naturalmente inferiores a las necesarias para la circulación de los buques de diseño. En este sentido, los trabajos de dragado de apertura y mantenimiento de una vía navegable consisten en alcanzar, mantener y garantizar, en los pasos críticos de navegación, la profundidad de navegación necesaria a lo largo del tiempo.

En el 2019 se comenzó el contrato para el dragado de mantenimiento de la vía navegable que implicó la realización periódica de batimetrías en los 20 pasos de navegación habilitados (EIH-INCOIV, 2012). Estas batimetrías fueron ejecutadas entre el 2019 y el 2022 por la contratista, y reportadas a la CARU mediante plano y datos procesados. Esta

información constituye un set de 295 batimetrías, divididas en 20 pasos de navegación entre el km 0 y el 206,8. Cada paso fue relevado con una frecuencia mensual, bimestral o trimestral en función de lo definido en el pliego de la obra, según se indica en la Tabla 5.8. Este subgrupo será analizado en el Capítulo 8 para determinar las tasas de acumulación de sedimentos en los pasos.

Tabla 5.8.- Pasos críticos relevados en el contexto del dragado de mantenimiento.

Nº	Paso	Cantidad de batimetrías disponibles	Frecuencia
1	Márquez Inferior	11	Trimestral
2	Márquez Medio	11	Trimestral
3	Márquez Superior	12	Trimestral
4	Punta Amarilla	11	Trimestral
5	Punta Caballo	11	Trimestral
6	Barrizal	16	Bimestral
7	Abrigo	4	Anual
8	Ñandubaysal	4	Anual
9	Tres Cruces	16	Bimestral
10	El Burro	15	Bimestral
11	Banco Francés	4	Anual
12	Bonfiglio	34	Mensual
13	Banco Grande	12	Trimestral
14	San Genaro	5	Anual
15	Montaña	4	Anual
16	Altos Y Bajos	34	Mensual
17	Garibaldi	34	Mensual
18	Arroyo Negro	17	Mensual
19	Canal de acceso a CDU	34	Trimestral
20	Casablanca	6	Anual

Capítulo 6

Evaluación y estimación de la concentración y el transporte de sedimento de fondo en suspensión con tecnología acústica Doppler

6.1. Introducción

El transporte de sedimento de fondo en suspensión (G_{ss}) consiste en el movimiento de los granos de sedimento mayores a 62 micrones, suspendidos en el curso fluvial debido a que las fluctuaciones turbulentas de la velocidad son mayores a la velocidad de caída de las partículas (Niño & García, 1998). La alta dependencia de las fluctuaciones turbulentas hace necesaria, para la medición del transporte de sedimentos, la utilización de muestreadores isocinéticos. En estos equipos la velocidad de ingreso de la muestra es igual a la de la corriente, mientras el muestreador se alinea con el flujo (Edwards & Glysson, 1999; Gray & Gartner, 2009; Latosinski, 2014; Rennie C. , 2017)

Ante esta condición, para bajas concentraciones de sedimentos en suspensión, como es el caso del río Uruguay en aguas medias, se deben tomar grandes volúmenes de muestra para reducir el error. Todo lo mencionado redundaría en escasos antecedentes válidos de muestreo de esta variable.

El antecedente con mayor relevancia en el río Uruguay data del año 2012, en el marco del “Proyecto De Dragado y Balizamiento del Río Uruguay desde el km 0 al km 187,1, Incluyendo el Canal de Acceso al Puerto de Concepción del Uruguay y los canales entre El km 187,1 Y El km 206,8 Puerto de Paysandú” (EIH-INCOIV, 2012). Allí se realizaron mediciones de G_{ss} en distintos pasos de navegación con un muestreador USP-61. Luego, estas mediciones fueron utilizadas para calcular y generalizar, en las secciones

medidas, el transporte de sedimento en suspensión, mediante la correlación de la señal acústica de un ADCP de la marca Sontek con las concentraciones relevadas.

La tecnología acústica basada en ADCPs comerciales ha sido reconocida como una herramienta potencial para la cuantificación del transporte de sedimentos en corrientes naturales (Gray & Gartner, 2010). Esta tecnología utiliza el efecto Doppler, que se verifica cuando un transductor de sonar de un ADCP emite un pulso corto de energía acústica, el cual se propaga a través del agua y es reflejado por las partículas que se encuentran en suspensión moviéndose con la velocidad del agua. Una parte de la energía acústica reflejada vuelve hacia los transductores, donde es registrada, ya que los mismos actúan también como receptores de sonido (Szupiany, et al., 2019).

El uso de ADCPs tiene algunas importantes ventajas comparativamente a las otras tecnologías (acústicas, ópticas, láser, entre otras, conocidas en la bibliografía como tecnologías sustitutas) capaces de medir G_{ss} indirectamente. Entre estas ventajas se destacan la simultaneidad en la medición de la velocidad e intensidad de señal de retorno para el cálculo de la carga de sedimentos, la resolución espacial y la alta frecuencia temporal.

El procedimiento para obtener valores de concentración de sedimentos (M_s) en suspensión, a partir de la señal de retrodispersión acústica (*backscatter*) o la relación señal-ruido (*signal-to-noise ratio* o *SNR*) registrada por el sensor, se realiza generalmente utilizando funciones semiempíricas entre cambios en la señal del instrumento y las mediciones directas con muestreadores tradicionales (Gray & Gartner, 2009; Szupiany, et al., 2009; Wright, et al., 2010; Latosinski, et al., 2011; Szupiany, et al., 2019).

En este tópico se pueden resaltar diferentes estudios realizados, con distintas consideraciones teóricas, tanto en laboratorio como en ambientes naturales. Thorne et al. (1993; 1998), Holdaway et al. (1999), Deines (1999), Thorne & Hanes (2002), Gartner (2004), Wall et al. (2006), Topping et al. (2007), Szupiany et al. (2009), Attard (2012), Hanes (2012), Guerrero et al. (2013; 2016), Latosinski et al. (2014), Thorne & Hurther (2014), Venditti et al. (2016), Landers et al. (2016), Topping & Wright (2016), Haught et al. (2017) y Mullison (2017), investigaron la relación entre la concentración del sedimento en suspensión y el nivel de intensidad del eco acústico. Thorne & Meral (2008), Wright et al. (2010), Sassi et al. (2012), Moore et al. (2013), Moate & Thorne (2013), Agrawal & Hanes (2015), Hanes (2016), Topping & Wright (2016) y Haught et al. (2017), estudiaron la atenuación acústica y las propiedades del sedimento en la atenuación del

sonido. Asimismo, Thorne & Hurther (2014), Vincent & McDonald (2015) y Thomas et al. (2017), evaluaron la dispersión acústica asociada a los sedimentos floculados.

A pesar de este progreso en el área de estudio, debe realizarse un mayor esfuerzo y evaluación en esa dirección, especialmente en el rango de corrientes naturales y ríos con lecho de arena, caracterizados por transporte de sedimentos mixtos, que implica una fracción fina (carga de lavado) y una gruesa (arena) (Szupiany, et al., 2019).

La retrodispersión acústica y la atenuación causada por el sedimento en suspensión han recibido importante atención científica durante los últimos años. No obstante, distintas formulaciones teóricas y simplificaciones permanecen inválidas o sin suficiente testeo en ambientes naturales. En estos, las características del sedimento varían significativamente con el volumen de medición acústica, razón que menoscaba el desarrollo de una metodología general que pueda ser aplicada por ADCPs en la modalidad de bote móvil (Szupiany, et al., 2019).

Con estos antecedentes, Szupiany et al. (2019) propusieron un método basado en la inversión de una señal acústica para estimar la concentración de arena en suspensión en un sistema fluvial con sedimento en suspensión bi-modal. Esto implica la existencia de dos fracciones de sedimentos en suspensión simultáneamente, una fracción fina con un diámetro medio menor a 62 micrones (limo y arcilla), con una concentración determinada (M_{s1}), y complementariamente una fracción gruesa ($d_{50} > 62$ micrones, arena), con su correspondiente concentración asociada (M_{s2}). Este método se desarrolló sobre datos obtenidos con Perfiladores de Corriente Acústicos Doppler (ADCP) del fabricante Teledyne-RD Instruments. Más aún, Domínguez Rúben et al. (2020) presentaron un código computacional que resuelve la metodología presentada por Szupiany et al. (2019), haciendo uso de una herramienta desarrollada en MATLAB®, llamado Acoustic Sediment Estimation Toolbox (ASET).

Si bien Teledyne RD Instruments posee una importante porción del mercado, desde el lanzamiento del ADCP Sontek M9®, este último ha logrado posicionarse como el equipo de referencia en las mayores agencias de medición, particularmente en Latinoamérica. A modo de ejemplo se menciona que el Instituto Nacional del Agua (INA) de Argentina cuenta con un ADCP, modelo Sontek M9 (Instituto Nacional del Agua, 2020) y la Agencia Nacional de Aguas de Brasil cuenta con aproximadamente 15 ADCPs RDI y más de 100 Sontek M9 (Sterling, 2019). Asimismo, tanto la Comisión Administradora del Río Uruguay y la Comisión Técnica Mixta de Salto Grande, que ejecutan programas

de monitoreos continuos en el río Uruguay, cuentan con ADCPs de la Marca Sontek (4 CARU y 1 CTMSG).

Ante este escenario comercial, disponer de la tecnología basada en la inversión acústica para la estimación del transporte de sedimentos a partir de los datos del ADCP Sontek M9 permitiría *procesar una gran cantidad de datos ya relevados, y generar a partir de ellos series de transporte de sedimentos en suspensión sobre la base de una serie de aforos realizados*.

A pesar de la importante cantidad de estos equipos que disponen diferentes instituciones, hasta el momento no se realizaron evaluaciones, validaciones y metodologías para estimar el transporte de sedimentos. Los ADCPs de la marca Sontek, particularmente los modelos S5 y M9, han sido utilizados solamente para realizar correlaciones entre el valor de la relación señal-ruido (*Signal-to-Noise ratio*) y la concentración de sedimentos en suspensión (Moore, 2017; Heredia Ligorria, 2017; Wosiacki, et al., 2021). Entre las principales razones por las cuales no se han desarrollado investigaciones con instrumentos Sontek, en comparación con los ADCP RDI, se destaca la escasez de parámetros informados por el fabricante y los diferentes modos acústicos de funcionamiento propios de los modelos M9 y S5, lo cual impide la aplicación directa de la denominada ecuación del sonar.

El presente capítulo analiza la aplicación de la teoría de inversión acústica a los datos relevados con ADCP Sontek M9®. Posteriormente, se desarrolla una metodología aplicable a este instrumento para utilizar sobre datos existentes en el río Uruguay, que presenta una distribución bi-modal de sedimentos en suspensión.

6.2. Teoría Acústica

Los ADCPs comerciales funcionan mediante la emisión de un pulso de sonido corto a una frecuencia acústica conocida (ping), que se propaga a través del agua, siendo reflejado en todas las direcciones por las partículas que se encuentran en suspensión (sedimento, materia orgánica, etc.), y que viajan a la velocidad del agua (Latosinski, 2014). Una porción de la energía reflejada vuelve hacia los transductores, donde es registrada. Estos instrumentos operan con 3 o 4 transductores, según modelo y marca, para obtener información tridimensional de la velocidad en el flujo, y de la señal acústica de retorno (Simpson, 2001). Los pulsos acústicos transmitidos por los transductores de un ADCP, mientras viajan por la columna de agua, experimentan una pérdida de energía debido a la

presencia de cualquier partícula en suspensión (sedimentos, burbujas de aire o materia orgánica particulada). Por lo tanto, la intensidad de la señal de retorno estará relacionada a características de las partículas presentes en la columna de agua, tales como su concentración (Basile, 2018).

La intensidad de la señal acústica de retorno es una función de las características del instrumento (frecuencia acústica, potencia de transmisión, rango del volumen de medición, sensibilidad de recepción) y de las condiciones de transporte de sedimento (concentración y tamaño de las partículas de sedimento, cantidad de materia orgánica, sólidos disueltos, etc.). Luego, para un instrumento determinado, asumiendo un tipo constante de sedimento y distribución de tamaño, y ausencia de burbujas de aire y materia orgánica particulada, la fuerza de la señal puede tener una relación simple con la concentración de sedimentos (Latosinski, 2014).

El fenómeno descrito se modeliza a partir de la ecuación [6.1], presentada por diferentes autores (Johannesson & Mitson, 1983; Thorne & Hanes, 2002; Gartner, 2004; Wall, et al., 2006; Wright, et al., 2010; Hanes, 2012; Guerrero, et al., 2013; Latosinski, 2014; Szupiany, et al., 2019).

$$RL = EL - S_c + S_v \quad [6.1]$$

Esta expresión se conoce como ecuación del sonar, y en ella RL es el nivel de reverberación o nivel de intensidad recibido/registrado por el equipo de medición, EL es la intensidad de la señal emitida por el equipo, que es conocida o medible, S_c son las pérdidas de transmisión en el medio líquido, tanto a la ida como a la vuelta de la señal desde y hacia el transductor (también se denomina corrección de la retrodispersión volumétrica), y S_v es la retrodispersión volumétrica de la señal acústica, que es la señal de retorno reflejada en las partículas.

6.2.1. Variables acústicas

6.2.1.1. Nivel de reverberación (RL)

Desde la emisión de una señal acústica al medio líquido, esta experimenta una reverberación, es decir, una disminución en su intensidad. La señal acústica recibida por un transductor se mide a partir de los cambios de presión registrados en un equipo dispuesto a tal fin. La intensidad acústica recibida (I) es proporcional al cuadrado de la presión observada. Si se adimensionaliza esta intensidad con un valor de intensidad

acústica de referencia (I_{ref}), el nivel de reverberación puede expresarse en unidades logarítmicas (decibeles) según [6.2] (Clay & Medwin, 1977).

$$RL = 10 \log_{10} \frac{I}{I_{ref}} \quad [6.2]$$

Ante la actuación de un pulso acústico en la columna de agua, existen una variedad de fuentes que pueden producir reverberación, como por ejemplo burbujas de aire, materia orgánica particulada y flóculos. Esto implica que existe una porción del nivel de reverberación que se corresponde con la cantidad de partículas presentes en el fluido, y para los objetivos del presente estudio es deseada, y otra porción que es propia del equipamiento de medición, y también inherente al cuerpo de agua donde se mide. Esta última cantidad no presenta correlación con la concentración de sedimentos en suspensión, y puede denominarse ruido.

El registro de esta variable depende del equipo utilizado para su medición. Existen ADCPs que registran la intensidad de la retrodispersión acústica (o nivel de intensidad del Eco, E), como por ejemplo los ADCPs de Teledyne RD Instruments, y ADCPs que registran esta variable como *signal-to-noise ratio*, tal como es el caso de los ADCPs M9 de la empresa Sontek (Moore, 2017). En este último caso, la información recolectada con el equipo se expresa en una cantidad denominada *SNR*, medida en decibeles, que no permite conocer cuál es el nivel de intensidad de referencia, ni de ruido de base observado.

Los equipos de la marca Teledyne RD Instruments registran, en unidades “counts”, el nivel de intensidad del sonido, que se relaciona con el nivel de reverberación de acuerdo con las ecuaciones [6.3] y [6.4] propuestas por Deines (1999) y Gostiaux & van Haren (2010). Los rangos de aplicación y validez de las mismas se discuten en Mullison (2017).

$$RL = k_c(E - E_r) \quad [6.3]$$

$$RL = 10 \log_{10}(10^{k_c(E - E_r)/10} - 1) \quad [6.4]$$

En las dos ecuaciones precedentes, E_r indica el nivel de ruido de base originado en el cuerpo de agua y k_c es un factor de conversión conocido entre *counts* y decibeles, y puede ser solicitado al fabricante, u obtenerse a partir del test del hidrófono descrito en Teledyne RD Instruments (1999).

6.2.1.2. *Intensidad de señal emitida (EL)*

Esta variable, medida en decibeles, puede expresarse como una función [6.5] de la potencia eléctrica transmitida (P_T), la longitud de transmisión del pulso (L) y el parámetro C que depende la geometría y la eficiencia del transductor (Deines, 1999; Mullison, 2017).

$$EL = 10 \log_{10}(LP_T) + C \quad [6.5]$$

Para ADCPs del fabricante Teledyne RD Instrumentes, Szupiany et al. (2019), Deines (1999) y Mullison (2017) detallan la metodología de obtención de los valores de L y P_T , así como también el valor de la constante C . Dichos autores indican que P_T se correlaciona a cada ADCP, teniendo en cuenta la corriente eléctrica y el voltaje transmitidos.

Los ADCPs de la marca Sontek registran en sus archivos de salida la longitud del pulso (L), el voltaje del equipo, pero no la corriente eléctrica. Asimismo, para este equipo no existe en la literatura un reporte detallado del valor de C tal y como el dado por Deines (1999) que abarca distintos equipos y fabricantes. Esto se debe a que el Sontek M9 no estaba en el mercado a la fecha de publicación del mencionado artículo.

6.2.1.3. *Corrección volumétrica de la retrodispersión (S_c)*

También llamada pérdidas de transmisión (Urlick, 1983), incluye conceptualmente y en su formulación matemática [6.6] los siguientes fenómenos:

- a) la absorción del agua por medio de la viscosidad (α_w , expresado en dB m⁻¹) (Schulkin & Marsh, 1962);
- b) la absorción α_{si} (en dB m⁻¹), que realizan los sedimentos de la fracción granulométrica i , que tiene un radio medio a_i , debido a los mecanismos de absorción viscosa y dispersión acústica (Urlick, 1948; Thorne & Hanes, 2002);
- c) corrección de campo cercano (ψ) debida a la ampliación del haz (Downing, et al., 1995).

$$S_c = 2 \left(\alpha_w + \sum \alpha_{si} \right) + 10 \log_{10}(T_t r^2 \psi^2) \quad [6.6]$$

T_t representa la temperatura del transductor, que es un dato reportado por el ADCP, y r es la distancia desde el transductor a lo largo del eje del haz de sonido. Esta última variable se relaciona con la profundidad vertical teniendo en cuenta el ángulo de emisión del haz acústico desde el transductor del ADCP (*Beam angle* θ , que para el ADCP Sontek M9 es 25° y para el RDI Río Grande 20°) y la distancia desde la superficie del agua hasta la posición de la primera celda (*draft distance*).

La corrección de campo cercano, ψ , contempla que la dispersión del haz de sonido no es lineal cerca del transductor, es decir, que el pulso no puede considerarse plano cerca del mismo. Esta corrección se computa como se indica a continuación:

$$\psi = \frac{1 + 1.35Z + (2.5Z)^{3.2}}{1.35Z + (2.5Z)^{3.2}} \quad [6.7]$$

donde Z es la distancia desde el transductor a lo largo del haz acústico (r) adimensionalizada con la distancia del campo cercano asociada al transductor (r_n). En la ecuación [6.8] se muestra la dependencia de Z .

$$Z = \frac{r}{r_n} = \frac{r \lambda}{\pi a_t^2} \quad [6.8]$$

Donde a_t es el radio del transductor (m), y λ la longitud de onda del pulso acústico (m). Esta última variable se calcula como el cociente entre la velocidad del sonido en el agua (c , m s⁻¹) y la frecuencia acústica (f_a , medida en Hertz). Considerando que la presentación de datos de la señal acústica en un ADCP se discretiza en celdas, Deines (1999) propuso corregir el valor de r adicionando un cuarto del tamaño de la celda (H_B , m) a este valor (Ecuación [6.9]).

$$Z = \frac{r + \frac{H_B}{4}}{r_n} = \frac{\left(r + \frac{H_B}{4}\right) \lambda}{\pi a_t^2} = \frac{\left(r + \frac{H_B}{4}\right) c}{\pi a_t^2 f_a} \quad [6.9]$$

El coeficiente α_w , según Schulkin & Marsh (1962) se calcula con la expresión [6.10], y depende de la temperatura del fluido (T , medido en grados Celsius) y la frecuencia acústica aplicada.

$$\alpha_w = 10 \log_{10} e^2 \frac{3.38 \times 10^{-6} f_a^2}{21.90 \times 10^{[6-(1520/T+273)]}} \quad [6.10]$$

El cálculo de los coeficientes α_{si} , también expresada en dB m⁻¹, reviste mayor complejidad. Esto se debe a que la variable incluye dos términos que caracterizan fenómenos diferentes en la ecuación [6.11]. El primer término ($\alpha_{si,visc}$) considera las pérdidas por absorción viscosa de las partículas, y el segundo término implica la dispersión acústica ocasionada por las mismas ($\alpha_{si,disp}$).

$$\alpha_{si} = \alpha_{si,visc} + \alpha_{si,disp} \quad [6.11]$$

El término viscoso ($\alpha_{si,visc}$), según Hay (1983), se expresa como se señala en [6.12]. Allí ξ_v se calcula con [6.13] como en Urick (1948), y los corchetes angulares implican un promedio en el número de partículas de la fracción granulométrica.

$$\alpha_{si,visc} = 10 \log_{10} e^2 M_{si} \langle \xi_v \rangle \quad [6.12]$$

$$\xi_v = \frac{k(S-1)^2}{2\rho_s} \left[\frac{s}{s^2+(S+\tau)^2} \right],$$

$$k=2\pi/\lambda, \lambda=c/f_a,$$

$$s = \frac{9}{4\gamma a_i} \left[1 + \frac{1}{\gamma a_i} \right], \quad [6.13]$$

$$S = \frac{\rho_s}{\rho}, \tau = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{9}{2\gamma a_i} \right], \gamma = \sqrt{\frac{\omega}{2\nu}}, \omega=2\pi f_a$$

En [6.13], τ , s y γ son variables calculadas como se describe, S es la gravedad específica del sedimento calculada como la relación entre la densidad del sedimento (ρ_s) y la densidad del agua (ρ), k es el número de onda, λ es la longitud de onda de la señal acústica, c es la velocidad del sonido en medio líquido, ν es la viscosidad cinemática del agua, ω es la velocidad angular de la señal acústica.

Homólogamente, se presenta en [6.14] la expresión de Thorne & Meral (2008). En ésta, la dispersión acústica causada por la presencia de sedimentos se calcula como una función del radio de las partículas de una fracción determinada y de la sección transversal de dispersión de la suspensión de sedimentos no cohesivos normalizada (χ). La variable χ describe las interacciones del sonido con la elasticidad de las partículas presentes en la suspensión.

$$\alpha_{si,disp} = 10 \log_{10} e^2 M_{si} \langle \xi_d \rangle = 10 \log_{10} e^2 \frac{M_{si}}{\rho_s} \frac{\langle a_i^2 \chi \rangle}{4/3 \langle a_i^3 \rangle} \quad [6.14]$$

Thorne & Meral (2008) publicaron una parametrización de χ en función del producto entre el número de onda y el radio de las partículas ($x=k a_i$), que se presenta a continuación.

$$\chi = \frac{0.29x^4}{0.95 + 1.28x^2 + 0.25x^4} \quad [6.15]$$

Reemplazando y combinando algebraicamente las expresiones desde [6.11] a [6.15] se obtiene lo siguiente:

$$\alpha_{si} = 10 \log_{10} e^2 \frac{M_{si}}{\rho_s} \left\{ \frac{k}{2} (S - 1)^2 \left[\frac{s}{s^2 + (S + \tau)^2} \right] + \frac{3}{4a_i} \left[\frac{0.29x^4}{0.95 + 1.28x^2 + 0.25x^4} \right] \right\} \quad [6.16]$$

A los efectos de visualizar la influencia de cada tamaño de partícula en la atenuación de la señal acústica, se construyó la Figura 6.1, a partir de la ecuación [6.16]. Para ello se tuvieron las siguientes consideraciones: partículas de cuarzo de diámetro uniforme y constante en una concentración de 1 kg m^{-3} (1 g/L), $c=1500 \text{ m/s}$, $\nu=1 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. En dicha figura se exponen 4 frecuencias acústicas correspondientes a las frecuencias de operación de ADCPs Teledyne RD Instruments Río Grande y Sontek M9. Si bien la ecuación se encuentra en función del radio de la partícula, para una mejor interpretación de la figura se utiliza el diámetro (micrones).

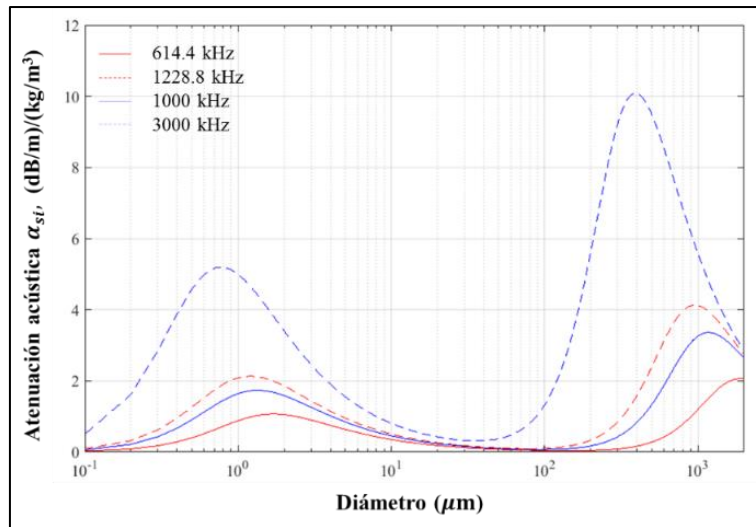


Figura 6.1.- Atenuación acústica (α_{si}) como función del diámetro para partículas uniformes de diámetro d_i , para distintas frecuencias acústicas

Se observa que la atenuación acústica debida al sedimento alcanza dos picos característicos, uno correspondiente al material fino (arcillas y limos) y otro al material grueso (arenas). Puede inferirse que este fenómeno es una manifestación de los procesos de atenuación viscosa y dispersión. Si bien ambas atenuaciones alcanzan diferentes límites como función de la frecuencia acústica aplicada, la influencia del grano grueso sería mayor comparada con la otra fracción. Adicionalmente, se observa un incremento de la atenuación acústica correlacionada con la frecuencia de pulso. Por otra parte, se observa que para las distintas frecuencias acústicas existe un rango de valores, entre los 10 y los 100 micrones, donde la atenuación acústica es baja (limos y arenas muy finas).

Bajo las mismas consideraciones que para la Figura 6.1, pero solamente para la frecuencia acústica de 1000 kHz, se construyó la Figura 6.2. Allí se muestra individualmente el efecto de las ecuaciones [6.12] y [6.14]. Se observa que la atenuación viscosa es causada por partículas del tamaño de arcillas a limos, mientras que la atenuación por dispersión es causada por partículas con diámetros medios en el rango de las arenas medias a muy gruesas.

Asimismo, de la ecuación [6.16] se manifiesta la dependencia lineal del coeficiente de atenuación acústica con la concentración de sedimentos de partículas de un diámetro determinado. Si se asume un diámetro constante de la distribución granulométrica, pequeños cambios en este pueden compensar o enmascarar cambios en la concentración que pueden llegar a un orden de magnitud (Thorne & Meral, 2008; Moate & Thorne, 2009).

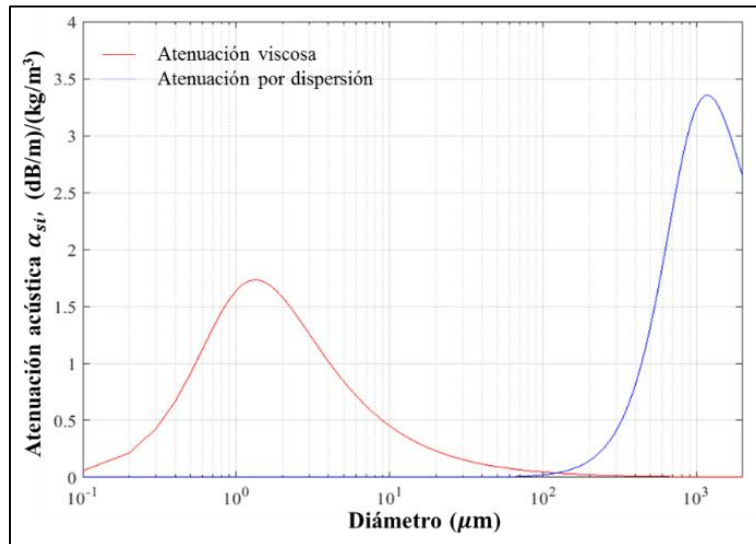


Figura 6.2.- Atenuación acústica viscosa ($\alpha_{si,visc}$) y por dispersión ($\alpha_{si,disp}$) como función del diámetro para partículas uniformes de diámetro d_i y frecuencia acústica de 1000 kHz.

6.2.1.4. Retrodispersión volumétrica de la señal acústica (S_v)

Se define como la suma de la retrodispersión (*backscatter* en inglés) de las partículas individuales por unidad de volumen (en decibeles). Para usos prácticos, se consideran las propiedades medias de las partículas, por lo tanto, S_v puede ser definido a través de la Ec. [6.17] dada por Thevenot & Kraus (1993) en Szupiany et al. (2019).

$$S_v = 10 \log_{10} n_b \langle \sigma_s \rangle \quad [6.17]$$

Allí, los valores medios esperados se indican entre corchetes $\langle \rangle$ y, por lo tanto, el término $\langle \sigma_s \rangle$, es la retrodispersión promedio de la sección transversal (en m^2), mientras que, n_b es el número de partículas por unidad de volumen (en m^{-3}).

La concentración de sedimentos suspendidos (M_s en $kg\ m^{-3}$) puede calcularse como se indica en [6.18], considerando el volumen de un número de partículas (n_b) de radio medio dado (a). De allí, puede despejarse el número de partículas y ser reemplazado en [6.17] obteniéndose [6.19].

$$M_s = n_b \rho_s \frac{4}{3} \pi a^3 \quad [6.18]$$

$$S_v = 10 \log_{10} \frac{3M_s \langle \sigma_s \rangle}{4\rho_s \pi a^3} \quad [6.19]$$

donde la retrodispersión promedio de la sección transversal es una función del radio de la partícula analizada, y una función de dispersión (σ_s) propuesta por Clay & Medwin (1977) (Eq. [6.20]).

$$\sigma_s = (a^2 f^2)/4 \quad [6.20]$$

En la ecuación [6.20], f es el factor de forma de las partículas. Esta variable ha sido estudiada por Thorne & Hanes (2002), Thorne & Meral (2008), y Moate & Thorne (2012; 2013) a partir de la teoría de dispersión para esferas rígidas y resultados de laboratorio para sedimentos no cohesivos. Dada una partícula individual, el factor de forma depende del tamaño, tipo y morfología de la misma, así como también de la frecuencia acústica aplicada. Su variación se describe como una función de x ($x=k a$).

Cuando el sedimento en suspensión es una nube de partículas con formas y tamaños irregulares, como es la condición normal en corrientes naturales, puede utilizarse la formulación presentada por Thorne & Meral (2008) para estimar f (Ecuación [6.21]). Esta expresión se caracteriza por su sencillez y la clara distinción entre dos procesos diferentes que dominan la dispersión acústica. Para $x < 1$, domina la dispersión por el fenómeno de Rayleigh (1877), mientras que para $x \gg 1$ domina la dispersión geométrica por interferencia de las partículas (Thorne & Meral, 2008). Esta dependencia puede observarse en la Figura 6.3.

$$\begin{aligned} f &= 1.25 x^2 \quad \forall x < 1 \\ f &= 1.1 \quad \forall x \gg 1 \end{aligned} \quad [6.21]$$

Existe una publicación más reciente de Moate & Thorne (2012), que propone la ecuación [6.22] para la estimación del factor de forma.

$$f = \rho_s^{0.5} \left[\frac{x^2 (1 - 0.25e^{-((x-1.5)/0.35)^2}) (1 + 0.6e^{-((x-2.9)/1.15)^2})}{42 + 28x^2} \right] \quad [6.22]$$

Esta expresión redonda en un cálculo más preciso de la variable en cuestión, como se observa en la Figura 6.4. No obstante, por simplicidad y ante una aparente indiferencia de los resultados finales (de concentración de sedimentos) en la forma de cálculo, se optó por utilizar en el presente trabajo la ecuación [6.21].

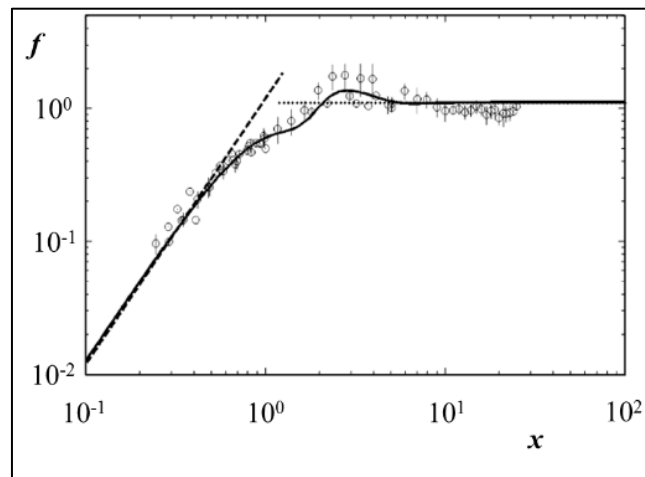


Figura 6.3.- Dependencia del factor de forma f , tomado de Thorne & Meral (2008), en comparación con datos de laboratorio.

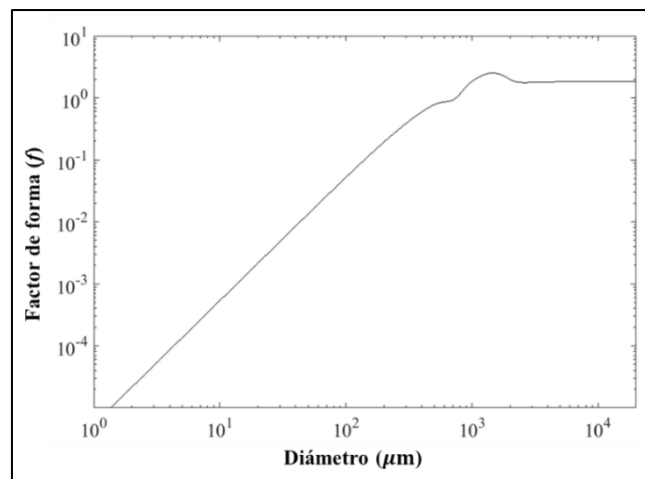


Figura 6.4.- Factor de forma f , calculado según la Ec. [4.19] para una frecuencia acústica de 1000 kHz.

Combinando las ecuaciones desde la [6.18] a la [6.21] se puede reformular S_v como se indica en [6.23],

$$S_v = 10 \log_{10} \sum K_{si} M_{si} \quad [6.23]$$

donde K_{si} es una función del tiempo y de la distancia a lo largo del eje central del haz acústico (r) (Domínguez Rúben, et al., 2020), dada por [6.24]. El subíndice i nuevamente indica la fracción granulométrica correspondiente.

$$K_{si}(t, r) = \frac{3a_i^2 f_i^2}{16\rho_s \pi a_i^3} \quad [6.24]$$

6.2.2. Método de inversión acústica

6.2.2.1. Inversión acústica para ADCPs Teledyne RD Instruments

La ecuación [6.25] se obtiene a partir de la sustitución de los cuatro términos de [6.1] por las ecuaciones [6.4], [6.5], [6.6] y [6.23] respectivamente.

$$\begin{aligned} & \underbrace{10 \log_{10}(10^{k_c(E-E_r)/10} - 1)}_{RL} \\ &= \underbrace{10 \log_{10}(LP_T)}_{EL} + C \\ & - \underbrace{\left[2 \left(\alpha_w + \sum \alpha_{si} \right) r + 10 \log_{10}(T_t r^2 \psi) \right]}_{S_c} \\ & + \underbrace{10 \log_{10} \sum K_{si} M_{si}}_{S_v} \end{aligned} \quad [6.25]$$

Sobre esta expresión se considera una distribución bimodal de sedimentos a saber: una fracción fina de diámetro representativo $d_1 < 62 \mu\text{m}$ (es decir, limos y arcillas), y una fracción gruesa de diámetro representativo $d_2 > 62 \mu\text{m}$ (en el rango de las arenas muy finas/medias). Esta caracterización granulométrica mencionada fue utilizada por Szupiany et al. (2019) para el río Paraná, y también aplicada por López Weibel et al. (2019) en el río Uruguay. Reemplazando las fracciones granulométricas mencionadas en [6.25] y trabajando algebraicamente sobre ella se obtiene la ecuación [6.26]. Esta última permite calcular la concentración de la fracción gruesa M_{s2} , que presenta mayor variabilidad en la sección transversal (Baronas, et al., 2020). M_{s1} se asume constante en la sección transversal, por cuanto puede ser estimado a partir de valores históricos o medido en cualquier posición de la sección transversal.

$$\begin{aligned}
& 10 \log_{10}(K_{s1}M_{s1} + K_{s2}M_{s2}) \\
& = 10 \log_{10}(10^{k_c(E-E_r)/10} - 1) + 2(\alpha_w + \alpha_{s1} + \alpha_{s2})r \\
& + 10 \log_{10}\left(\frac{T_t r^2 \psi^2}{L P_T}\right) + C
\end{aligned} \tag{6.26}$$

El proceso de inversión acústica consiste en la solución de la ecuación [6.26], sin conocer a priori la concentración de la fracción gruesa de sedimentos (Szupiany, et al., 2019). La dependencia de α_{s2} de la concentración M_{s2} , como se muestra en [6.16], establece un sistema implícito para la solución de la ecuación [6.26] que debe resolverse a través de un proceso iterativo.

6.2.2.2. Inversión acústica para ADCPs Sontek

Según Moore (2017) puede plantearse la ecuación [6.27] válida para equipos que miden el nivel de reverberación (RL) como SNR .

$$\begin{aligned}
& \underbrace{10 \log_{10}(K_{s1}M_{s1} + K_{s2}M_{s2})}_{\hat{S}_v} \\
& = \underbrace{SNR}_{RL} + \underbrace{2(\alpha_w + \alpha_{s1} + \alpha_{s2})r + 10 \log_{10}(T_t r^2 \psi^2)}_{\hat{S}_c} + A
\end{aligned} \tag{6.27}$$

Una comparación directa entre las ecuaciones [6.26] y [6.27] permite inferir que la variable A engloba los valores correspondientes al nivel emitido (EL), así como también las diferencias que puedan surgir entre la cuantificación del nivel de reverberación (RL) medido como SNR e intensidad de retrodispersión (E).

SNR es la *Relación Señal-Ruido* (*Signal-to-Noise Ratio* en inglés) y A es un valor desconocido correspondiente al ADCP Sontek con que se mida, y que se constituye en la incógnita de este problema, que se intentará resolver en el presente capítulo.

6.2.3. Software ASET

Acoustic Sediment Estimation Toolbox (ASET) (Domínguez Rúben, 2018; Domínguez Rúben, et al., 2020) es una herramienta de cálculo matemático que permite la resolución del proceso de inversión acústica, tal y como se describió en 6.2.2.1. Esto lo realiza a partir del procesamiento conjunto de la señal acústica, velocidad de flujo e información batimétrica extraídos del equipo ADCP (marca Teledyne RD Instruments), para estimar la distribución de las concentraciones del sedimento suspendido de fondo (M_{s2}) y su transporte (G_{ss}) sobre secciones transversales del cauce (cuando las mediciones se

realizan con la embarcación en movimiento) o sobre verticales, cuando se las realiza con la embarcación estática (anclada).

Esta herramienta permite el procesamiento de mediciones con ADCP para estimar el transporte de sedimentos de fondo en suspensión, de acuerdo a la metodología propuesta por Szupiany et al. (2019). Esta útil interfaz fue desarrollada en MATLAB®, para obtener de manera sencilla y rápida la calibración y aplicación a fin de relacionar las concentraciones del material que se encuentra en suspensión con la intensidad del rebote acústico registrados (Deines, 1999; Latosinski, et al., 2014; Szupiany, et al., 2019).

En su forma actual, ASET procesa la intensidad de señal acústica recibida (*RL*), velocidad del flujo y datos batimétricos medidos con los ADCPs de 600 kHz y 1200 kHz Rio Grande y RiverRay fabricados por Teledyne RD Instruments. ASET contiene dos módulos principales. El primero se denomina “Sediment Acoustic Calibration Module” (Módulo de Calibración), que permite al usuario desarrollar una correlación entre la intensidad de señal acústica recibida y la concentración de sedimentos suspendidos, medidos en distintos puntos a lo largo de una sección transversal, utilizando el método tradicional de muestreo puntual.

El segundo módulo, llamado “Suspended-Sediment Transport Module” (Módulo de Aplicación), se utiliza a los efectos de aplicar la calibración desarrollada y calcular la concentración de sedimentos suspendidos en cada celda de medición, tomada en una medición con ADCP. Esta concentración calculada en cada celda se combina para determinar el transporte de sedimentos en suspensión en la sección transversal relevada con ADCP.

ASET incorpora diferentes métodos de extrapolación para estimar la velocidad del flujo y la concentración de sedimentos en zonas donde el ADCP no registra estos valores de manera precisa.

La comparación del método de aforo sólido tradicional y el ASET muestra un rendimiento aceptable de esta técnica, con diferencias máximas inferiores al 50% para todos los casos (Domínguez Rúben, 2018). Este resultado representa un gran impacto para la comunidad científica que trabaja estudiando los grandes ríos del mundo, donde las mediciones tradicionales a menudo resultan operativamente difíciles de llevar a cabo, con altos costos, bajas resoluciones espaciales, peligrosidad en las maniobras involucradas y elevados tiempos de procesamiento de la información.

ASET proporciona una alta resolución espacial y temporal para la distribución de las concentraciones de sedimentos suspendidos de fondo. Esta resolución lograda permite un mayor entendimiento de los procesos morfodinámicos, requisito para el avance del conocimiento de grandes sistemas fluviales.

Es por ello, que a partir de los algoritmos utilizados en ASET, se consideró pertinente extender su aplicación para los equipos Sontek M9, propiedad de la CARU. *Esto último no solo con el objetivo de utilizarlo en futuras mediciones, sino también con la intención de procesar toda la base de datos de aforos disponibles a la fecha.*

6.3. Desarrollo de ASETSM9

Siguiendo lo expuesto, se presenta a continuación el desarrollo de un algoritmo y su programación, que pretende cumplimentar el mismo objetivo que el ASET, pero aplicado directamente a los datos relevados con el equipo Sontek M9® (se lo denominará SM9 a los efectos prácticos).

En este sentido, el software consta de dos módulos al igual que el ASET. El primero resuelve lo que se denominó problema inverso, y consiste en la estimación de la variable A de la ecuación [6.27], para determinada situación, a partir de la medición simultánea con equipos Sontek y Teledyne RD Instruments (RDI de aquí en adelante, de manera indistinta).

El segundo módulo, consiste en la aplicación y generalización del valor de A para mediciones donde no se cuenta con una medición simultánea entre ambos ADCPs.

6.3.1. Problema inverso

Se supone desconocido el valor de la variable A para una sección transversal determinada. Si se dispone de dos mediciones simultáneas con SM9 y RDI, puede suponerse que el resultado de concentraciones de la fracción gruesa (M_{s2}) a lo largo de la sección debe ser suficientemente similar para suponerse igual; máxime en grandes ríos de llanura donde los cambios hidrodinámicos son poco perceptibles en un lapso de una medición con ADCP en una sección transversal. Bajo estas hipótesis, puede trabajarse sobre las expresiones [6.26] y [6.27], igualarlas, y despejar de ellas A . A los efectos de identificación de las variables, se indica como subíndice la pertenencia de la misma a la medición con ADCP Teledyne RD Instruments (RDI) o Sontek M9 (SM9). Se explicita a continuación el proceso algebraico:

a) Se considera el término de la izquierda de las ecuaciones [6.26] y [6.27] de manera genérica, y se reemplaza K_{si} por su definición en la ecuación [6.24].

$$\begin{aligned} & 10 \log_{10}(K_{s1}M_{s1} + K_{s2}M_{s2}) \\ &= 10 \log_{10} \left(\frac{3a_1^2 f_1^2}{16\pi\rho_s a_1^3} M_{s1} + \frac{3a_2^2 f_2^2}{16\pi\rho_s a_2^3} M_{s2} \right) \end{aligned} \quad [6.28]$$

b) Se considera $x < 1$ para el cálculo del factor de forma f_i , que es válido para diámetros de hasta 240 micrones en una frecuencia acústica de 1000 kHz (Ec. [[6.21]). Con esta hipótesis, se expande la expresión de f_i en [4.29], utilizando la definición de $x = k a_i$, donde k se calcula como se establece en [6.29].

$$\begin{aligned} & 10 \log_{10}(K_{s1}M_{s1} + K_{s2}M_{s2}) \\ &= 10 \log_{10} \left(\frac{3a_1^2}{16\pi\rho_s a_1^3} (1.25 x_1^2)^2 M_{s1} + \frac{3a_2^2}{16\pi\rho_s a_2^3} (1.25 x_2^2)^2 M_{s2} \right) \\ &= 10 \log_{10} \left(\frac{3a_1^2}{16\pi\rho_s a_1^3} (1.25 (ka_1)^2)^2 M_{s1} \right. \\ &\quad \left. + \frac{3a_2^2}{16\pi\rho_s a_2^3} (1.25 (ka_2)^2)^2 M_{s2} \right) \quad [6.29] \\ &= 10 \log_{10} \left(\frac{3a_1^2}{16\pi\rho_s a_1^3} \left(1.25 \left(\frac{2\pi f_a}{c} a_1 \right)^2 \right)^2 M_{s1} \right. \\ &\quad \left. + \frac{3a_2^2}{16\pi\rho_s a_2^3} \left(1.25 \left(\frac{2\pi f_a}{c} a_2 \right)^2 \right)^2 M_{s2} \right) \end{aligned}$$

c) Se trabaja algebraicamente la expresión [6.29] y se obtiene [6.30].

$$\begin{aligned} & 10 \log_{10}(K_{s1}M_{s1} + K_{s2}M_{s2}) \\ &= 10 \log_{10} \left(\frac{3a_1^2}{16\pi\rho_s a_1^3} \left(1.25 \left(\frac{2\pi f_a}{c} a_1 \right)^2 \right)^2 M_{s1} \right. \\ &\quad \left. + \frac{3a_2^2}{16\pi\rho_s a_2^3} \left(1.25 \left(\frac{2\pi f_a}{c} a_2 \right)^2 \right)^2 M_{s2} \right) \\ &= 10 \log_{10} \left(\frac{3a_1^2}{16\pi\rho_s a_1^3} (1.25)^2 \left(\frac{2\pi f_a}{c} a_1 \right)^4 M_{s1} \right. \\ &\quad \left. + \frac{3a_2^2}{16\pi\rho_s a_2^3} (1.25)^2 \left(\frac{2\pi f_a}{c} a_2 \right)^4 M_{s2} \right) \quad [6.30] \\ &= 10 \log_{10} \left(\frac{3(1.25)^2 (2\pi)^4 a_1^2 a_1^4}{16\pi \rho_s a_1^3} \left(\frac{f_a}{c} \right)^4 M_{s1} \right. \\ &\quad \left. + \frac{3(1.25)^2 (2\pi)^4 a_2^2 a_2^4}{16\pi \rho_s a_2^3} \left(\frac{f_a}{c} \right)^4 M_{s2} \right) \\ &= 10 \log_{10} \left[\frac{3(1.25)^2 \pi^3}{1} \frac{1}{\rho_s} \left(\frac{f_a}{c} \right)^4 (a_1^3 M_{s1} + a_2^3 M_{s2}) \right] \\ &= 10 \log_{10} \left(145 \frac{1}{\rho_s} \frac{f_a^4}{c^4} \right) + 10 \log_{10}(a_1^3 M_{s1} + a_2^3 M_{s2}) \end{aligned}$$

d) La expresión [6.30] puede reemplazarse tanto en [6.26] como en [6.27], como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned}
& 10 \log_{10} \left(145 \frac{1}{\rho_s} \frac{f_{a,RDI}^4}{c^4} \right) + 10 \log_{10} (a_1^3 M_{s1} + a_2^3 M_{s2}) \\
& = 10 \log_{10} (10^{k_c(E-E_r)/10} - 1) + 2(\alpha_{w,RDI} + \alpha_{s1,RDI} + \alpha_{s2,RDI}) r_{RDI} \quad [6.31] \\
& + 10 \log_{10} \left(\frac{T_{t,RDI} r_{RDI}^2 \psi_{RDI}^2}{L_{RDI} P_{T,RDI}} \right) + C
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& 10 \log_{10} \left(145 \frac{1}{\rho_s} \frac{f_{a,SM9}^4}{c^4} \right) + 10 \log_{10} (a_1^3 M_{s1} + a_2^3 M_{s2}) \\
& = SNR + 2(\alpha_{w,SM9} + \alpha_{s1,SM9} + \alpha_{s2,SM9}) r_{SM9} \quad [6.32] \\
& + 10 \log_{10} (T_{t,SM9} r_{SM9}^2 \psi_{SM9}^2) + A
\end{aligned}$$

e) Se resta la ecuación [6.32] a la [6.31], considerando que tanto el diámetro a_i como las concentraciones deben ser iguales en ambos casos, y se obtiene [6.33].

$$\begin{aligned}
& 10 \log_{10} \left(145 \frac{1}{\rho_s} \frac{f_{a,RDI}^4}{c^4} \right) - 10 \log_{10} \left(145 \frac{1}{\rho_s} \frac{f_{a,SM9}^4}{c^4} \right) \\
& = \left[10 \log_{10} \left(10^{\frac{k_c(E-E_r)}{10}} - 1 \right) + 2(\alpha_{w,RDI} + \alpha_{s1,RDI} + \alpha_{s2,RDI}) r_{RDI} \right. \\
& \left. + 10 \log_{10} \left(\frac{T_{t,RDI} r_{RDI}^2 \psi_{RDI}^2}{L_{RDI} P_{T,RDI}} \right) + C \right] \quad [6.33] \\
& - [SNR + 2(\alpha_{w,SM9} + \alpha_{s1,SM9} + \alpha_{s2,SM9}) r_{SM9} \\
& + 10 \log_{10} (T_{t,SM9} r_{SM9}^2 \psi_{SM9}^2) + A]
\end{aligned}$$

f) Se trabaja algebraicamente la expresión anterior para despejar A .

$$\begin{aligned}
A = & \left[10 \log_{10} \left(145 \frac{1}{\rho_s} \frac{f_{a,RDI}^4}{c^4} \right) - 10 \log_{10} \left(145 \frac{1}{\rho_s} \frac{f_{a,SM9}^4}{c^4} \right) \right] \\
& - \left[10 \log_{10} \left(10^{\frac{k_c(E-E_r)}{10}} - 1 \right) + 2(\alpha_{w,RDI} + \alpha_{s1,RDI} + \alpha_{s2,RDI}) r_{RDI} \right. \\
& \left. + 10 \log_{10} \left(\frac{T_{t,RDI} r_{RDI}^2 \psi_{RDI}^2}{L_{RDI} P_{T,RDI}} \right) + C \right] \quad [6.34] \\
& + [SNR + 2(\alpha_{w,SM9} + \alpha_{s1,SM9} + \alpha_{s2,SM9}) r_{SM9} \\
& + 10 \log_{10} (T_{t,SM9} r_{SM9}^2 \psi_{SM9}^2)]
\end{aligned}$$

La expresión [6.34] permite obtener, a partir de las mediciones de ambos ADCPs, el valor de A para cada vertical de medición, y particularmente para cada celda de medición del ADCP SM9. Luego, puede realizarse un ajuste de A como función de la profundidad, y del tamaño de celda de medición que se utilizó en el equipo Sontek. La dependencia del tamaño de celda se basa en que ésta tiene una relación directa con la longitud del pulso acústico señalada en la ecuación [6.5] (Sontek, 2018). Asimismo, se señala que, si bien el equipo RDI utiliza un tamaño de celda constante en la medición de una sección transversal, Sontek utiliza el algoritmo de marca registrada SmartPulse® (Sontek, 2018), que ajusta del tamaño de celda en función de la velocidad y la profundidad total de la vertical, así como también del tipo de señal utilizada (*broadband*, coherente, incoherente o combinado).

En cuanto a la variación vertical de A , se entiende que la misma deriva de las diferencias de la potencia emitida y recibida, y las diferentes atenuaciones experimentadas por la señal acústica, así como también de la diferencia en la intensidad de referencia en la definición de las unidades decibeles.

Conociendo la expresión ajustada de A como función de la profundidad y el tamaño de celda de medición utilizada, puede realizarse una estimación de esta variable para las mediciones con SM9 donde no existe medición simultánea con un RDI.

6.3.2. Evaluación del valor A

Se reordena [6.34] agrupando los términos similares, para estudiar fenomenológicamente cada uno, y poder comprender la naturaleza de A .

$$\begin{aligned}
A &= \underbrace{\left[10 \log_{10} \left(10^{\frac{k_c(E-E_r)}{10}} - 1 \right) - SNR \right]}_{T_1} \\
&+ \underbrace{\left[2(\alpha_{w,RDI} + \alpha_{s1,RDI} + \alpha_{s2,RDI})r_{RDI} - 2(\alpha_{w,SM9} + \alpha_{s1,SM9} + \alpha_{s2,SM9})r_{SM9} \right]}_{T_2} \\
&+ \underbrace{\left[10 \log_{10}(T_{t,RDI}r_{RDI}^2\psi_{RDI}^2) - 10 \log_{10}(T_{t,SM9}r_{SM9}^2\psi_{SM9}^2) \right]}_{T_3} \\
&+ \underbrace{10 \log_{10} \left(\frac{1}{L_{RDI} P_{T,RDI}} \right)}_{T_4} + C + \underbrace{40 \log_{10} \left(\frac{f_{a,SM9}}{f_{a,RDI}} \right)}_{T_5}
\end{aligned} \tag{6.35}$$

El primer término, T_1 , representa la diferencia entre las maneras en que ambos ADCPs reportan la intensidad de señal recibida, es decir, el nivel de reverberación. Los ADCPs RDI requieren una calibración del nivel de ruido (E_r) que es caso-sensible, pero que se ha demostrado que para grandes ríos mantiene valores relativamente similares (Szupiany, et al., 2019).

Para el caso del SM9, el equipo reporta directamente el valor de SNR , que depende de la frecuencia, el tipo de pulso acústico y que se ve reflejado en el tamaño de celda de medición (H_B). Dentro de la literatura provista por el fabricante (Sontek, 2018), no se encuentra el valor de la intensidad de referencia ni el rango dinámico al que corresponde la medición, y dentro de los datos no se reporta el nivel de ruido de base. Por este motivo, no se pueden comparar las mediciones de SM9 con RDI en unidades absolutas.

Asimismo, como este término contiene los datos medidos que se utilizarán para el cálculo a posteriori de la concentración de sedimentos, también incluye la variabilidad espacio-temporal de esta variable, los errores aleatorios de la medición, y las simplificaciones teóricas y errores aleatorios de las demás variables involucradas en [6.35]. De la misma manera, incluye una constante correspondiente a la intensidad de señal emitida (EL) del SM9, que dependerá de la frecuencia acústica y el tipo de ping utilizado por el equipo, que como ya se indicó, puede inferirse a partir del tamaño de celda reportado (H_B).

En el segundo término de [6.35], T_2 , puede descomponerse la distancia desde el transductor como se indica en la Figura 6.5. De esta manera, esta distancia vertical (r_v) puede extraerse como factor común.

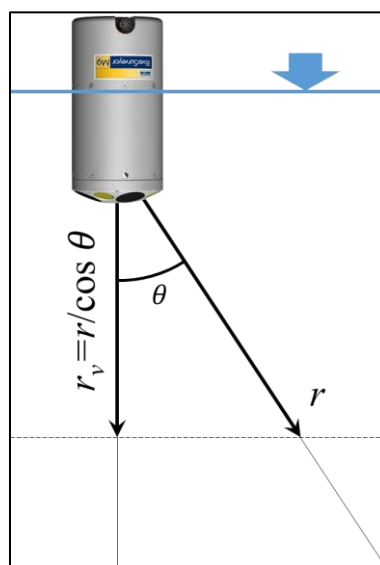


Figura 6.5.- Descomposición de la distancia desde el transductor.

$$T_2 = 2r_v \left\{ (\alpha_{w,RDI} + \alpha_{s1,RDI} + \alpha_{s2,RDI}) / \cos \theta_{RDI} \right. \\ \left. - (\alpha_{w,SM9} + \alpha_{s1,SM9} + \alpha_{s2,SM9}) / \cos \theta_{SM9} \right\} \quad [6.36]$$

Asimismo, suponiendo una temperatura del fluido aproximadamente constante en la vertical, hipótesis que es válida en flujos poco profundos (Jirka & Uijttewaal, 2004), puede inferirse que la atenuación debida al fluido (α_w) será solamente función de la frecuencia acústica aplicada y de la temperatura media del mismo.

En cuanto a la atenuación debida a la presencia de sedimentos, esta será función de la frecuencia acústica aplicada, del diámetro (radio) y la concentración de sedimentos a lo largo del haz acústico. Luego, [6.36] puede reescribirse según las definiciones de los coeficientes de atenuación (α), como se señala a continuación:

$$T_2 = 2r_v \left\{ \left(\frac{29.36 \times 10^{-6} f_{a,RDI}^2}{21.90 \times 10^{[6 - (\frac{1520}{T} + 273)]}} \right. \right. \\ + 10 \log_{10} e^2 \frac{M_{s1}}{\rho_s} \left\{ \frac{k_{RDI}}{2} (S - 1)^2 \left[\frac{S_{1,RDI}}{S_{1,RDI}^2 + (S + \tau_{1,RDI})^2} \right] \right. \\ \left. + \frac{3}{4a_1} \left[\frac{0.29x_{1,RDI}^4}{0.95 + 1.28x_{1,RDI}^2 + 0.25x_{1,RDI}^4} \right] \right\} \\ + 10 \log_{10} e^2 \frac{M_{s2}}{\rho_s} \left\{ \frac{k_{RDI}}{2} (S - 1)^2 \left[\frac{S_{2,RDI}}{S_{2,RDI}^2 + (S + \tau_{2,RDI})^2} \right] \right. \\ \left. + \frac{3}{4a_2} \left[\frac{0.29x_{2,RDI}^4}{0.95 + 1.28x_{2,RDI}^2 + 0.25x_{2,RDI}^4} \right] \right\} \Bigg) / \cos \theta_{RDI} \\ - \left(\frac{29.36 \times 10^{-6} f_{a,SM9}^2}{21.90 \times 10^{[6 - (1520/T + 273)]}} \right. \\ + 10 \log_{10} e^2 \frac{M_{s1}}{\rho_s} \left\{ \frac{k_{SM9}}{2} (S - 1)^2 \left[\frac{S_{1,SM9}}{S_{1,SM9}^2 + (S + \tau_{1,SM9})^2} \right] \right. \\ + \frac{3}{4a_1} \left[\frac{0.29x_{1,SM9}^4}{0.95 + 1.28x_{1,SM9}^2 + 0.25x_{1,SM9}^4} \right] \Bigg\} \\ + 10 \log_{10} e^2 \frac{M_{s2}}{\rho_s} \left\{ \frac{k_{SM9}}{2} (S - 1)^2 \left[\frac{S_{2,SM9}}{S_{2,SM9}^2 + (S + \tau_{2,SM9})^2} \right] \right. \\ \left. + \frac{3}{4a_2} \left[\frac{0.29x_{2,SM9}^4}{0.95 + 1.28x_{2,SM9}^2 + 0.25x_{2,SM9}^4} \right] \right\} \Bigg) / \cos \theta_{SM9} \Bigg\} \quad [6.37]$$

Se reemplazan en [6.37] las definiciones de k , s , y x , y se obtiene una función que se expresa, por simplicidad, como funciones (φ_i) de las variables de las que depende.

$$\begin{aligned}
& T_2 \\
& = 2r_v \left\{ \frac{\left(\varphi_1(f_{a,RDI}, T) + \varphi_2(f_{a,RDI}, M_{s1}, \rho_{s1}, a_1) + \varphi_2(f_{a,RDI}, M_{s2}, \rho_{s2}, a_2) \right)}{\cos \theta_{RDI}} \right. \\
& \quad \left. - \frac{\left(\varphi_1(f_{a,SM9}, T) + \varphi_2(f_{a,SM9}, M_{s1}, \rho_{s1}, a_1) + \varphi_2(f_{a,SM9}, M_{s2}, \rho_{s2}, a_2) \right)}{\cos \theta_{SM9}} \right\} \quad [6.38]
\end{aligned}$$

En [6.37] y [6.38] se observa que los términos que corresponden a α_{s1} , para ambos ADCPs, serán constantes para un diámetro de sedimentos determinado. En contraposición, α_{s2} seguirá la distribución de M_{s2} en la vertical. Y, como fuera mencionado, α_w será constante para cada frecuencia acústica.

Para temperaturas, diámetros y concentraciones típicas del río Uruguay, y teniendo en cuenta las frecuencias cercanas a 1 MHz, apropiadas para las mediciones en el rango 5-20 m, puede demostrarse que el valor de la atenuación por el fluido (α_w) es un orden de magnitud superior a la atenuación causada por el sedimento suspendido, tal y como lo es para el río Paraná (Szupiany, et al., 2019). Por este motivo, el término T_2 dependerá, en mayor medida, de la frecuencia acústica aplicada.

El término T_3 contempla la temperatura del transductor, la distancia medida desde éste y la corrección por campo cercano. Si la temperatura puede asumirse igual para ambos ADCPs, T_3 puede reescribirse como:

$$\begin{aligned}
T_3 & = 10 \log_{10}(T_{t,RDI} r_{RDI}^2 \psi_{RDI}^2) - 10 \log_{10}(T_{t,SM9} r_{SM9}^2 \psi_{SM9}^2) \\
& = 10 \log_{10} \left(\frac{T_{t,RDI} r_{RDI}^2 \psi_{RDI}^2}{T_{t,SM9} r_{SM9}^2 \psi_{SM9}^2} \right) \\
& = 10 \log_{10} \left[\frac{(r_v / \cos \theta_{RDI})^2 \psi_{RDI}^2}{(r_v / \cos \theta_{SM9})^2 \psi_{SM9}^2} \right] \quad [6.39] \\
& = 10 \log_{10} \left[\frac{(\cos \theta_{SM9})^2 \psi_{RDI}^2}{(\cos \theta_{RDI})^2 \psi_{SM9}^2} \right] = 10 \log_{10} \left(0.93 \frac{\psi_{RDI}^2}{\psi_{SM9}^2} \right) \\
& = -0.315 + 20 \log_{10} \left(\frac{\psi_{RDI}}{\psi_{SM9}} \right)
\end{aligned}$$

De la ecuación [6.39] se observa que el término T_3 dependerá exclusivamente de la frecuencia acústica (y del tamaño del transductor asociado a esta - α_t). En la Tabla 6.1 se muestran los valores de profundidad a la que se alcanza el valor de campo cercano $\psi < 1.01$ para cada frecuencia acústica de cada ADCP y su radio de transductor asociado. Gráficamente, en la Figura 6.6 se presenta la evolución del factor de campo cercano (ψ)

para cada frecuencia. Asimismo, en la Figura 6.7 se muestra la evolución del término T_3 en función de la relación de frecuencias disponibles en los ADCPs utilizados. Allí se puede observar que la distancia vertical desde el transductor en donde el término T_3 tiene influencia, para el peor de los casos (RDI 600 kHz y SM9 3000 kHz), es alrededor de 2.5 m.

Tabla 6.1.-Distancia vertical para alcanzar

ADCP (Frecuencia)	α_t (m)	r_v (m) para alcanzar $\psi < 1.01$
Sontek M9 (1000 kHz)	0.0127	1.00
Sontek M9 (3000 kHz)	0.0195	1.59
RDI Río Grande (600 kHz)	0.0365	0.72
RDI Río Grande (1200 kHz)	0.0270	0.63

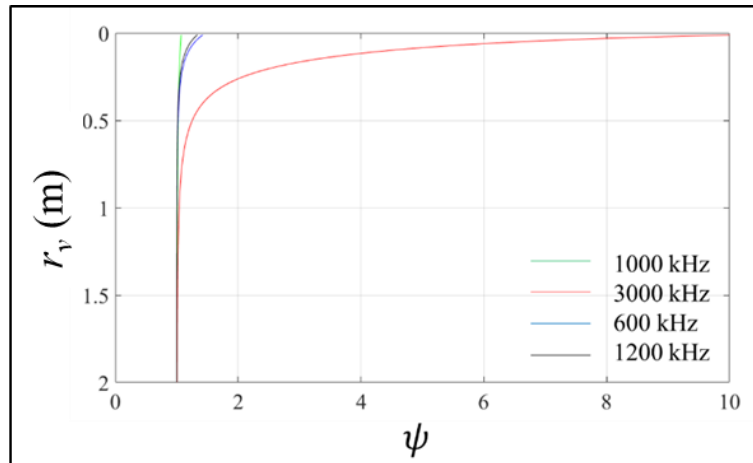


Figura 6.6.- Factor de corrección de campo cercano (ψ).

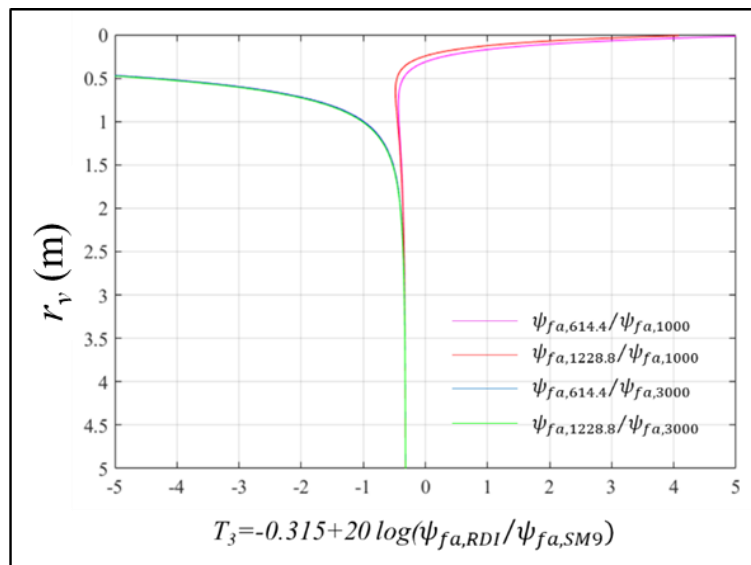


Figura 6.7.- Término T_3 .

El término T_4 remite directamente a la manera en que los ADCPs RDI contabilizan la energía emitida. La ausencia de una contraparte para este término correspondiente a los ADCPs Sontek indica que este término tendrá un valor independiente a la frecuencia utilizada en el SM9.

$$T_4 = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{L_{RDI} P_{T,RDI}} \right) + C \quad [6.40]$$

Como ya se mencionó, en [6.40] C y L son constantes, P_T también puede asumirse constante si no hay variaciones significativas en el voltaje y la intensidad de corriente de la alimentación al ADCP. Consecuentemente, T_4 también es constante.

En último lugar, el término T_5 es una constante para cada vertical de medición, que depende de la relación entre frecuencias acústicas aplicadas en cada ADCP. Este valor tiene diferente incidencia en la composición de A dependiendo de las frecuencias de los ADCPs, por ejemplo, si se utiliza un RDI Río Grande con 1200 kHz, T_5 tiene un valor de -3.6 dB o 15.5 si el SM9 utiliza 1000 kHz o 3000 kHz respectivamente.

$$T_5 = 40 \log_{10} \left(\frac{f_{a,SM9}}{f_{a,RDI}} \right) \quad [6.41]$$

Del análisis de los términos componentes de [6.35], puede observarse que solo los tres primeros varían, en cada vertical, con la profundidad. Es decir, una función que ajuste a la variable A deberá tener en cuenta las variables de las que estos términos dependan.

En cuanto a T_4 y T_5 , el primero solo depende del ADCP RDI utilizado, por lo que será una constante para cada vertical, mientras que el segundo será una función de la frecuencia que utiliza el equipo SM9 en cada vertical.

A partir de lo aquí inferido, puede señalarse que A dependerá de 5 funciones que caracterizan a cada término de la ecuación [6.35], tal y como se señala en [6.42], donde Φ_i expresa una función de las variables indicadas.

$$A = \underbrace{\Phi_1(r_v, f_{a,SM9}, H_B)}_{T_1} + \underbrace{\Phi_2(r_v, f_{a,SM9})}_{T_2} + \underbrace{\Phi_3(r_v, f_{a,SM9})}_{T_3} + \underbrace{\Phi_4(RDI)}_{T_4} + \underbrace{\Phi_5(f_{a,SM9})}_{T_5} \quad [6.42]$$

Las funciones presentadas en [6.42] son a priori desconocidas. Estas deben ser ajustadas con los datos de los aforos simultáneos con SM9 y RDI, no solo para investigar su forma sino también los coeficientes de ajuste que aseguren una buena representación del valor.

En Nardin et al. (2021) se comprobó que A puede aproximarse con la expresión empírica presentada en [6.43], que es una relación lineal entre los logaritmos de A y r_v , siendo a y b coeficientes de ajuste.

$$\log(-A) = a \log_{10}(r_v) + b \quad [6.43]$$

Habiéndose realizado la desagregación en términos, se puede inferir que las funciones Φ_4 y Φ_5 serán constantes para cada vertical, y que Φ_3 puede ser calculada con su definición teórica, contando con los datos del RDI con el que se realizó la calibración.

La función Φ_2 , bajo la hipótesis de predominancia de la dispersión acústica causada por el fluido ya expuesta, tendrá una forma lineal [6.44] que dependerá de la frecuencia y el tamaño de celda utilizado.

$$T_2 = a_2 r_v + b_2 \quad [6.44]$$

Por último, Φ_1 es la función con mayor dificultad para establecer su forma teórica, ya que depende de las características acústicas de cada ADCP, y de la medición realizada. Utilizando el concepto de intensidad de señal acústica relativa, puede inferirse que el nivel de reverberación recibido será escalable con la longitud del pulso (que tiene relación directa con el tamaño de celda).

En Nardin et al. (2022) se definió a la función Φ_1 como se señala en [6.45], esta expresión será corroborada en la presente tesis. En dicha ecuación, a_1 y b_1 son coeficientes que se ajustan en función de los datos disponibles y el tamaño de celda.

$$T_1 = a_1 \log_{10}(r_v) + b_1 \quad [6.45]$$

6.3.3. Problema directo

Para mediciones realizadas con un ADCP Sontek M9® que no cuentan con una medición simultánea con un equipo RDI, el valor de A puede inferirse a través de la generalización de las constantes de ajuste de los términos T_1 y T_2 (ecuaciones [6.44] y [6.45]).

Es decir, si se calculan las constantes a_1 , b_1 , a_2 y b_2 , en un mismo tramo de río, estas pueden considerarse válidas en la medida de que se mantengan las hipótesis bajo las cuales se realizó el ajuste. Luego, a partir de estas, se puede calcular A para una medición diferente, y con este valor resolver la ecuación [6.27].

No obstante, considerando el margen de error de 50% reportado por Domínguez Rúben (2018), y el error aceptable esperable del 25%, en mediciones de transporte de sedimentos

en suspensión, tal y como lo definió van Rijn (1993), obtener al menos una aproximación de esta magnitud de la variable transporte de sedimentos, permitiría un avance sustancial en el conocimiento del río. Más aún, si se tiene en cuenta la potencial aplicación a la base de datos de casi 1000 aforos que existe en el río Uruguay.

6.3.4. Código ASETSM9

Siguiendo la lógica del software ASET, se trabajó en lenguaje MATLAB®, codificando los algoritmos para la solución de las ecuaciones correspondientes tanto al problema directo como al problema inverso. El código consiste en 5 *scripts* y 17 *funciones* (utilizando el argot de MATLAB®) que administran los datos y resuelven las ecuaciones correspondientes.

El script inicial permite seleccionar si se resolverá el problema directo, el problema inverso o ambos secuencialmente. También en este script se permite seleccionar entre los mecanismos de extrapolación de la velocidad y la concentración de sedimentos para el problema directo. Para extender el perfil de velocidad, se desarrolló solamente la opción de utilizar la ley de la pared, tal y como se explica en Domínguez Rúben (2018). Para la extensión del perfil de concentración de sedimentos en suspensión, se programaron las funciones correspondientes al perfil de Rouse, la extrapolación con los últimos tres puntos, o un valor constante (el último valor) de la misma manera que en Domínguez Rúben (2018).

6.3.4.1. Módulo 1: resuelve el problema inverso

A continuación, se describe la sucesión algorítmica que se utiliza en el software:

- a) Archivos de entrada: el código se alimenta con un archivo *.mat* exportado desde el software ASET, que es el resultado de una medición con ADCP Teledyne RDI procesada con dicho software Domínguez Rúben et al. (2020), y otro archivo *.mat* de salida del software RiverSurveyor®. Este último es la suite de medición y procesamiento que provee Sontek® para su equipo ADCP M9®. Estos archivos deben ser mediciones en la misma sección transversal, y con cierta simultaneidad relativa al tiempo de medición.
- b) Grillado: una vez leídos los archivos de entrada, es necesario compatibilizar la distribución espacial donde se cuenta con la información en la sección transversal (grilla). Para ello, se proyectan

ambas mediciones, sobre una misma sección transversal teórica. Luego, se interpolan los datos provenientes de RDI a la grilla de medición de SM9, es decir, respetando las progresivas y los tamaños de celda definidos en la medición.

- c) Se leen del archivo de ASET los parámetros de sedimentos utilizados (diámetros, densidades), y los parámetros acústicos correspondientes al ADCP RDI utilizado. Asimismo, se leen y calculan los parámetros acústicos correspondientes al ADCP Sontek M9.
- d) Se calcula A para cada punto de la grilla, y luego se utiliza la ecuación [6.42] para generalizar su valor en función del tamaño de celda utilizado en cada vertical de medición del SM9.
- e) Archivos de salida: consiste en un archivo *.mat*, que contiene los resultados del procesamiento, las variables intermedias y, sobre todo, los coeficientes de las ecuaciones [6.44] y [6.45] para el cálculo de A .

6.3.4.2. Módulo 2: resuelve el problema directo

De la misma manera que para el módulo 1, aquí se describe sucintamente el algoritmo utilizado.

- a) Archivos de entrada: el programa requiere la asignación de un archivo compatible con el formato del archivo de salida del módulo 1. Si se ejecutaron ambos módulos simultáneamente, tomará el anterior. En el caso contrario, se debe especificar el nombre y ubicación del archivo con los datos emanados del módulo 1.

El segundo valor de entrada consiste en un archivo *.mat* correspondiente a una medición realizada con Sontek M9, en la cual sea hipotéticamente válida la generalización de A realizada en el módulo 1.

- b) Grillado y parámetros: al igual que en el módulo 1, se calculan los valores de grilla y parámetros acústicos válidos para la medición, utilizando los datos de RDI del módulo 1, y los correspondientes a la medición ingresada en el módulo 2.
- c) Cálculo de la concentración: en este paso se resuelve la ecuación [6.27], utilizando [6.42] y las correspondientes funciones ajustadas para el cálculo de A . Este paso contempla la ejecución de un proceso iterativo que permite arribar a un valor de concentración de sedimentos de fondo en suspensión para cada celda. Tal y como se señala en Domínguez Rúben (2018), la atenuación acústica causada por las

partículas cuyo diámetro corresponden a la fracción gruesa (α_{s2}) se calcula con la ecuación [6.16] como una función del promedio de las concentraciones (M_{s2}) en las celdas suprayacentes.

- d) Cálculo del caudal líquido y sólido medidos: se utilizan las dimensiones de las celdas para este cálculo, multiplicado por la cantidad escalar normal a la celda. Luego se suman todos los resultados parciales. De esta manera se obtiene, para ambas variables, los valores medidos de las mismas.
- e) Extrapolación del perfil de velocidad: se utiliza la ley de la pared (Schlichting & Gersten, 2000; García, 2008) para extrapolar las velocidades desde el fondo hasta la superficie en cada vertical. Esta se expresa con la ecuación [6.46], donde u es la velocidad perpendicular a la sección transversal, z es la elevación de cada celda desde el fondo, y las constantes a y b provienen de la regresión lineal.

$$\ln u = a \ln z + b \quad [6.46]$$

- f) Extrapolación del perfil de concentraciones: Se programaron tres métodos para extrapolar el perfil de concentraciones obtenido. El primero de ellos utiliza la bien conocida distribución de Rouse (Vanoni, 1975) - Ecuación [6.47] - para completar la concentración en el perfil vertical de medición desde el fondo hasta la superficie de agua.

$$M_{s2}(z) = M_{s2\ ref} \left[\frac{(H - z)/z}{(H - z_{ref})/z_{ref}} \right]^{N_R} \quad [6.47]$$

En [6.47], H es la profundidad total en la vertical, z y M_{s2} son la distancia del fondo y la concentración de sedimentos según ya se definió. N_R es el denominado “número de Rouse”, que se define según [6.48],

$$N_R = \frac{w_s}{\kappa u_*} \quad [6.48]$$

donde w_s es la velocidad terminal de caída asociada al tamaño de partícula (van Rijn, 1984b), $\kappa = 0.41$ es la constante de von Karman (Schlichting & Gersten, 2000), u_* es la velocidad de corte (ídem cita anterior) y $M_{s2\ ref}$ es la concentración de referencia en la interface entre la carga de lecho y la carga en suspensión, dada a una elevación de referencia desde el fondo (z_{ref}). Para Vanoni (1975), $z_{ref}=0.05 H$.

Tomando el logaritmo de ambos lados de la ecuación [6.47], esta puede reescribirse de la siguiente manera:

$$\log[M_{s2}(z)] = \log[M_{s2\ ref}] + N_R \log \left[\frac{(H - z)/z}{(H - z_{ref})/z_{ref}} \right] \quad [6.49]$$

De esta manera, para cada vertical, la regresión lineal de todas las concentraciones medidas dará como resultado una pendiente N_R y una ordenada al origen igual a $\log[M_{s2\ ref}]$. Luego, con dichos valores puede completarse cada vertical con los valores en la zona superior e inferior a la zona medida.

En caso de no contar con un mínimo de 3 puntos para el ajuste de la ecuación [6.49], se utiliza un valor constante para toda la vertical.

El segundo método utiliza una extrapolación lineal de los tres primeros y tres últimos puntos, y el tercero asume un valor constante tanto para el fondo como para la superficie, igual a la concentración del último punto medido con datos. Estos métodos se seleccionan en el script de inicio del software.

- g) Cálculo del caudal líquido y sólido estimados: con los perfiles de velocidad y de concentraciones de sedimentos ajustados, se realiza el cálculo de la velocidad y la concentración para cada vertical. Esto se integra en la sección transversal, y se agregan las zonas no medidas, cerca de las márgenes. Para esto último se utiliza un triángulo cuyo valor de velocidad o concentración es la misma que la primera (o última) vertical, y cero sobre la margen.
- h) Se guardan los resultados en un archivo específico *.mat* que contiene los resultados de este procesamiento.

El código se completa con los algoritmos para la salida gráfica y de guardado de la información de acuerdo al o los módulos ejecutados. Asimismo, se guarda un archivo con un sumario de resultados, y las estadísticas del tiempo de ejecución.

6.4. Datos para el desarrollo y testeo

Para el desarrollo y testeo del software se utilizó la información relevada en la campaña de aforo líquido realizada el 18 de diciembre de 2018, en el Puente Internacional General Artigas. En ésta, se realizaron dos aforos consecutivos, el primero que consistió en dos pasadas transversales con el equipo ADCP Teledyne RD Instruments Río Grande, y el segundo que igualmente constó de dos pasadas con el ADCP Sontek M9, tal y como se describió en el título 5.3.2.1. En la Figura 6.8, Figura 6.9, Figura 6.10 y Figura 6.11 se presentan los resultados de dichas mediciones en sus respectivos softwares de recolección.

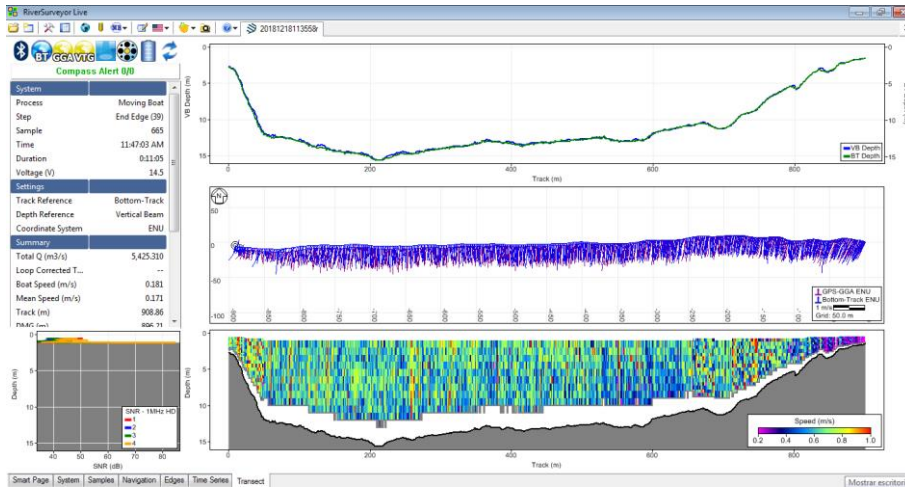


Figura 6.8.- Medición 1 con Sontek M9, 18/12/2018. Software RiverSurveyor®.

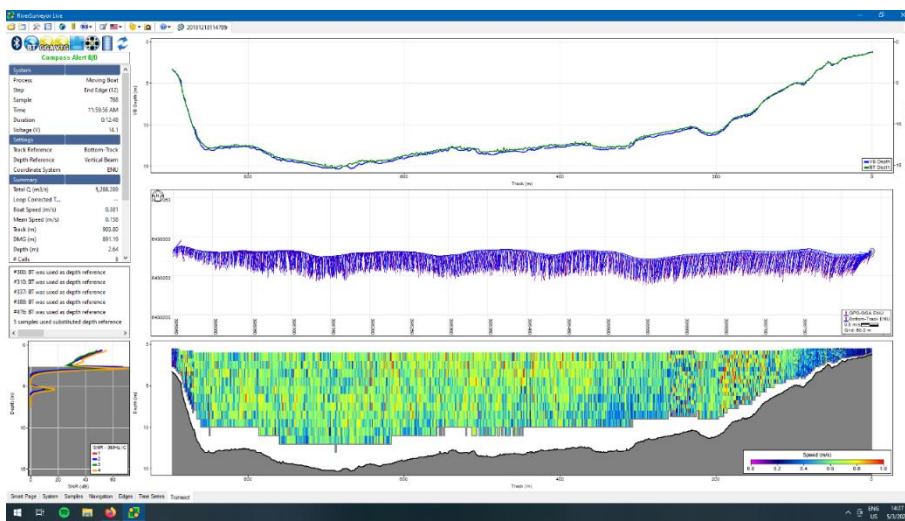


Figura 6.9.- Medición 2 con Sontek M9, 18/12/2018. Software RiverSurveyor®.

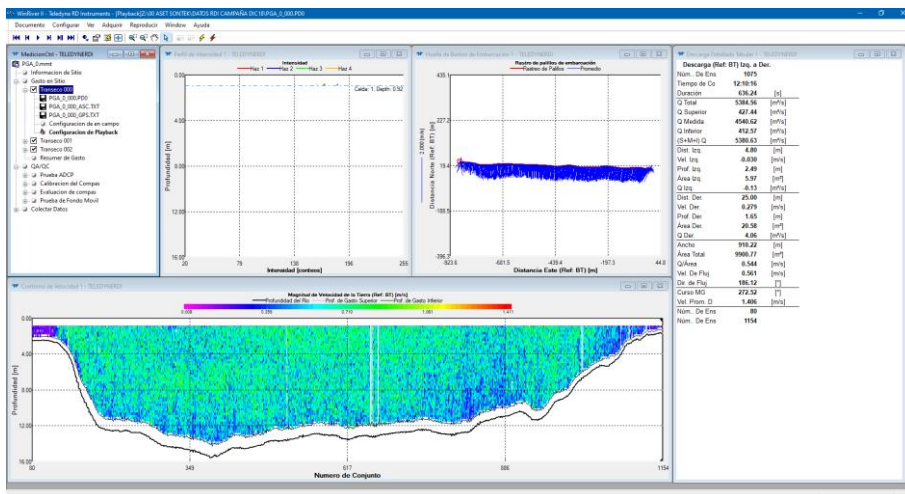


Figura 6.10.- Medición 1 con Teledyne RDI Río Grande, 18/12/2018. Software WinRiver II®.

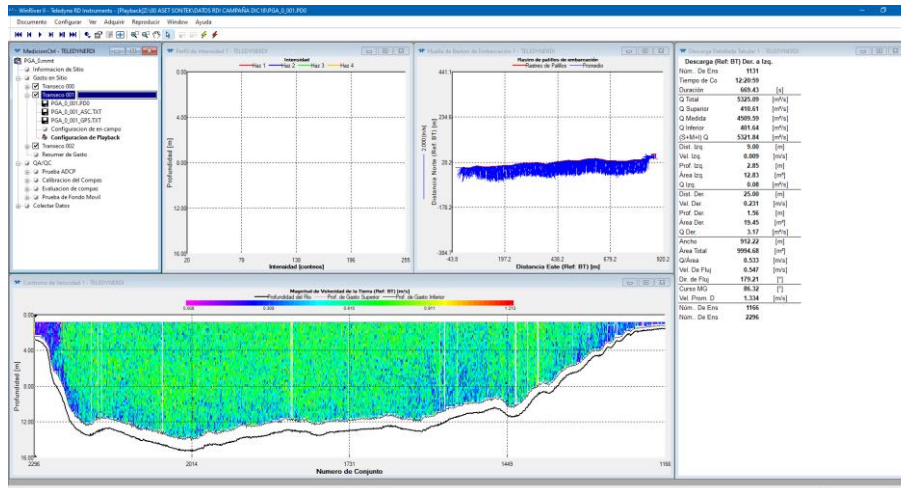


Figura 6.11.- Medición 2 con Teledyne RDI Río Grande, 18/12/2018. Software WinRiver II®.

La información correspondiente a la primera pasada del equipo RDI fue procesada con el Software ASET, con la calibración válida para el río Uruguay establecida en López Weibel et al. (2019). En la Figura 6.12 se muestra el procesamiento realizado. Para ello se utilizó un diámetro de sedimentos $d_1=0.0035$ mm (arcilla) y $d_2=0.145$ mm (arena fina), y una concentración $M_{s1} = 0.0185$ mg/L.

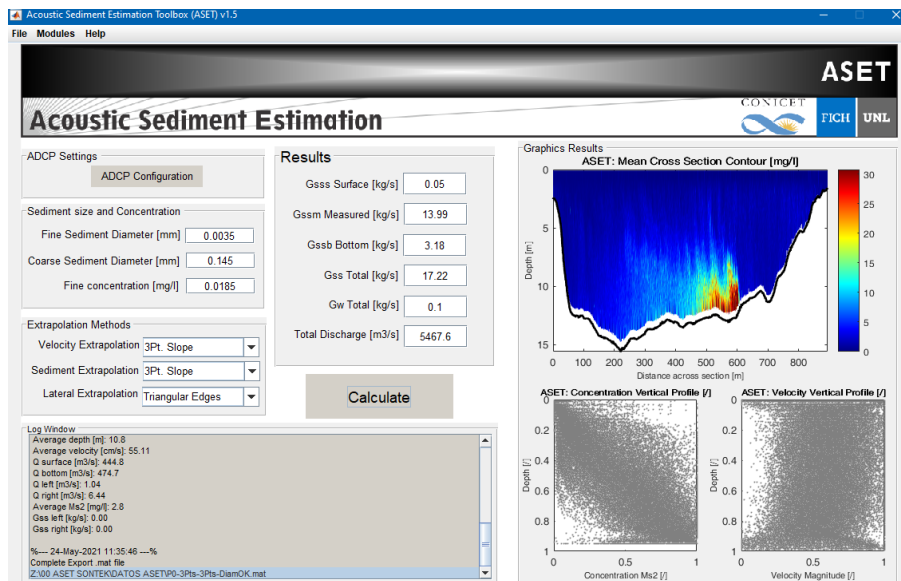


Figura 6.12.- Procesamiento con ASET de la medición realizada con ADCP RDI.

6.5. Resultados y discusión

6.5.1. Resultados Módulo 1

Como ya se mencionó, el objetivo de este módulo es determinar el valor de A que pueda ser ajustado por las expresiones de términos que lo componen, a los efectos de utilizar

estos valores para aplicarlos a mediciones realizadas con el ADCP Sontek M9 que no tengan una medición simultánea con un ADCP RDI.

Este módulo fue ejecutado en una computadora personal, con un procesador Intel Core i5 tercera generación de 2.9GHz, y 8 Gb de memoria RAM., en un tiempo promedio de 9.56 segundos en 30 corridas (entre 8.14 y 10.18 segundos).

6.5.1.1. Cálculo de A

En primera instancia, y a los efectos de computar los valores de A correspondientes al Sontek SM9 se ejecutó el módulo 1 del software ASETSM9. El primer paso para ello, como se mencionó, consistió en el grillado de la información de RDI en función de la grilla de medición del SM9. En este caso, esta operatoria resultó en pérdida de información debido a que la resolución espacial de RDI fue mayor. Esto último se debe particularmente a que se fijó un tamaño de celda vertical de 0.25m, mientras que el algoritmo SmartPulse® de Sontek calculó valores de 1 m para la mayor parte de la sección transversal. Una vez realizada esta operación, se calculó A para cada punto de la grilla (Figura 6.13).

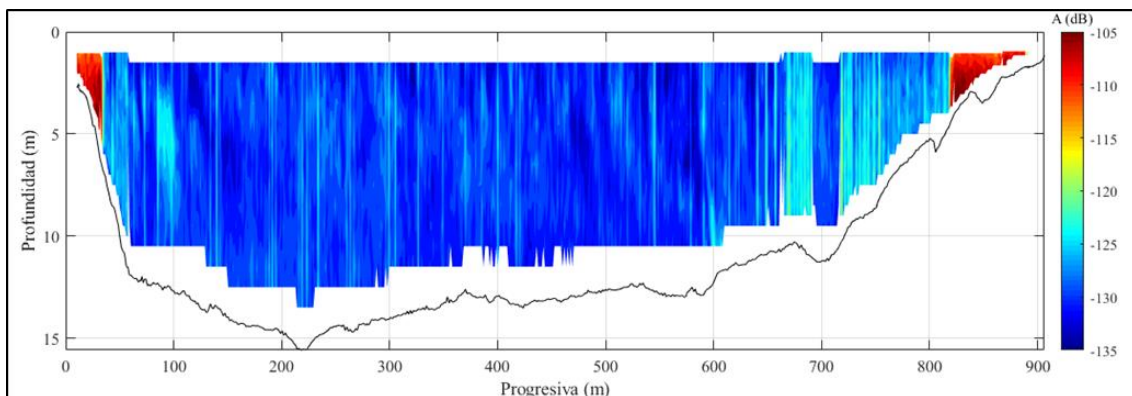


Figura 6.13.- Valores de A para cada punto de la grilla.

6.5.1.2. Variación de A respecto de la vertical.

Teniendo en cuenta la evaluación de la variable A expuesta en el punto 6.3.2, se construyó la Figura 6.14, que expone la variación en la vertical de dicha variable.

Siguiendo las ecuaciones [6.35] y [6.42], se analizó la variable A en función del tamaño de celda (H_B) y de la frecuencia acústica de medición (f_a) con Sontek M9, respecto de su distribución en la vertical. Los resultados se muestran en la Figura 6.15, de la cual se observa que el valor de A , para las verticales relevadas con la frecuencia de 1000 kHz, se

acerca al valor de la variable $C=129.5$ dB de la ecuación [6.26], informado por Deines (1999) para el RDI Río Grande.

No obstante, queda claro que tanto para tamaños de celda pequeños, y para la frecuencia de 3000 kHz, existe otra distribución vertical que no puede ser considerada constante. Esta distribución se analizará a continuación a partir de la descomposición en términos de la ecuación [6.35].

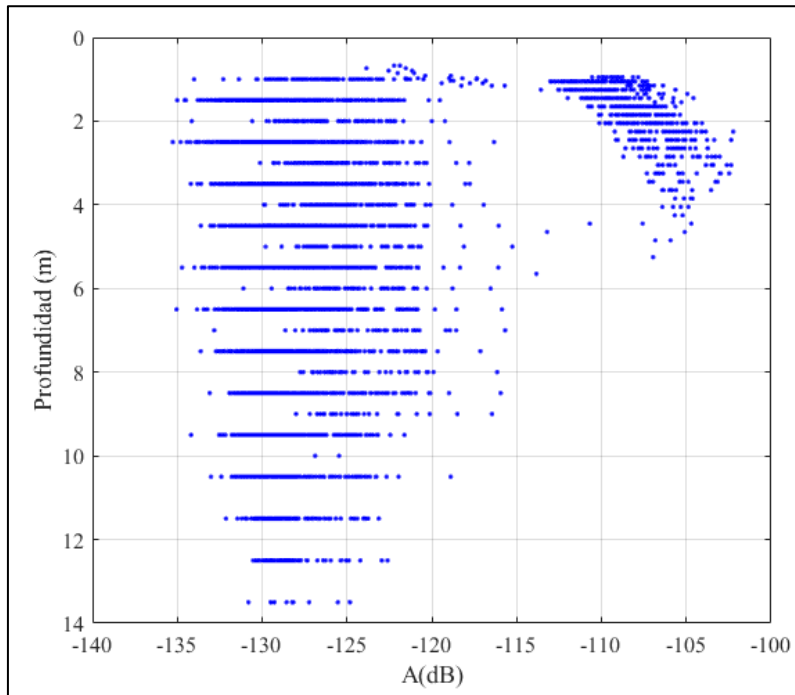


Figura 6.14.- Valor de la variable A en función de la profundidad.

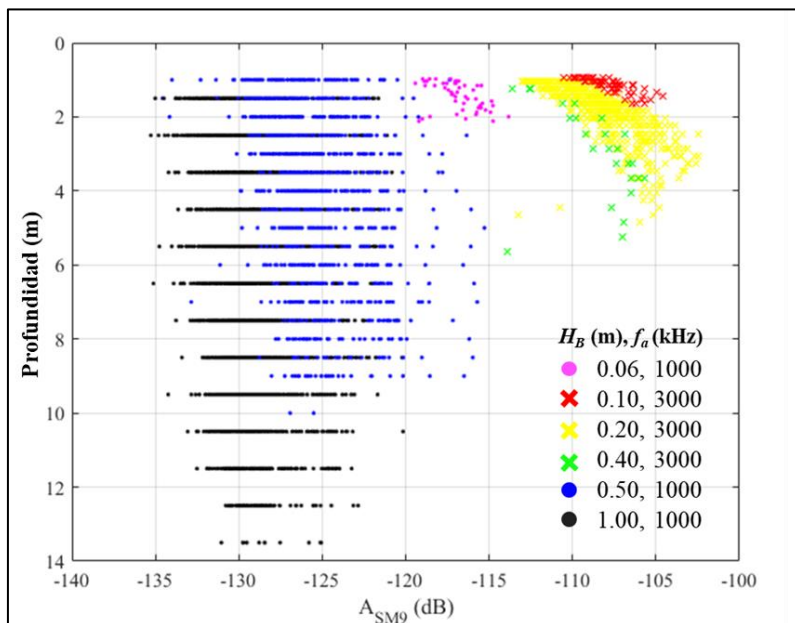


Figura 6.15.- A como función de la profundidad, según el tamaño de celda y la frecuencia de la medición.

6.5.1.3. Descomposición de A en términos

6.5.1.3.1. Término T_1 – intensidad acústica recibida

Tal y como lo indica el título, este punto trata la porción de la ecuación [6.35] que contabiliza la manera en que cada ADCP recibe la intensidad acústica de retorno (Ecuación [6.27]). En el caso de RDI, esta se reporta como Intensidad de *backscatter*, en unidades denominadas *counts*. En contraposición, el equipo marca Sontek la registra como relación señal-ruido (*SNR*) en decibeles.

$$T_1 = \underbrace{10 \log_{10} \left(10^{\frac{k_c(E-E_r)}{10}} - 1 \right)}_{SNR_{RDI}} - \underbrace{SNR}_{SNR_{SM9}} \quad [6.50]$$

En la Figura 6.16 se presenta el valor observado para cada ADCP, expresado en decibeles, como una función de la profundidad. Asimismo, se exhibe el valor final correspondiente al término T_1 para la medición analizada.

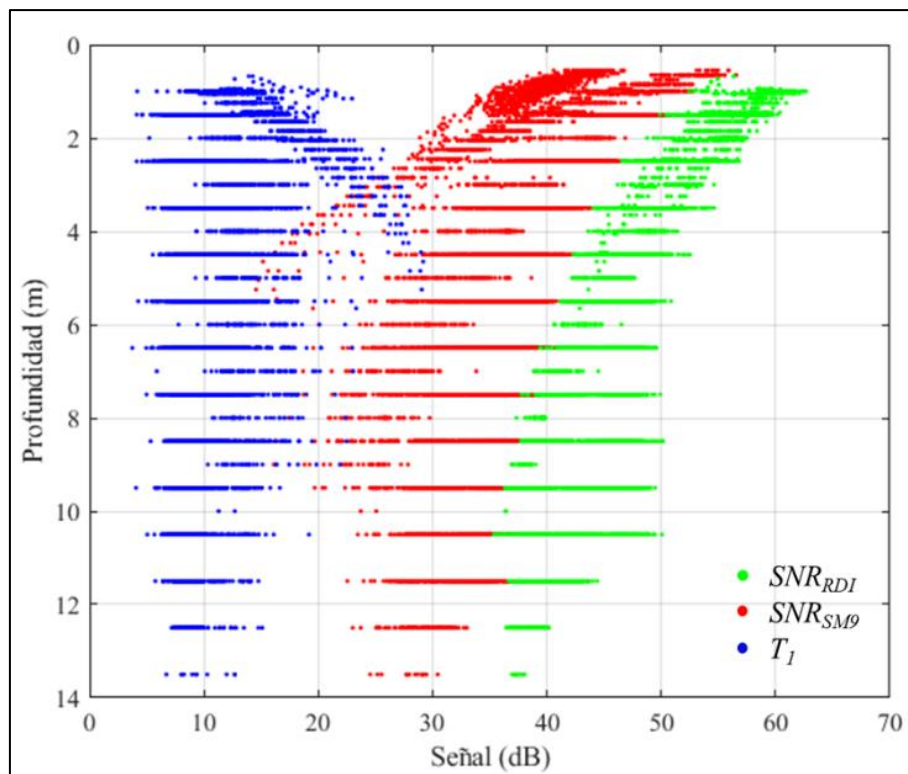


Figura 6.16.- Valores de intensidad de retorno (dB) para cada ADCP y T1.

Con el objetivo de expandir el análisis del término, se construyó la Figura 6.17. Allí se señala que, en la programación del software y a los efectos de practicidad y presentación, los ajustes se hicieron respecto de la profundidad desde la superficie del agua, y no distancia desde el transductor.

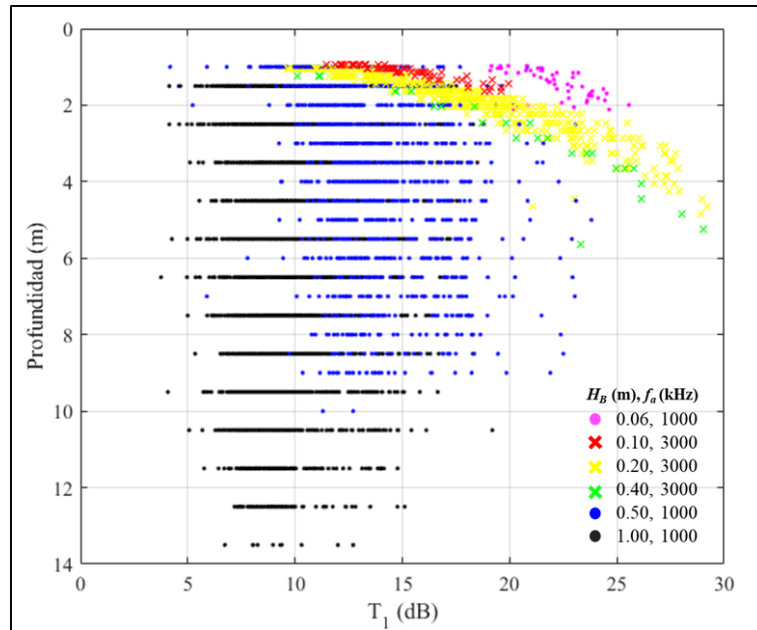


Figura 6.17.- Término T_1 como función de la profundidad, según el tamaño de celda y frecuencia de medición.

De la Figura 6.18 y la Tabla 6.2 puede observarse un buen colapso de los datos a la función logarítmica [6.45] para los valores de tamaño de celda correspondientes a la frecuencia acústica de 3000 kHz ($H_B=0.1, 0.2$ y 0.4).

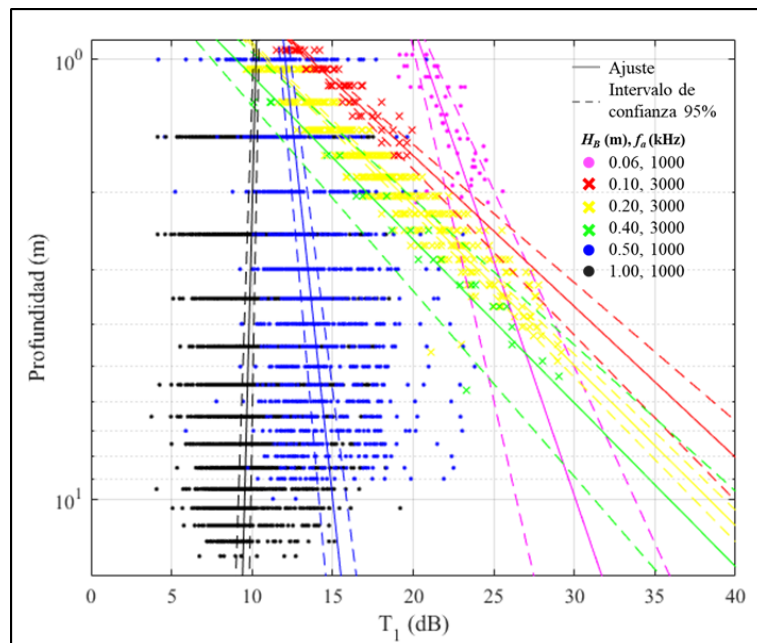


Figura 6.18.- Ajuste de ecuación [6.45] al término T_1 .

Tabla 6.2.- Coeficientes de ajuste de la ecuación [6.45].

	H_B - Tamaño de Celda (m)					
Coefficiente	0.06	0.10	0.20	0.40	0.50	1.00
a_1	9.3484	29.1298	27.4521	26.8600	2.9400	-0.7091
b_1	20.7186	13.6225	10.8792	9.0005	12.0615	10.2449
R^2	0.4213	0.8789	0.9146	0.9267	0.0864	0.0092

Para $H_B=0.50$ m y $H_B=1.00$ m, el modelo propuesto no explica el fenómeno observado, tal y como se observa ante la variabilidad de T_I respecto del intervalo de confianza del 95%. En términos prácticos, no existiría diferencia en la asunción de un valor constante para T_I , para estos dos tamaños de celda. No obstante, y por practicidad, se toma como válida la representación dada por la ecuación [6.45] ya que, a priori, no induciría cambios importantes en el cómputo de A para otras mediciones.

Para el caso de Para $H_B=0.06$ m, el modelo propuesto presenta un mejor coeficiente de determinación (R^2) que los correspondientes a los otros tamaños de celda que funcionan para una frecuencia acústica de 1000 kHz, esto puede deberse a que el tipo de pulso acústico es diferente para este caso.

Estos comportamientos ameritan mayores investigaciones de campo que permitan elucidar el motivo de la forma de T_I para cada tamaño de celda, si existe relación con este valor del tamaño de celda, o si existe relación con el tipo de pulso acústico emitido por el SM9.

6.5.1.3.2. Término T_2 – Atenuación de la señal acústica

A partir de la combinación de las ecuaciones [6.38] y [6.44] se obtuvo [6.51]. En ella se observa la dependencia de los coeficientes de ajuste respecto de las distintas variables que definen T_2 . La validez de la aproximación lineal se da bajo la hipótesis de predominancia de los efectos de atenuación debidos al fluido. En la Figura 6.19 se muestra la atenuación total para ambos ADCPs, y su respectiva diferencia, que constituye a T_2 . Para efectos prácticos, se pueden combinar los efectos de la atenuación acústica debido al fluido (α_w) y a los sedimentos (α_{s1}, α_{s2}) en un solo coeficiente (α).

$$T_2 = 2r_v \left\{ \frac{(\varphi_1(f_{a,RDI}, T) + \varphi_2(f_{a,RDI}, M_{s1}, \rho_{s1}, a_1) + \varphi_2(f_{a,RDI}, M_{s2}, \rho_{s2}, a_2))}{\cos \theta_{RDI}} - \frac{(\varphi_1(f_{a,SM9}, T) + \varphi_2(f_{a,SM9}, M_{s1}, \rho_{s1}, a_1) + \varphi_2(f_{a,SM9}, M_{s2}, \rho_{s2}, a_2))}{\cos \theta_{SM9}} \right\} = a_2 r_v + b_2 \quad [6.51]$$

En la Figura 6.20 se observa que el término T_2 varía linealmente con la profundidad, agrupándose en 2 rectas diferentes que responden a la frecuencia acústica. El ajuste teórico de [6.51] debería pasar por el origen, no obstante, ello y al igual que para T_I , en el programa se realizaron los ajustes sobre la variable profundidad desde la superficie del

agua y no distancia desde el transductor. Esto explica un valor de la ordenada al origen distinto a cero.

Hacia la mayor profundidad, se observa una desviación de la recta teórica correspondiente a 1000 kHz de frecuencia acústica. Esta desviación se explica por el cómputo de α_{s2} como una función de la concentración de sedimentos gruesos en suspensión.

En la Tabla 6.3 se presentan los coeficientes que ajustan a T_2 como una función lineal de la profundidad.

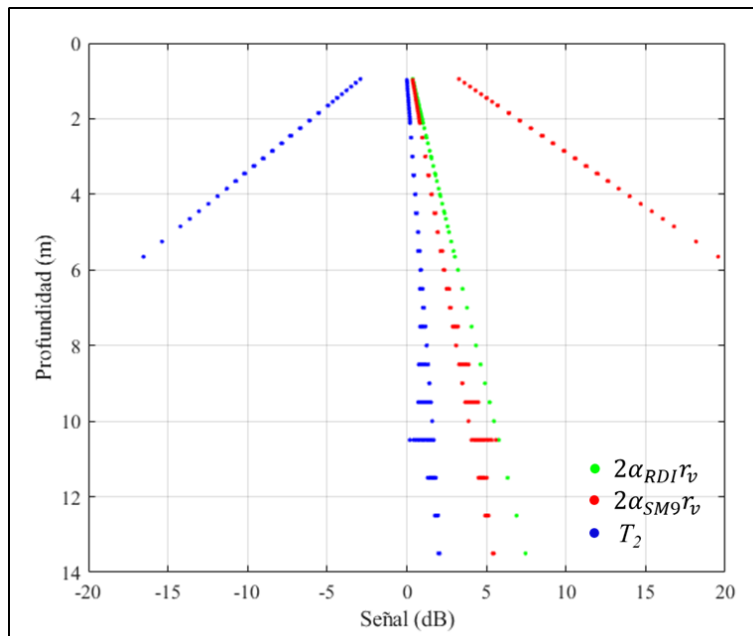


Figura 6.19.- Valores de atenuación acústica (dB) para cada ADCP y T_2 (α indica la suma de la atenuación acústica por el fluido y por los sedimentos).

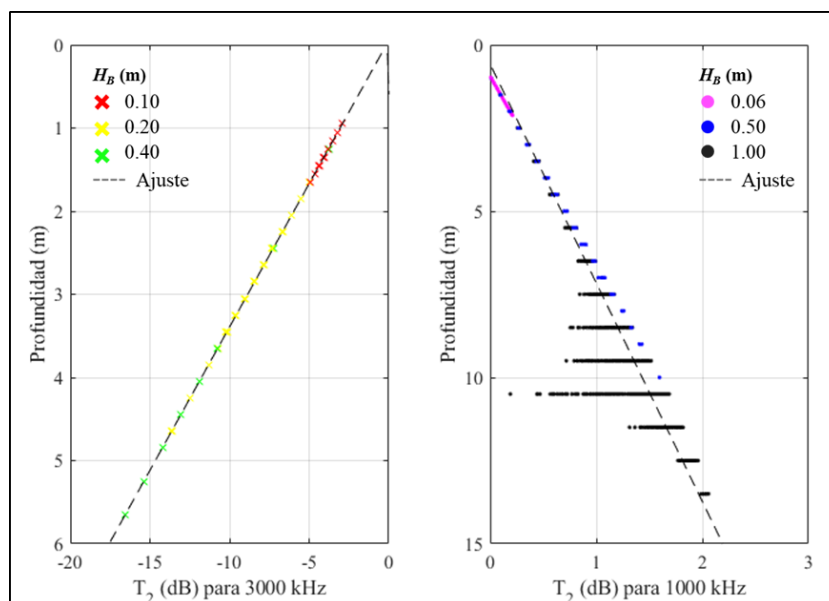


Figura 6.20.- Término T_2 como función de la profundidad, según la frecuencia acústica de medición.

Tabla 6.3.- Coeficientes de ajuste de la ecuación [6.51].

Coeficiente	f_a – Frecuencia acústica del ADCP (kHz)	
	1000	3000
a_1	0.1520	-2.9012
b_1	-0.0882	-0.1550

6.5.1.3.3. Términos T_3 , T_4 y T_5

A los efectos del presente título se denomina T_{345} a la suma de los términos T_3 , T_4 y T_5 como se indica en la ecuación [6.52], como una combinación de las ecuaciones [6.39], [6.40] y [6.41]. T_{345} asume ciertos valores que pueden ser calculados con información disponible en el módulo 1 del ASETSM9, y se mantienen constantes para el módulo 2. En la Figura 6.21 se muestran los valores que asume dicho término como función de la profundidad, la frecuencia acústica y el tamaño de celda de medición. Allí se observa que T_{345} presenta dos formas distintas que claramente dependen de la frecuencia acústica, como puede inferirse de [6.52].

$$T_{345} = -0.315 + 20 \log_{10} \left(\frac{\psi_{RDI}}{\psi_{SM9}} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{1}{L_{RDI} P_{T,RDI}} \right) + C \quad [6.52]$$

$$+ 40 \log_{10} \left(\frac{f_{a,SM9}}{f_{a,RDI}} \right)$$

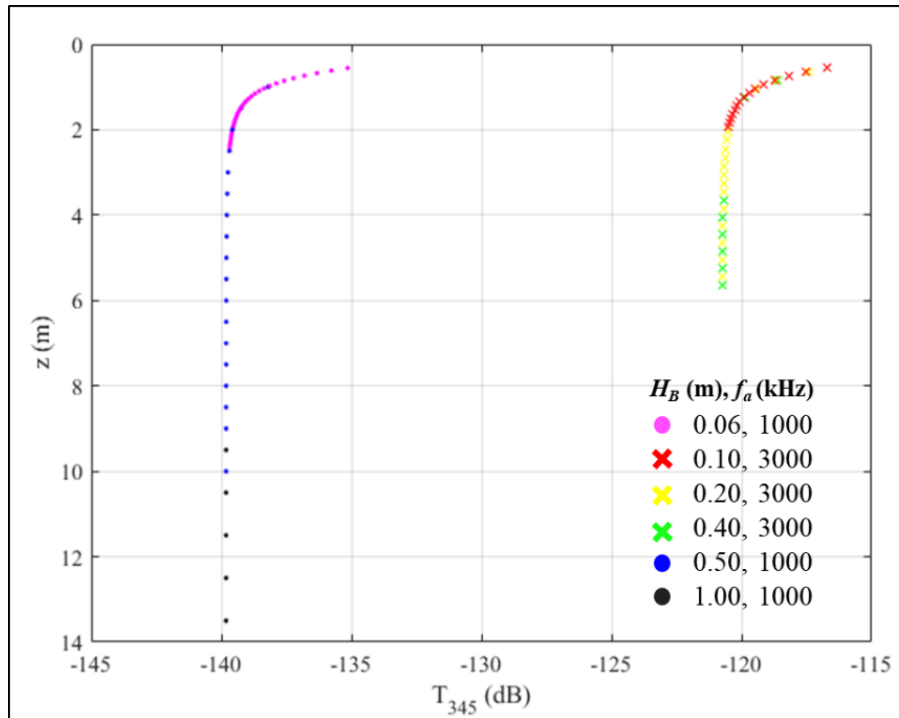


Figura 6.21.- Término T_{345} como función de la profundidad, según el tamaño de celda y frecuencia de medición.

6.5.2. Resultados del Módulo 2

La presente ejecución se realizó sobre la misma medición de SM9 que se utilizó en el módulo 1, a los efectos de constatar la fiabilidad del módulo en la reproducción de los resultados obtenidos con el ASET (Domínguez Rúben, 2018).

Se utilizó el mismo procesamiento de grillado y los parámetros de sedimentos y concentración de fracción fina que en el módulo 1, a saber: $d_1=0.0035$ mm y $d_2=0.145$ mm, y una concentración $M_{s1} = 0.0185$ mg/L.

Para 30 ejecuciones del Módulo 2, el tiempo promedio de ejecución fue de 340 segundos (con un mínimo y un máximo de 168 y 348 segundos respectivamente), en la misma computadora señalada en el punto 6.5.1.

6.5.2.1. Cálculo de la concentración a partir de variables medidas

Se utilizó la ecuación [6.27] para el cálculo de la concentración M_{s2} . En la Figura 6.22 se presentan los resultados de esta variable para la porción medida de la sección transversal. Se puede observar allí una distribución, a priori similar a la exhibida en la Figura 6.12 obtenida con el Software ASET (Domínguez Rúben et al., 2020), para los datos medidos con el ADCP RDI.

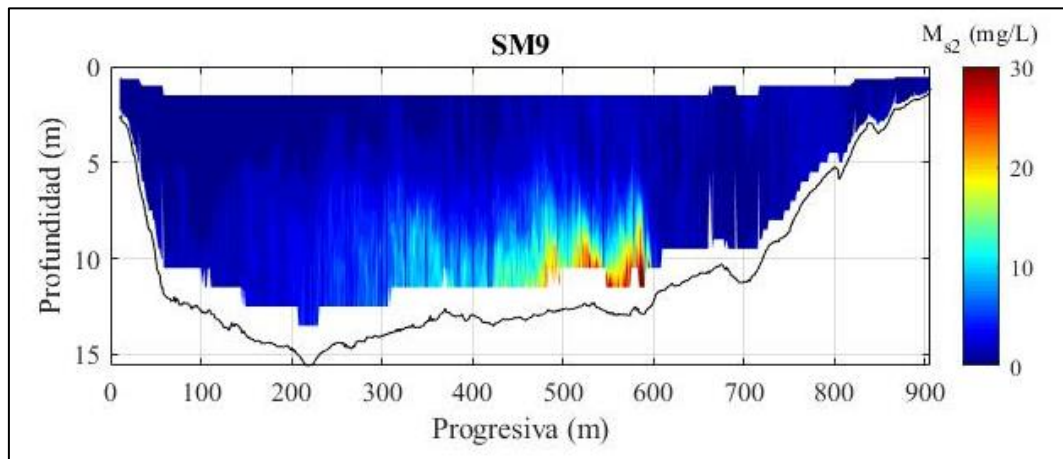


Figura 6.22.- Resultados de concentración de la fracción gruesa, sobre la información medida.

A partir de lo obtenido, se pueden comparar los datos presentados en la Figura 6.22 con los valores de concentración obtenidos con el software ASET. Para esto, se utilizaron las concentraciones obtenidas en ASET, interpoladas a la grilla de datos del Sontek M9. Esto se grafica en la Figura 6.23, junto con el error absoluto entre ASET y ASETSM9.

Asimismo, en la Figura 6.24 se presentan las concentraciones máximas y medias en cada vertical. En ambos casos se observa que los resultados del ASETSM9 son mayores a los

de ASET. No obstante, en términos generales, se observa que ambos softwares describen el mismo patrón de concentraciones en la sección transversal.

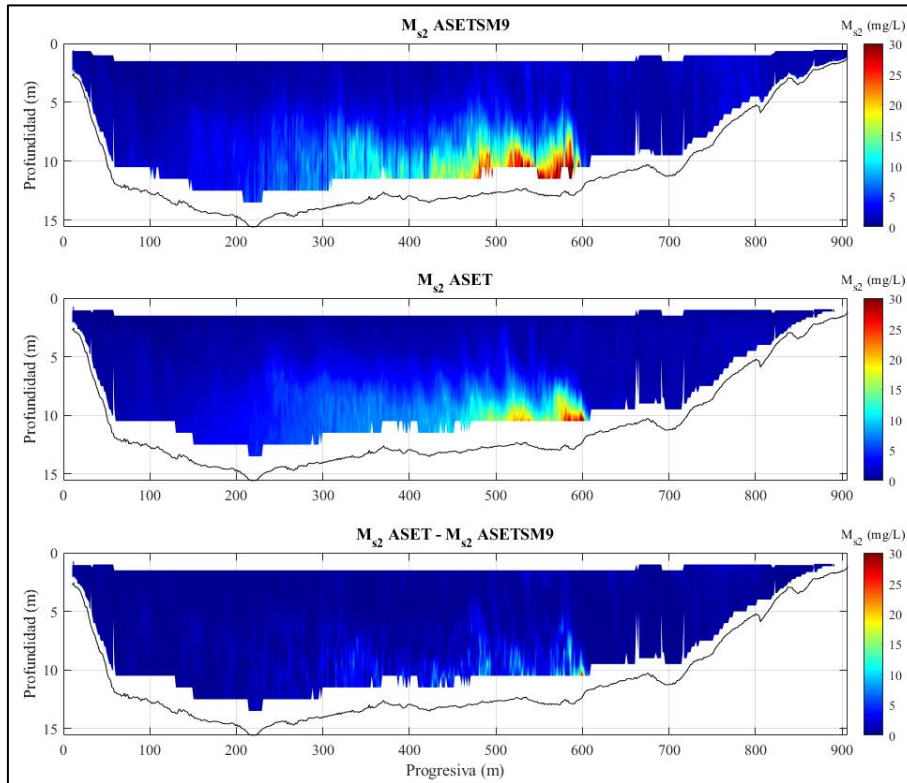


Figura 6.23.- Comparativa de resultados entre ASET y ASETSM9.

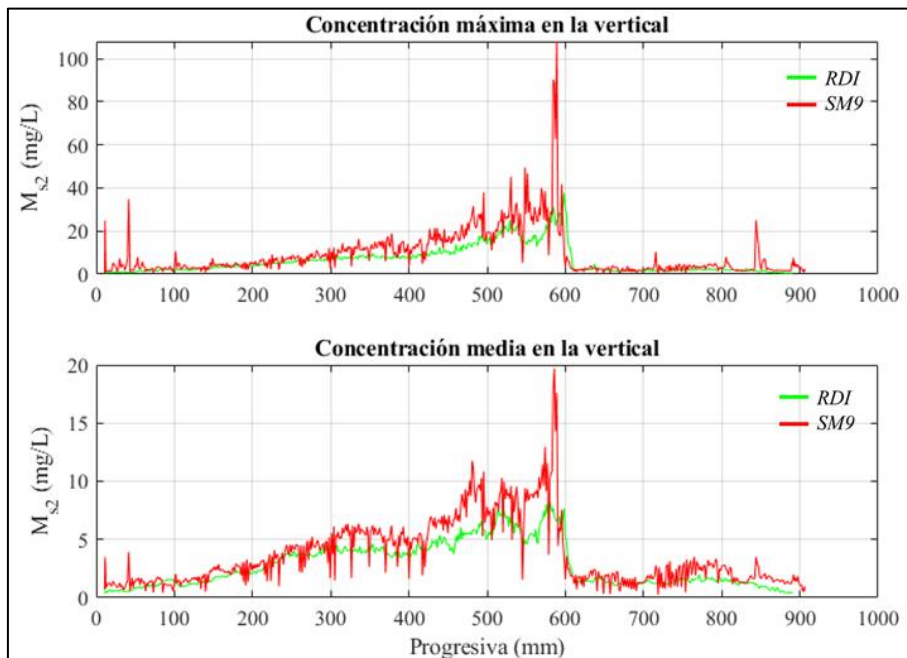


Figura 6.24.- Concentraciones representativas a lo largo de la sección transversal.

En términos numéricos, se calcularon los valores medios y máximos de M_{s2} sobre la vertical. Para los valores medios se calculó un error relativo promedio porcentual -42.7%

(desvío estándar de 64%), mientras que para las concentraciones máximas se calculó un error promedio de 81.5% (desvío estándar de 251%). Estos valores, si bien altos en términos absolutos, se encuentran dentro de lo esperable para los errores propios de la metodología. En Domínguez Rúben et al. (2020) se aceptaron valores desde -27% hasta 50% respecto de las mediciones realizadas con la metodología tradicional de medición de concentraciones en distintas verticales, mientras que Szupiany et al. (2019) observaron errores de alrededor del 40%. Teniendo en cuenta la variabilidad espacial y temporal de la variable, y el buen ajuste en términos de la reproducción de los patrones espaciales de la concentración, se infiere que el ASETSM9 es una herramienta válida para el análisis de los datos disponibles, máxime gracias a su capacidad de utilizar información ya relevada para realizar estimaciones de concentración de sedimento en suspensión, en fechas donde no se consideró la medición de la variable.

6.5.2.2. Extrapolación del perfil de concentraciones

Se optó por utilizar la extrapolación de 3 puntos para el perfil de concentraciones, tanto en el ASET como en el ASETSM9, a los efectos de eliminar posibles errores producto del ajuste de la expresión de Rouse a los perfiles verticales. En la Figura 6.25 se presentan perfiles verticales de M_{s2} obtenidos con ASETSM9, y el correspondiente perfil completo con las correspondientes extrapolaciones, señalados en la sección transversal.

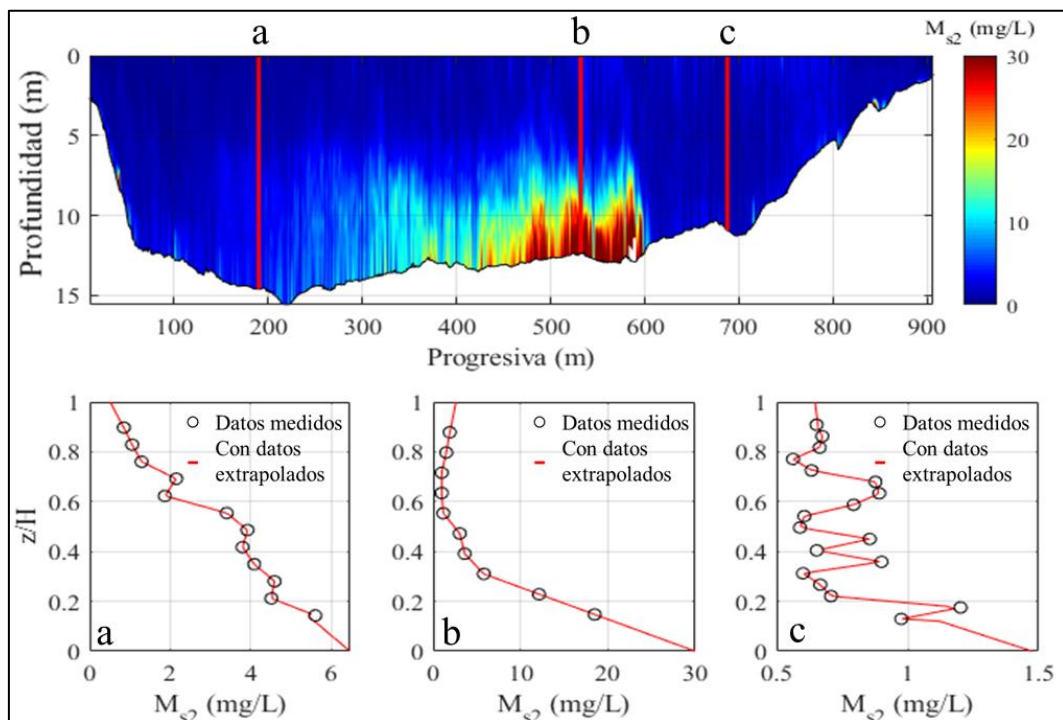


Figura 6.25.- Concentraciones ajustadas en la sección transversal y en tres verticales señaladas.

6.5.2.3. Extrapolaración del perfil de velocidades

Se utilizó la extrapolación con la Ley de la Pared (Schlichting & Gersten, 2000; García, 2008). En la Figura 6.26 se muestran las velocidades ajustadas para cada vertical. En el panel inferior se muestra el ajuste en las tres verticales señaladas, a modo de ejemplo.

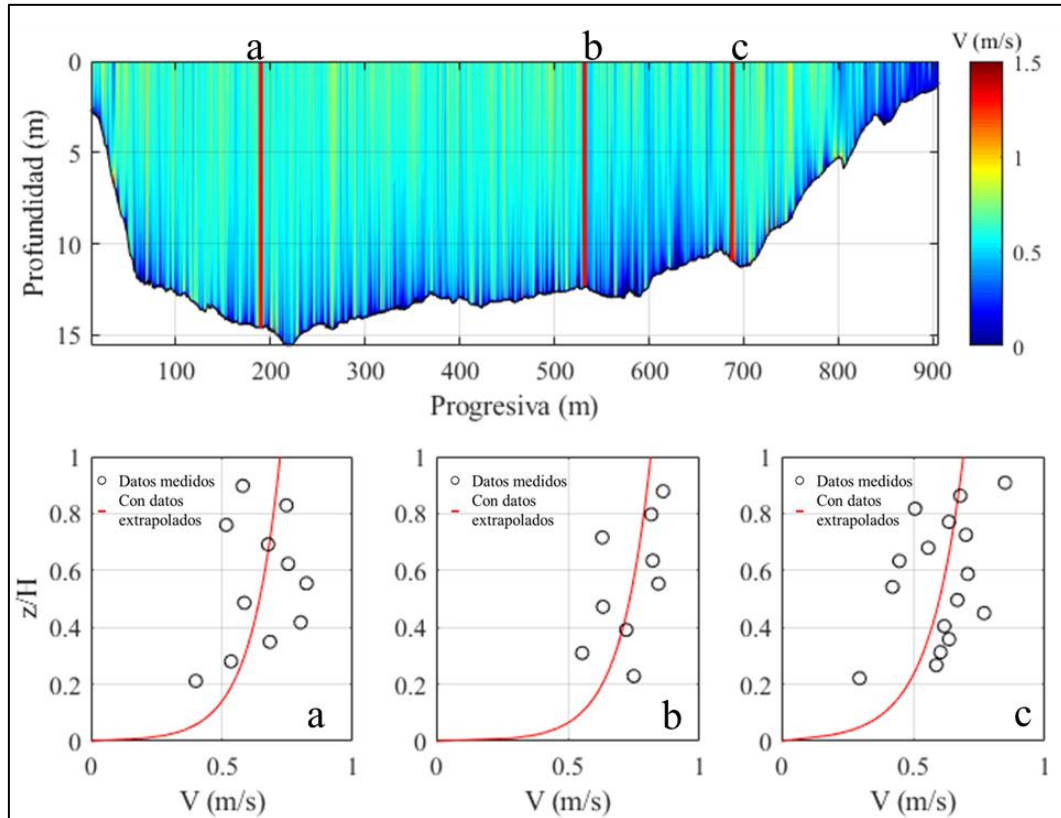


Figura 6.26.- Velocidades ajustadas en la sección transversal y en tres verticales señaladas.

6.5.2.4. Cálculo del caudal líquido y sólido

Con los valores de perfiles de velocidades y concentraciones extendidos en toda la vertical, para la sección transversal, se procedió a realizar la integración de la misma. Para el cálculo de caudal líquido se consideraron las verticales ajustadas de velocidad, con el perfil logarítmico. Los laterales de la sección transversal se estimaron considerando la mitad de la velocidad en la última vertical, y asumiendo un triángulo de sección transversal, desde esta última hasta la orilla.

En la Figura 6.27 se muestra el cálculo del caudal líquido estimado para la medición del 18/12/2018, que para este caso totalizó 5548.37 m³/s. Este valor puede contrastarse con los presentados en la Figura 6.8 y Figura 6.10, de 5425.31 y 5384.56 m³/s respectivamente, denotando un error del orden del 3%. Este valor está dentro del criterio normalmente

aceptado para la realización de aforos con la metodología asociada a los dispositivos acústicos (Mueller, et al., 2013).

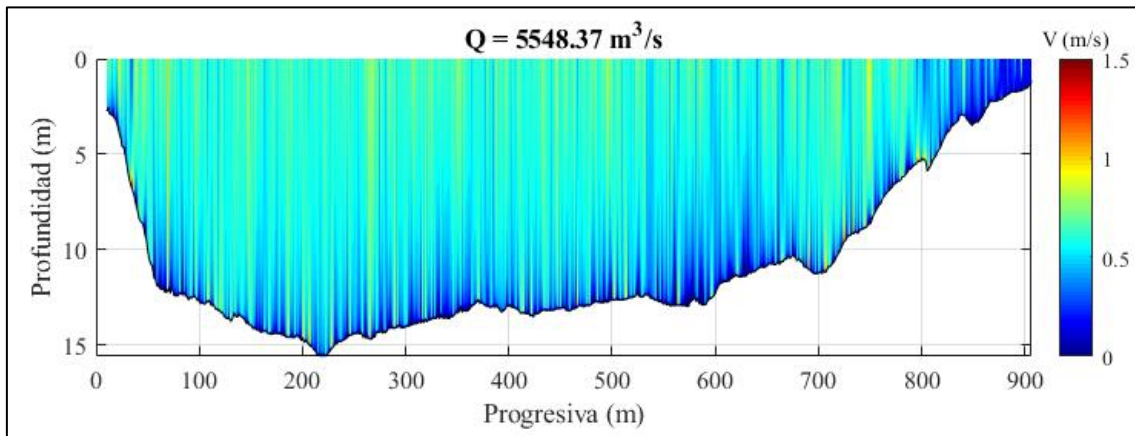


Figura 6.27.- Cálculo del caudal líquido en la sección transversal.

En la Figura 6.28 se muestra el producto de la velocidad por la concentración en cada celda, lo que constituye el transporte de sedimento en suspensión para cada una de ellas (g_{ss}). La integración de esta variable en la sección transversal (considerando los laterales al igual que para el caudal líquido) arrojó un resultado de gasto sólido $G_{ss} = 22.10$ kg/s. Este valor puede compararse con el de la Figura 6.12, donde se muestra que el resultado equivalente del ASET fue $G_{ss} = 17.22$ kg/s, es decir un 28% más. Este valor cumple satisfactoriamente los criterios aceptables definidos en Szupiany et al. (2019) y Domínguez Rúben et al. (2020).

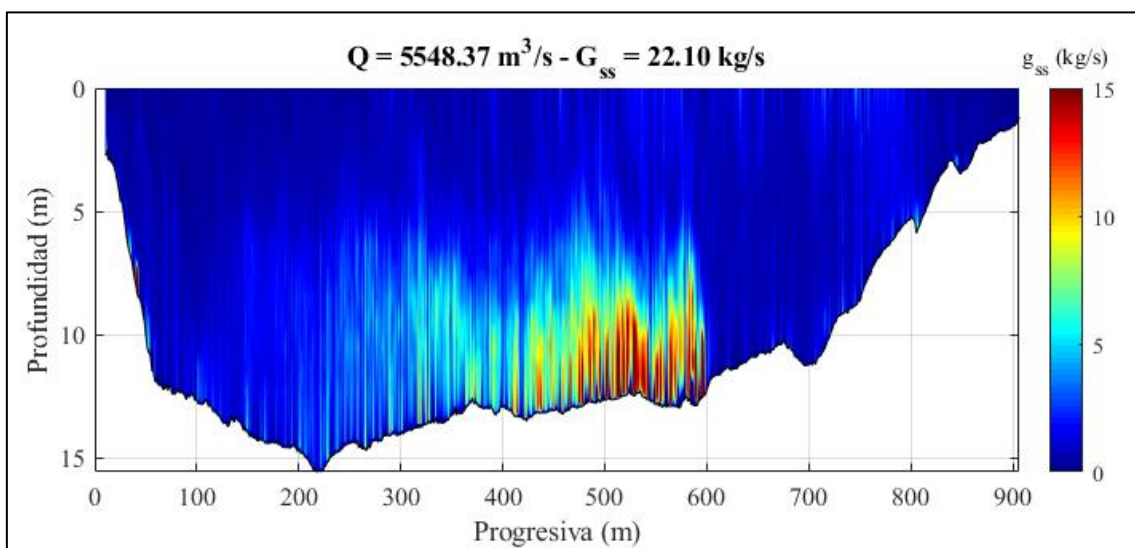


Figura 6.28.- Cálculo del caudal sólido en la sección transversal.

Considerando lo expuesto en materia de resultados, se entiende que se ha alcanzado un desempeño aceptable en el software ASETSM9 para la reproducción de los datos del evento de calibración respecto del ASET.

Esta situación dista de la ideal para aceptar este software como una herramienta válida. Para dicho escenario, se requerirían mayores testeos ante distintos escenarios hidrológicos, y en distintas secciones transversales. Precisamente este punto se reconocía como uno de los ejes centrales del presente trabajo de investigación. No obstante, y por los motivos asociados al desarrollo de la pandemia producida por el virus de SARS-COV2, no se pudo continuar durante 2020-2021 con los trabajos de campo necesarios para esta validación. Dicho esto, y a los efectos de continuar con la presente tesis, se acepta que los resultados, pese a su falta de testeo, resultan promisorios. Esto último, sobre todo, aceptando que cualquier medición es mejor que ninguna, más aún, considerando los argumentos físicos presentados en el desarrollo de esta metodología.

Capítulo 7

Características del lecho y formas de fondo

7.1. Introducción

El área de estudio abordada en esta tesis presenta una geomorfología que varía espacialmente de manera significativa en el tramo de 350 km que ocupa. Según Iriondo & Kröhling (2008), este tramo queda incluido geomorfológicamente en dos sectores de la cuenca hidrográfica: el medio y el bajo. La porción del área de estudio de esta tesis situada al norte de Concepción del Uruguay se encuentra comprendida en el sector medio de la cuenca definido por dichos autores, mientras que el sector bajo incluye el tramo de río aguas abajo de Concepción del Uruguay hasta la desembocadura.

En el área de estudio se identifican, al menos, tres tramos fluviales de interés siguiendo a Iriondo & Kröhling (2008). El primero corresponde al tramo superior, entre el embalse de Salto Grande (km 350) y Concepción del Uruguay (km 186), donde el río discurre encajado en rocas, especialmente entre la represa y el Parque Nacional El Palmar (km 265 aproximadamente). En este segmento, el cauce se ensancha progresivamente y desarrolla bancos e islas alargados, con una disposición controlada por la estructura geológica. A partir del Parque Nacional El Palmar, el ancho del cauce varía entre 1 y 2,5 km, lo que señala el inicio de una transición hacia una morfología más compleja.

El segundo tramo comienza a la altura de Concepción del Uruguay (km 186) y se corresponde con el denominado Delta Holoceno del Río Uruguay. Este tramo presenta una morfología anastomosada en su parte superior y un patrón distributivo en los últimos 20 km. El sistema culmina en la gran curva frente a Gualeguaychú-Fray Bentos (km 105 aproximadamente), donde el río se ramifica en hasta diez brazos, conformando un frente distributivo en retroceso.

Finalmente, desde el km 85 hacia aguas abajo, la configuración del valle corresponde a una amplia depresión tectónica que alberga un cañón fluvial labrado en su lecho. Este tramo presenta una dinámica fuertemente influenciada por las oscilaciones del nivel del Río de la Plata, especialmente en condiciones de aguas bajas.

En concordancia con los rasgos morfológicos principales señalados, y los tamaños de sedimentos presentes en el cauce, se observan formas de fondo en una gran porción de este tramo (al menos hasta el km 290 – Nueva Escocia), particularmente sobre el canal de navegación. Un claro ejemplo de ello se puede observar en la Figura 7.1, como consecuencia de la importante bajante producida durante el año 2020.

Las formas de fondo se definen como ondulaciones rítmicas que aparecen en el lecho de un río por la interacción entre el agua y el sedimento transportado (van der Mark, et al., 2008). Estas son, en igual medida, un problema de ingeniería y un reto intelectual (García, 2008). Tienen un gran impacto en la resistencia al escurrimiento, en la generación del transporte de sedimento y, por lo tanto, en diferentes cuestiones relacionadas al diseño de canales de navegación y construcción de estructuras subfluviales (Latosinski, 2014).

Particularmente, las dunas son una de las formas de fondo más comunes (García, 2008). Estas se producen a partir de sedimentos cuyos tamaños varían desde limos hasta gravas (Dinehart, 1992; Seminara, 1995; Best, 1996; Carling, 1999; Kleinhans, 2001; 2002). Si se parte desde un fondo plano, su tiempo de regeneración está directamente vinculado con el tiempo en que deben realizarse los dragados de mantenimiento en vías navegables (Knaapen & Hulscher, 2002). Es por estos motivos que comprender su dinámica resulta significativo en el río Uruguay, y consecuentemente para esta tesis.



Figura 7.1.- Formas de fondo en el río Uruguay durante la bajante de 2020. Km 232, el Varillar (Baccaro, 2020).

Durante las últimas dos décadas ha habido un gran avance en la caracterización de las formas de fondo en grandes ríos, lo cual se debe particularmente a las notorias mejoras en el monitoreo de la morfología de las formas de fondo y el flujo sobre estas (e.g.: Best, 2005; García, 2008). Sin embargo, no existen antecedentes sobre el río Uruguay, que describan, caractericen y determinen la variabilidad espacial y temporal de las mismas.

El análisis del comportamiento de las formas de fondo comienza con la determinación de sus dimensiones características. A los efectos del presente se denominarán así a la longitud (λ_d), altura (H_d) y ángulo de la cara aguas abajo (θ_d) que describen la geometría de las presentes en el río Uruguay, tal y como se señalan en la Figura 7.2. Adicionalmente, se denomina empinamiento a la relación que existe entre la altura y la longitud de la forma de fondo (H_d/λ_d).

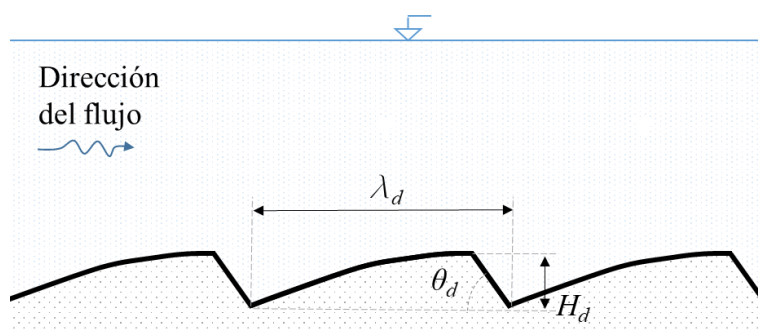


Figura 7.2.- Dimensiones características de las formas de fondo.

En este capítulo se presenta una descripción del lecho fluvial sobre la base de la información disponible (Sección 3.5) y de los trabajos de campo realizados. Se aplicaron, además, diferentes métodos para arribar a una caracterización de las formas de fondo presentes, que se analizan a continuación.

7.2. Metodología

7.2.1. Recopilación de información granulométrica

Como se señaló en la Sección 3.5.2, existe un relevamiento extensivo de la textura del material de fondo del área de estudio. Éste fue realizado por el Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada de la República Oriental del Uruguay y el Servicio de Hidrografía Naval de la Armada Argentina, en el marco del Levantamiento integral del Río Uruguay previsto en el Digesto sobre el Uso y Aprovechamiento del Río Uruguay (CARU, 2019).

Esta información se sistematizó en una planilla y en un Sistema de Información Geográfico. Para el tramo que va desde el kilómetro 0 al 218 se construyeron las curvas granulométricas, mientras que para el tramo entre el km 218 y la represa, sólo se encuentran disponibles datos de textura del lecho. Estos últimos son cualitativos en caso de ser el lecho de roca, o bien consisten en el porcentaje constitutivo de arcilla, limo, arena y/o grava presente.

7.2.2. Mediciones de forma de fondo

Existen en la bibliografía distintas aproximaciones a la cuantificación de las dimensiones de las formas de fondo. El sistema clásico consiste en la medición manual de las mismas en los perfiles batimétricos relevados (sean analógicos o digitales). Conforme al avance tecnológico, la digitalización de la información batimétrica permitió la utilización de análisis espectral, técnicas de suavizado del perfil con media móvil, técnicas de rugosidad de la señal, fractales y regresión logística (Gutierrez, et al., 2013). Entre ellos se destacan los trabajos de van der Mark et al. (2007; 2008) y Gutierrez et al. (2013; 2018) que, a través de diferentes enfoques, lograron realizar una determinación automática de estas dimensiones.

En su trabajo, van der Mark & Blom (2007) analizaron perfiles longitudinales tanto de canales de laboratorio como de un tramo de canal aluvial, bajo la suposición de que dichos perfiles se asimilan a una serie de tiempo aleatoria, siguiendo la lógica propuesta por Nordin (1971). Sobre esta hipótesis diseñaron un algoritmo denominado *BTT (Bedform Tracking Tool)*, que procesa los perfiles a través de la aplicación de filtros digitales de media móvil y series de Fourier, para obtener los picos del espectro de potencia de dicha función. Estos picos, dado que el análisis es sobre una serie espacial y no temporal, coinciden con la longitud característica de las formas de fondo más frecuentes.

Siguiendo esta metodología, Nardin et al. (2018) presentaron una implementación del Algoritmo *BTT* para el paso de navegación denominado San Francisco, frente a la localidad de Colón (Entre Ríos).

Para el trabajo correspondiente a esta tesis se utilizaron batimetrías longitudinales relevadas en marzo de 2016, para el tramo entre el km 0 y el 206, y en marzo de 2018 para el tramo hacia aguas arriba (Figura 7.3). Cabe señalar que los relevamientos fueron previos al inicio de las tareas de dragado de apertura ejecutadas en el año 2018.

Los mencionados relevamientos fueron realizados con una sonda ecógrafa Knudsen 1612, doble frecuencia (33 y 200 kHz) y un GPS Hemisphere Vector v330, con corrección satelital Marinestar ®, administrados por el software Hypack®. La frecuencia de medición es un valor configurable, pero que tiene un valor por defecto de 15 muestras por segundo. Esto, para las velocidades de relevamiento habituales para el río Uruguay (8 nudos = 4 m/s), resulta en una resolución longitudinal de aproximadamente 0.25 m.

Los datos exportados de Hypack® consistieron en: progresiva sobre el canal de navegación y profundidad al pelo de agua. En este caso, la profundidad al pelo de agua es un dato válido ya que basta con conocer los cambios longitudinales en la elevación para determinar el tamaño en las formas de fondo.

Con dichos relevamientos se construyó un perfil longitudinal completo del canal de navegación, y sobre dicho perfil se realizaron las operaciones que se detallan (Figura 7.3).

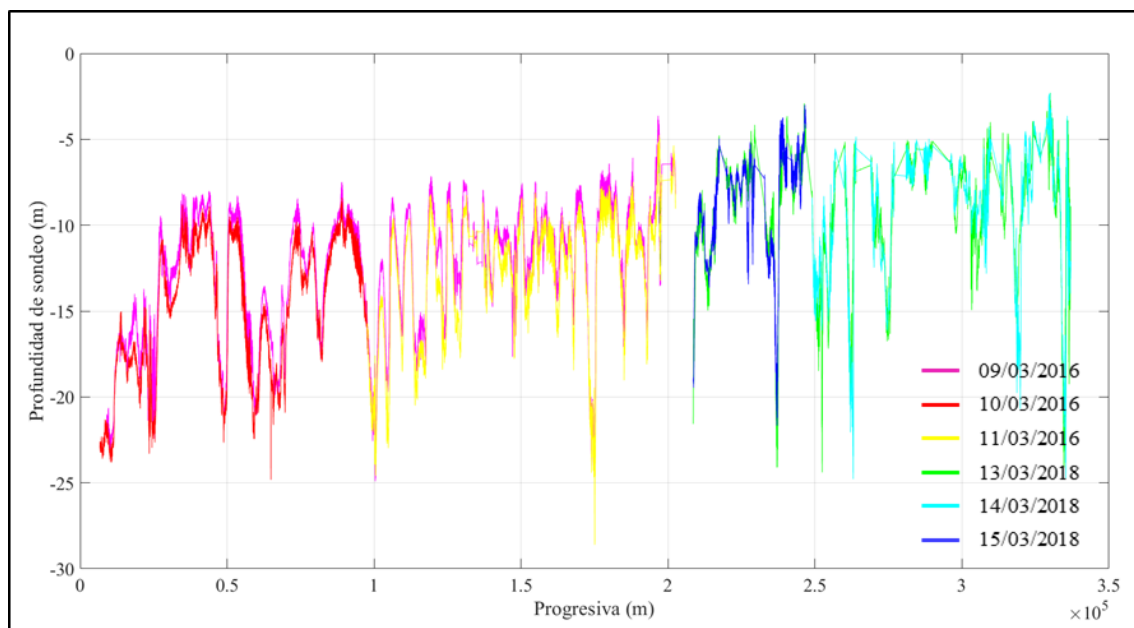


Figura 7.3.- Relevamientos batimétricos longitudinales a lo largo del eje del canal de navegación del río Uruguay.

7.2.2.1 Algoritmo BTT

La herramienta desarrollada resuelve el algoritmo presentado por van der Mark & Blom (2007). Este algoritmo puede aplicarse sobre un **perfil longitudinal de elevaciones** del fondo (**PLE**) relevado tanto en laboratorio o en campo, que consiste en el par de coordenadas cartesianas de progresiva y elevación (respecto de un nivel de referencia determinado, por ejemplo, los ceros MOP o IGN, o al cero del limnómetro más cercano).

El objetivo del algoritmo es identificar las formas de fondo de manera automática, y obtener del PLE las dimensiones características de las formas de fondo que lo componen. De manera sucinta, se presenta a continuación la sucesión de pasos que se contempla el algoritmo.

- 1) Para cada PLE se buscan los valores fuera de registro (*outliers*) y se reemplazan con un valor interpolado linealmente. Luego este perfil se guarda en lugar del anterior.
- 2) Para cada PLE se determina la línea de tendencia. Para canales experimentales de laboratorio, en condiciones uniformes, esta línea de tendencia suele ser un ajuste lineal. Para PLEs relevados en condiciones naturales, esta tendencia suele estar asociada a geoformas de escala mayor a la de las dunas observables. Para este caso, se utiliza una media móvil ponderada (filtro digital).
- 3) Se extrae la tendencia de fondo del PLE. La nueva PLE sin tendencia ahora fluctúa alrededor de la línea del cero. A este perfil se lo denomina PLD, donde la “D” viene de la expresión anglosajona *detrended*, que en este caso indica la condición “sin tendencia”.
- 4) Se aplica al PLD un filtro de media móvil ponderada. Esto genera un nuevo perfil longitudinal filtrado (PLF) que será utilizado para definir los puntos donde el perfil cruza la línea del cero hacia abajo o hacia arriba (*zero upcrossings* o *downcrossings*, como se denomina en la bibliografía específica).
- 5) Se determinan los cruces a la línea de cero sobre el PLF.
- 6) Se determinan las crestas y valles de las formas de fondo. Una cresta es un máximo local ubicado entre un cruce al cero hacia arriba (*upcrossing*) y un cruce hacia abajo (*downcrossing*). En contraposición, un valle es un mínimo local ubicado entre un cruce hacia abajo y un cruce hacia arriba.
- 7) Tanto en el inicio o el final del PLF pueden existir crestas o valles que no ocurren entre dos cruces al cero. En este punto se analiza y registra su existencia.
- 8) Se determinan y guardan las dimensiones características de las formas de fondo (ubicación de crestas, valles, alturas, longitudes y ángulo de la cara de aguas abajo)

Este algoritmo fue programado en MATLAB y aplicado inicialmente a 3 relevamientos, sobre 4 perfiles longitudinales, en la zona de Colón, Entre Ríos. Asimismo, se observó que comparativamente con el método manual, el algoritmo automatizado produce

resultados con un error aceptable cuando los perfiles longitudinales presentan formas de fondo claramente identificables y bien definidas (Nardin, et al., 2018).

7.2.2.2. Procesamiento automático

Este proceso abarcó la aplicación automática del algoritmo BTT programado. La aplicación se realizó en tramos de 1000 metros sobre el perfil longitudinal de elevaciones (PLE, Figura 7.4). Se tomó como centro de cada aplicación el valor entero del kilómetro de la vía navegable. Si bien el PLE presentado abarca desde el kilómetro 9 hasta el 336, existen sectores de discontinuidad de datos debido a pérdida de información durante los relevamientos.

Se realizaron dos aplicaciones diferentes del algoritmo: la primera considerando 256 metros para la longitud de filtrado de eliminación de la tendencia de fondo, y 512 metros para la segunda (pasos 2 y 3 del algoritmo). Estos valores surgen del análisis espectral de la serie, tal como se señala en van der Mark & Blom (2007), y de la aplicación de la aproximación a la transformada de Fourier con el algoritmo FFT (*Fast Fourier Transformation*), que es una función pre programa Matlab®, y que aproxima los resultados a partir de potencias del número 2. Esta tendencia puede ser asociada a la variabilidad geológica del lecho, o a la presencia de estructuras de mayor escala como barras.

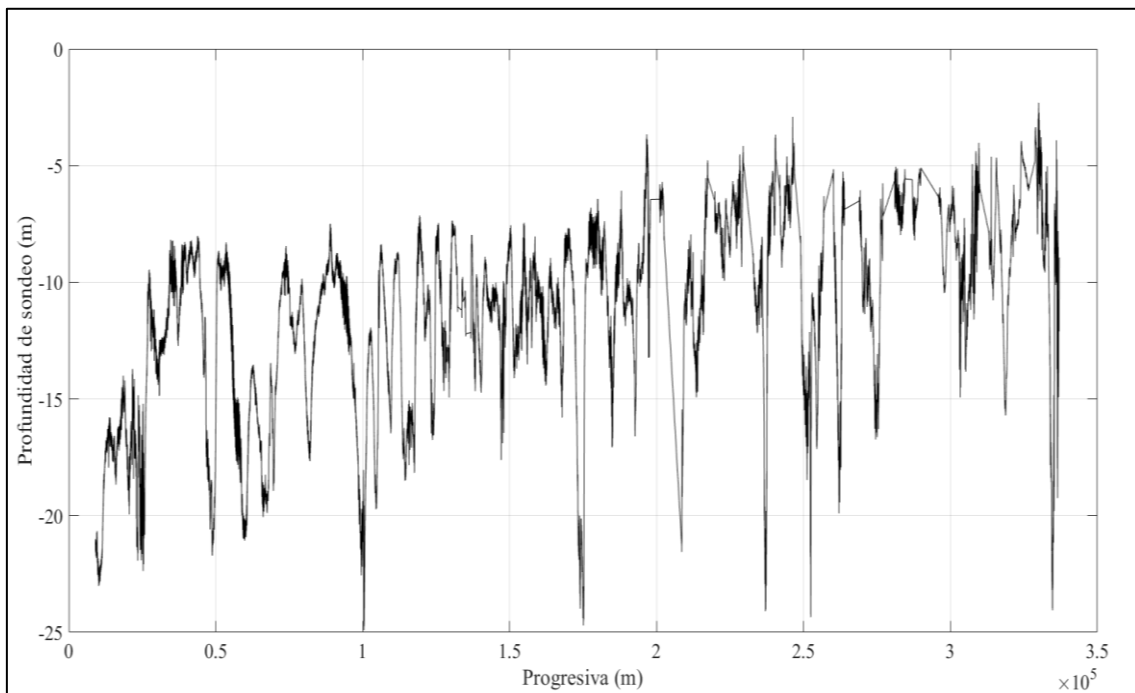


Figura 7.4.- Perfil longitudinal de elevaciones (PLE) utilizado.

7.2.2.3. *Medición manual para verificación*

Para verificar el algoritmo se midió, sobre el mismo PLE y cada 1000 metros, la altura y longitud de la forma de fondo presente *exactamente* en la progresiva seleccionada. Asimismo, en esta tarea se identificó si la forma de fondo medida correspondía a fondo plano, duna, formas de fondo compuestas (Galeazzi, et al., 2018) o una forma no especificada (que podría indicar la presencia de un afloramiento rocoso, por ejemplo). Asimismo, se tuvo en cuenta y se registró si en cada tramo de 1000 m analizado existió una forma de fondo compuesta (duna sobre duna), a los efectos de conocer el comportamiento general del tramo más allá de la situación particular de la progresiva exacta analizada.

7.2.3. *Características geomorfológicas*

En la Sección 3.3 y en la introducción de este capítulo se ha evidenciado la variabilidad morfológica del cauce en el área de estudio, identificándose al menos tres sectores de interés siguiendo a Iriondo & Kröhling (2008). Puede incluso separarse el tramo superior en dos subtramos, divididos a la altura del Parque Nacional El Palmar (km 265), el superior con características más marcadas, y el inferior de carácter transicional.

Frente a esta diversidad en la geomorfología del área de estudio, resulta pertinente evaluar si sus características descriptivas guardan correlación con las dimensiones de las formas de fondo observadas.

Leopold & Wolman (1957) definieron tres tipologías básicas de ríos (o tramos de ríos): rectos, meándricos y entrelazados. Actualmente se reconoce un espectro mucho más amplio de tipologías, incluyendo diferentes combinaciones de estas tres, así como también una variedad de cauces anastomosados (Basile, 2018). En todos los casos, las clasificaciones están dadas por una combinación de las características geométricas, características sedimentológicas y estructurales del lecho y márgenes, sinuosidad y grado de entrelazamiento (anastomosamiento) del cauce (Leopold & Wolman, 1957; Brice, 1975; Schumm, 1985; Knighton, 1998; Church, 2006; y Kleinhans & van den Berg, 2011).

Con el fin de caracterizar la geomorfología se midieron a intervalos de 1 km, para toda la longitud del área de estudio, el ancho (B), su valor relativo a la profundidad media (B/H) y número el número de brazos (N_B). Se obtuvo también la pendiente del fondo (S_b) y el tamaño característico de sedimentos del lecho donde estuviera disponible (d_{50}).

Por otra parte, se calculó la sinuosidad del cauce principal mediante el cociente entre la longitud del canal principal y la longitud del eje rectificado (S_s). Esta medición fue complementada con un análisis computacional realizado con el software Meander Statistics Toolbox (MStaT), desarrollado por Domínguez et al. (2021).

7.3. Resultados

7.3.1. Características sedimentológicas del lecho

En la Figura 7.5 se presentan los datos cualitativos, junto con el diámetro medio (representado por el d_{50}), y el desvío geométrico ($\sigma_g = \sqrt{d_{84}/d_{16}}$) en los lugares donde esta información está disponible. En el panel de la izquierda de dicha figura se observa una clasificación en función de la fracción granulométrica dominante en porcentaje.

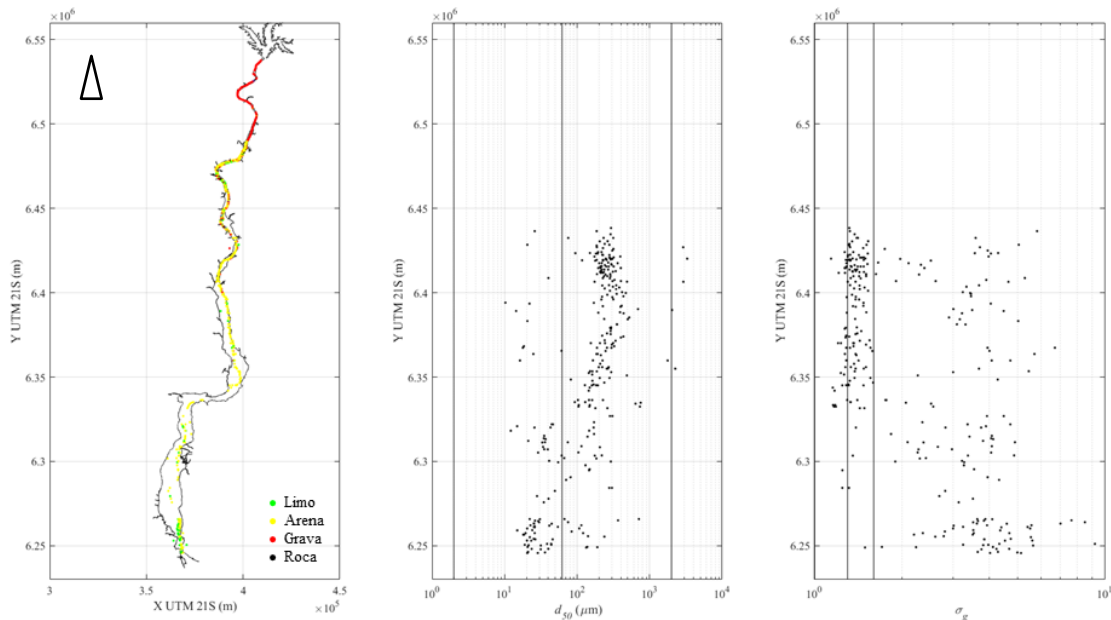


Figura 7.5.- Sedimentos en el fondo del río Uruguay.

Existen disponibles curvas granulométricas para el tramo que va desde el kilómetro 0 a 218 sobre el canal de navegación. En la Figura 7.6 se exhiben todas ellas superpuestas. Asimismo, en la Figura 7.7 se identifican dos patrones. Esta separación ocurre aproximadamente en el kilómetro 100 de la vía navegable (Fray Bentos), que coincide aproximadamente con la coordenada Y UTM 21S 6.340.000 m.

Se observa claramente una distribución extendida en el rango entre arcilla, limo y arena para los primeros 100 kilómetros, con altos contenidos de material fino en el fondo. Hacia aguas arriba, las muestras son preponderantemente arenas uniformes con diámetros medios en el entorno de los 300 micrones.

De la Figura 7.5, y en relación a los objetivos de la presente tesis, resulta destacable la sectorización del área de estudio en tres tramos bien definidos en cuanto a la composición sedimentológica del lecho. El primer tramo, desde la represa Salto Grande y el km 295 (Nueva Escocia) el lecho está compuesto por gravas con afloramientos rocosos. Hacia aguas abajo, entre el km 295 y 98 (Fray Bentos) el fondo del río está compuesto por arenas, mientras que el tramo inferior se presenta un fondo arenoso con un porcentaje creciente hacia aguas abajo de partículas de tamaño de limo y arcilla.

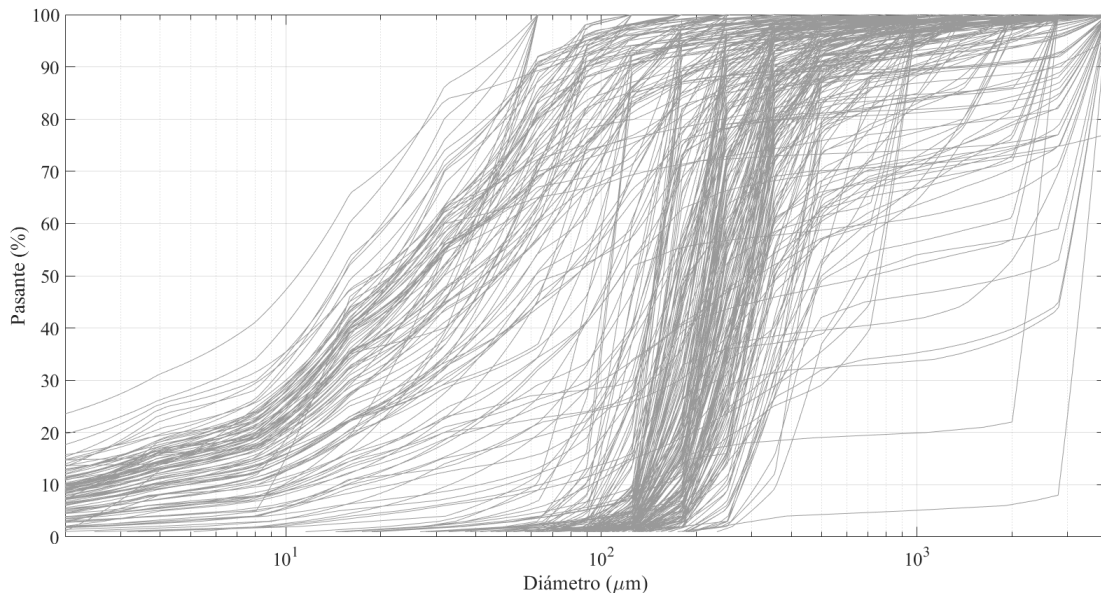


Figura 7.6.- Curva de frecuencias acumuladas de las muestras disponibles – distribución granulométrica.

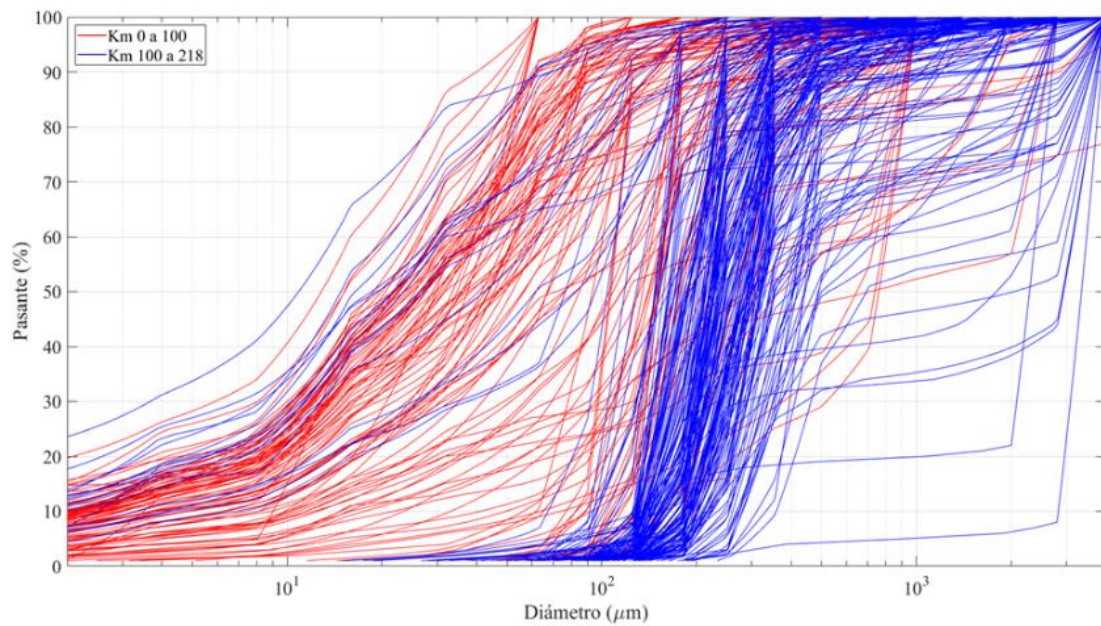


Figura 7.7.- Curva de frecuencias acumuladas de las muestras disponibles, señalando el tramo de pertenencia.

7.3.2. *Tamaños de formas de fondo*

Dada la precisión de la metodología de medición (batimetría monohaz con bote móvil), se utilizó el valor de 0,15 m como límite de detección. Como consecuencia, la metodología no cuenta con suficiente sensibilidad para la detección de rizos o dunas pequeñas. Sin embargo, de la observación manual del perfil longitudinal se concluyó que este límite de detección no es un impedimento para la aplicación de la detección automática a dunas apenas mayores a este valor, ya que estas fueron claramente identificables tanto manual como automáticamente (*e.g.* Figura 7.8).

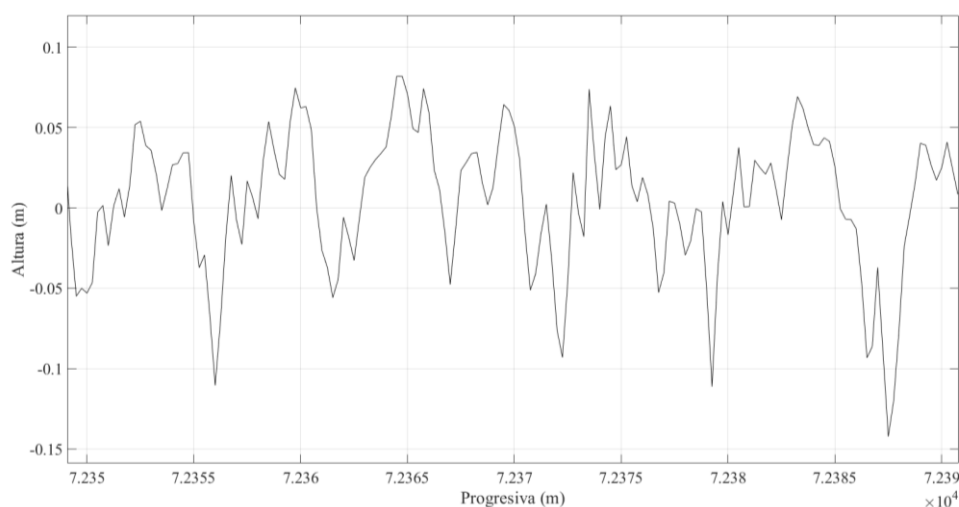


Figura 7.8.- Dunas observadas de aproximadamente 0,15 m de altura y 8 m de longitud – Km 72 de la vía navegable.

7.3.2.1. *Observación manual*

La aplicación de la metodología manual descrita permitió identificar 275 puntos con datos válidos. De estos puntos, 181 presentaron formas de fondo, mayoritariamente dunas. En 18 puntos se detectaron formas de fondo compuestas, en este caso, dunas con dunitas superimpuestas. Al ser las dunas menores (superimpuestas) de escala similar a las dunas medias del río, éstas fueron tratadas para las estadísticas como las demás dunas observadas. A los efectos de poner énfasis en el tamaño y presencia de las dunas mayores de las formas de fondo compuestas, estas se trataron por separado.

En este análisis se pudieron identificar: fondo irregular con pequeñas formas de fondo (Figura 7.9), trenes de dunas pequeñas (Figura 7.10), dunas grandes (Figura 7.11), dunas con dunas menores superimpuestas (Figura 7.12), y lechos irregulares cuya ubicación y constitución permite inferir que corresponden a roca (Figura 7.13).

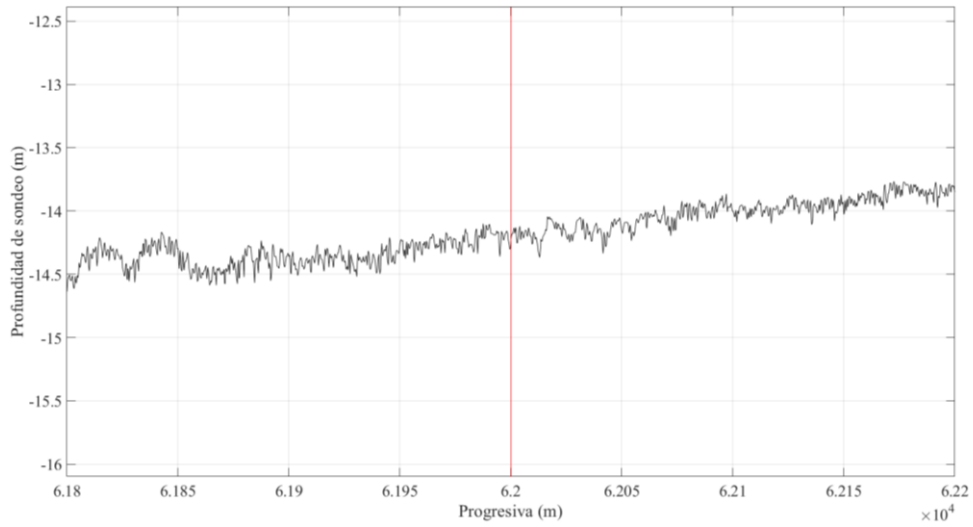


Figura 7.9.- Fondo irregular con pequeñas formas de fondo, kilómetro 62.

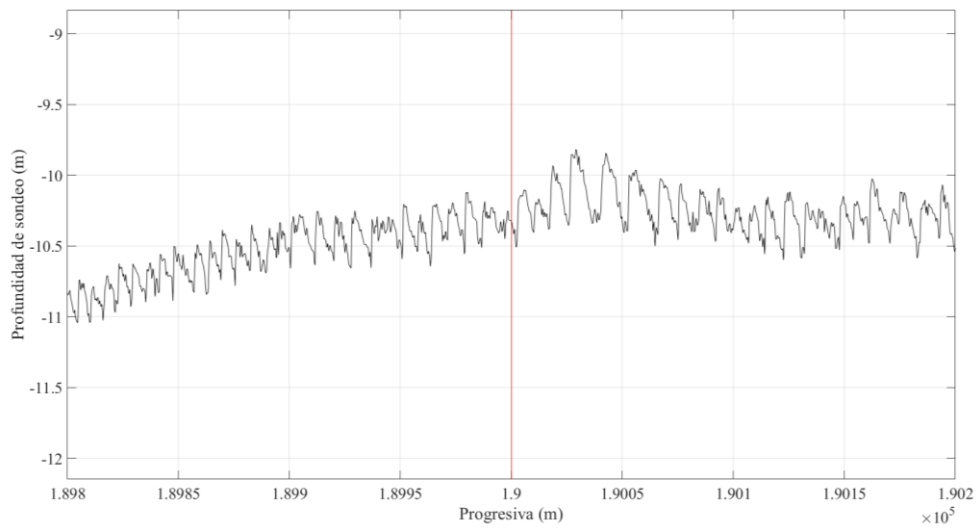


Figura 7.10.- Fondo con dunas pequeñas, kilómetro 190.

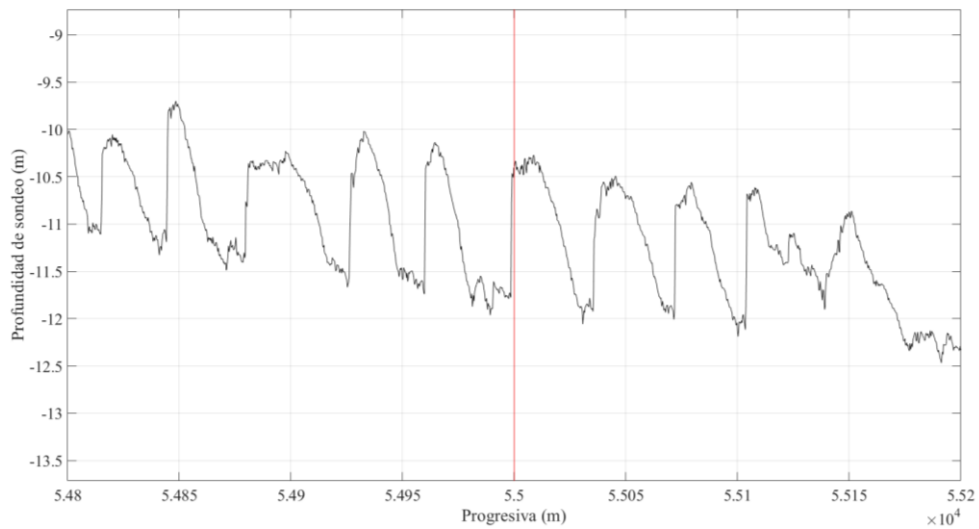


Figura 7.11.- Fondo con dunas grandes, kilómetro 55.

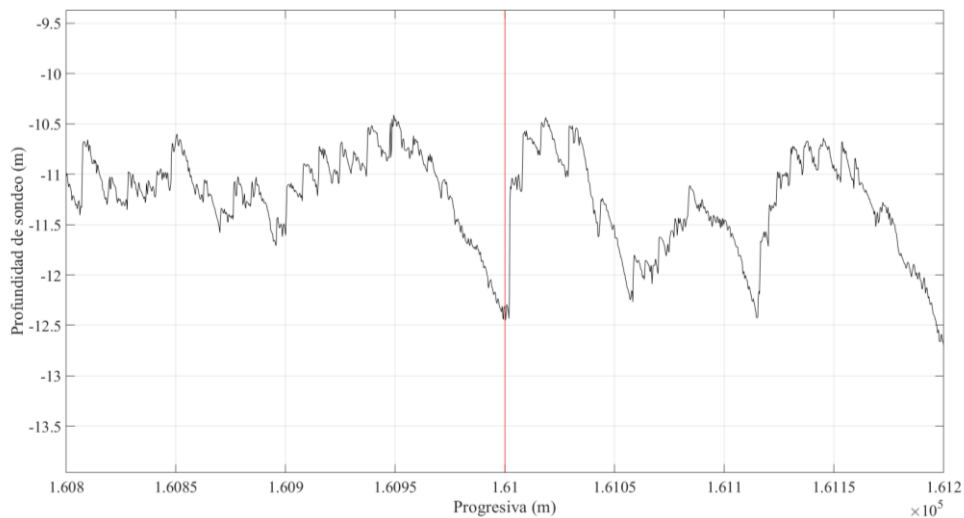


Figura 7.12.- Fondo con dunas grandes con dunas más pequeñas superimpuestas, kilómetro 161.

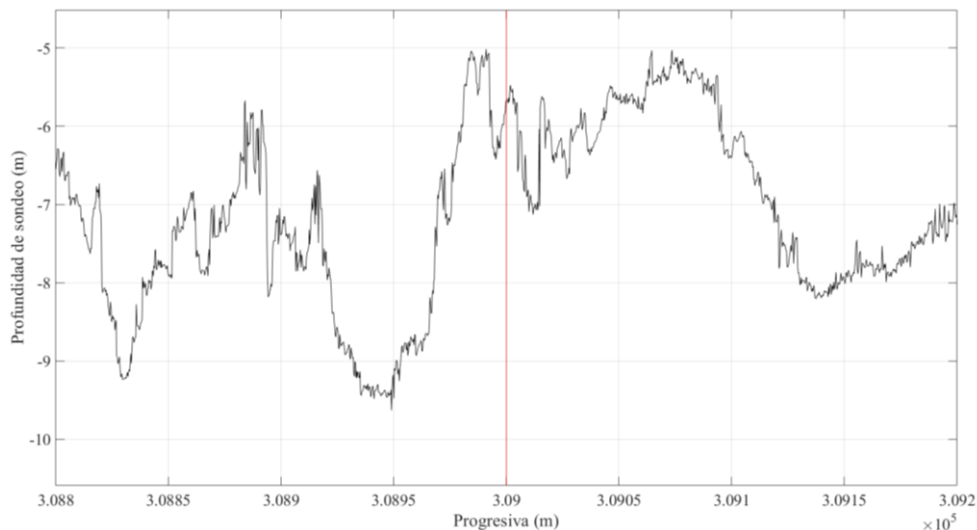


Figura 7.13.- Fondo irregular (lecho rocoso), kilómetro 309.

En el tramo estudiado, las dunas y las dunas menores superimpuestas sobre formas de fondo mayores presentaron alturas que varían entre 0,12 m y 2,90 m, con un valor medio de 0,53 m. Sus longitudes oscilaron entre 2,5 m y 194 m, con una longitud media de 18,22 m.

Respecto a las formas de fondo compuestas, las dunas mayores mostraron una altura media de 1,36 m (rango: 0,50 a 2,50 m) y una longitud media de 119,5 m (rango: 42,5 a 250 m). Por su parte, las dunas superimpuestas presentaron una altura media de 0,37 m (rango: 0,20 a 1,00 m) y una longitud media de 9,31 m (rango: 4,00 a 31,50 m).

Esto indica, además, que las dunas menores son aproximadamente tres veces más empinadas que las mayores, con pendientes de 0,041 y 0,013 respectivamente.

En la Figura 7.14 y Figura 7.15 se exhiben los valores de altura y longitud medidos. Se destacan con otro símbolo las dimensiones de las formas de fondo mayores en una estructura compuesta. Allí se observa claramente que la mayor concentración de formas de fondo compuestas se da en el tramo entre los kilómetros 130 y 200 (Nuevo Berlín – Paysandú), que coincide con la zona de bancos e islas del sistema (Delta Holoceno según Iriondo & Kröhling, 2008).

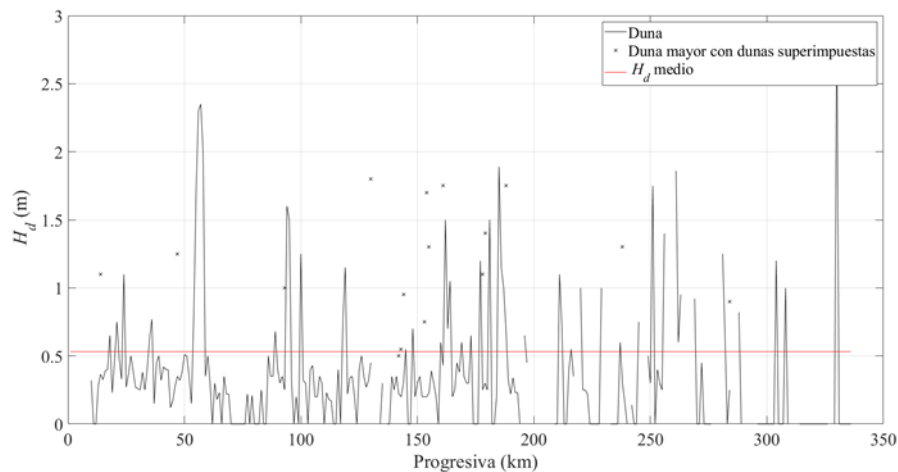


Figura 7.14.- Alturas de dunas medidas manualmente.

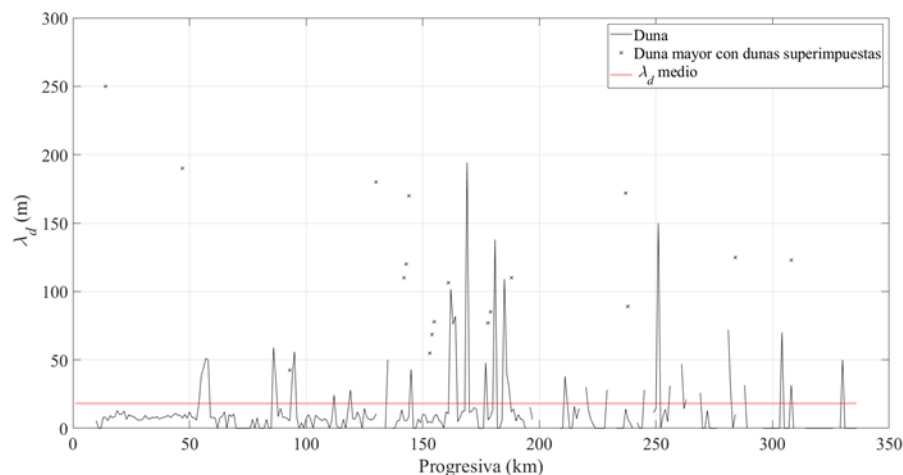


Figura 7.15.- Longitud de dunas medidas manualmente.

7.3.2.2. Selección del mejor perfil automático

En el algoritmo BTT, la selección de la longitud característica del filtro utilizada para eliminar la tendencia de fondo está relacionada con las oscilaciones de gran escala sobre las cuales se superponen las dunas de interés (van der Mark & Blom, 2007). Estudios previos realizados por Nardin et al. (2018) y Nardin et al. (2019b) respaldan la validez de dos longitudes características del primer filtro aplicadas al río Uruguay: 256 m y 512 m. A lo largo de los 336 km analizados, es evidente que existirán tramos en los que una

tendencia de fondo asociada a una longitud característica de 256 m reflejará de manera más fiel las oscilaciones de gran escala presentes en el lecho, en comparación con una longitud de 512 m. Esta variabilidad responde a las distintas oscilaciones de baja frecuencia que pueden manifestarse a lo largo del perfil longitudinal.

Sin embargo, la implementación de una selección automática de dicha longitud en el algoritmo implicaría un incremento sustancial en los tiempos de procesamiento, comprometiendo la operatividad y la rapidez requeridas por la metodología, al ser este paso el más demandante computacionalmente del algoritmo.

Por tal motivo, en la Figura 7.16 se presenta una comparación entre las formas de fondo identificadas manualmente y aquellas detectadas automáticamente por el algoritmo, utilizando longitudes características fijas de 256 m y 512 m aplicadas uniformemente a todo el perfil longitudinal. La comparación se realizó tomando como referencia la duna medida manualmente en cada progresiva, y contrastándola con la duna detectada por el algoritmo en la misma ubicación.

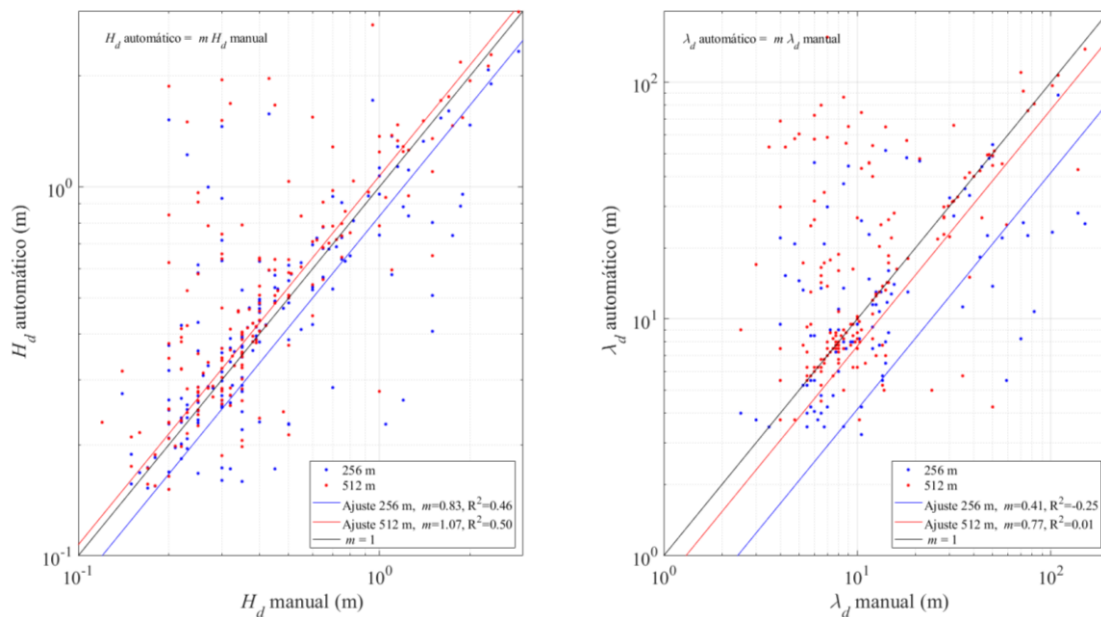


Figura 7.16.- Comparación medición manual con la medición automática de altura y longitud de forma de fondo, para las dos longitudes características del filtro de fondo.

El agrupamiento de los datos alrededor de la recta de pendiente (m) = 1 es aceptable para las alturas de dunas, y la longitud del filtro de fondo de 512 m. Esta correspondencia presenta una sobreestimación del 7%, y un coeficiente de determinación de 0,50. El caso de las longitudes presenta mayores errores, no obstante, el mejor ajuste se produce para una longitud característica del filtro de fondo de 512. En consecuencia, para lo

subsiguiente de este capítulo se trabajará con los valores de mediciones automáticas obtenidas con el filtro que tiene una longitud característica de 512 m. La sensibilidad observada al tamaño del filtro, y los errores asociados a la longitud de dunas pueden deberse principalmente a esta selección. Por esto, a partir de aquí, la altura será un descriptor más confiable de las formas de fondo que su longitud.

La dispersión observada en la figura precedente hace que esta herramienta tenga cierta incertidumbre en su aplicación. No obstante, a partir de ella se pudo realizar el procesamiento de formas de más de 24.000 formas de fondo, con un tiempo de procesamiento sustancialmente menor al manual.

Por este motivo, si bien se presenta el análisis correspondiente a las longitudes en términos estadísticos, se entiende que el resultado tiene una validez limitada.

7.3.2.3. Dimensiones de las formas de fondo

La aplicación automática del algoritmo BTT permitió la identificación de 24.734 formas de fondo sobre el PLD. Se obtuvieron las dimensiones características de cada forma de fondo medida. Asimismo, como el algoritmo fue programado para procesar tramos de 1000 ubicados entre 500 metros aguas arriba y 500 metros aguas abajo del kilómetro en la vía navegable, la salida del software incluye el valor medio, mínimo, máximo y mediana de las dimensiones características (altura y longitud de dunas) en ese tramo.

Sobre estas formas de fondo, se eliminaron aquellas donde la altura característica fuera menor a 0,15 m y mayor a 3,5 m, considerándolos *outliers* ya que 0,15 metros fue el límite de detección, y no se registraron formas mayores a 3,5 metros en la inspección visual de los perfiles relevados. Esta operación resultó en 15.912 dunas que cumplen el criterio establecido. Estas dunas presentaron **una altura promedio de 0,41 m y una longitud promedio de 12,73 m**, lo cual implica un 22% de error para las alturas medias y un 30% de error para las longitudes respecto de la medición manual ($H_d = 0,53$ m y $\lambda_d = 18,22$ m). Se exhiben en la Figura 7.17 la frecuencia de cada tamaño en términos de probabilidad de ocurrencia.

Para el cálculo de la pendiente de la cara aguas abajo de las dunas (θ_d) se utilizó la forma de computar esta variable propuesta en el algoritmo BTT (van der Mark & Blom, 2007). Esta metodología considera las dos terceras partes intermedias de la cara de aguas abajo de la duna, siempre y cuando dentro de ese rango existan, al menos, 3 puntos medidos. Este criterio redujo la cantidad de dunas a 6470, sobre las cuales se pudo computar la

pendiente. Debido al criterio utilizado, se entiende la existencia de un sesgo hacia la medición de esta variable sobre dunas mayores, donde existió mayor probabilidad de definición numérica en la serie de datos, y donde predominantemente se observan de manera manual pendientes menores. Por este motivo se omite la presentación de estadísticas de esta variable y se presentan los resultados obtenidos, en función de su distribución espacial, en el punto siguiente.

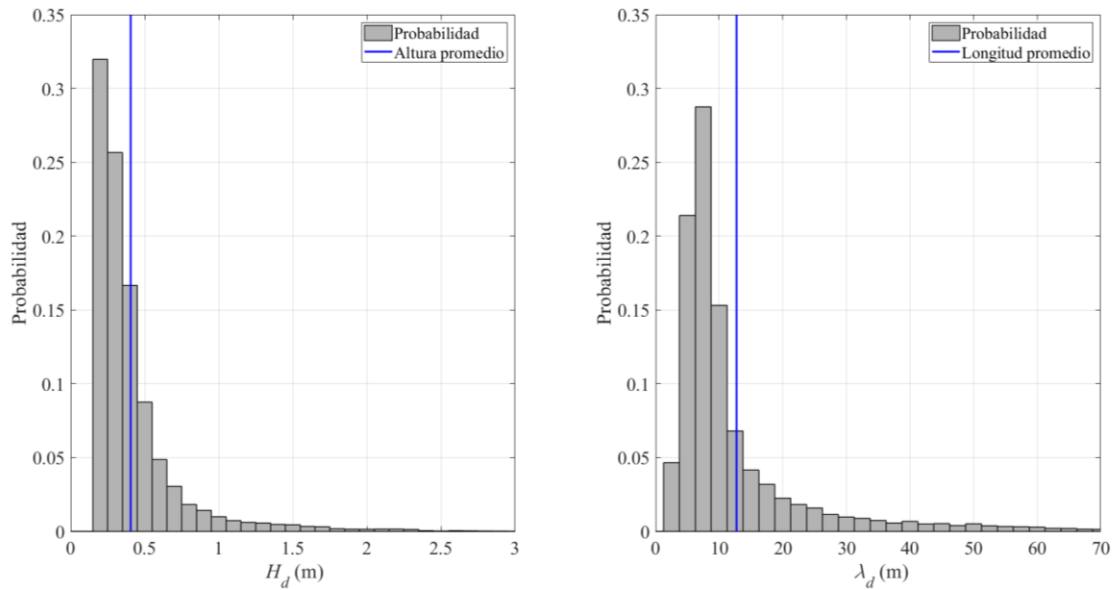


Figura 7.17.- Probabilidad de altura y longitud de dunas.

7.3.3. Distribución geográfica de las formas de fondo y relación con la geomorfología

En las figuras siguientes se exhiben la altura (Figura 7.18), longitud (Figura 7.19) y pendiente de la cara de aguas abajo (Figura 7.20) de las dunas medidas con el algoritmo BTT, a lo largo de la progresiva del canal de navegación. Estas mediciones se contrastan con la media móvil cada 10 y 50 kilómetros, así como también con su valor medio en el tramo, calculado como el promedio de los valores registrados.

Tanto para la altura como para la longitud se observa una tendencia creciente desde el kilómetro cero hacia aguas arriba, hasta el kilómetro 150, y un mantenimiento relativo de los valores altos hasta el kilómetro 270, que es donde comienza el cambio geológico y geomorfológico asociado a los afloramientos rocosos y el estrechamiento del cauce principal. Esto tendría una asociación con la prevalencia textural de las arenas de mayor diámetro.

Es excepción a la regla la ocurrencia de dunas mayores en el tramo entre los kilómetros 20 y 60. En esta zona se observan dunas más altas, pero a su vez más cortas (mayor

empinamiento). Se observa una tendencia opuesta para θ_d (Figura 7.20), y para el empinamiento (Figura 7.21) considerando que las dunas mayores presentan menor valor de esta variable.

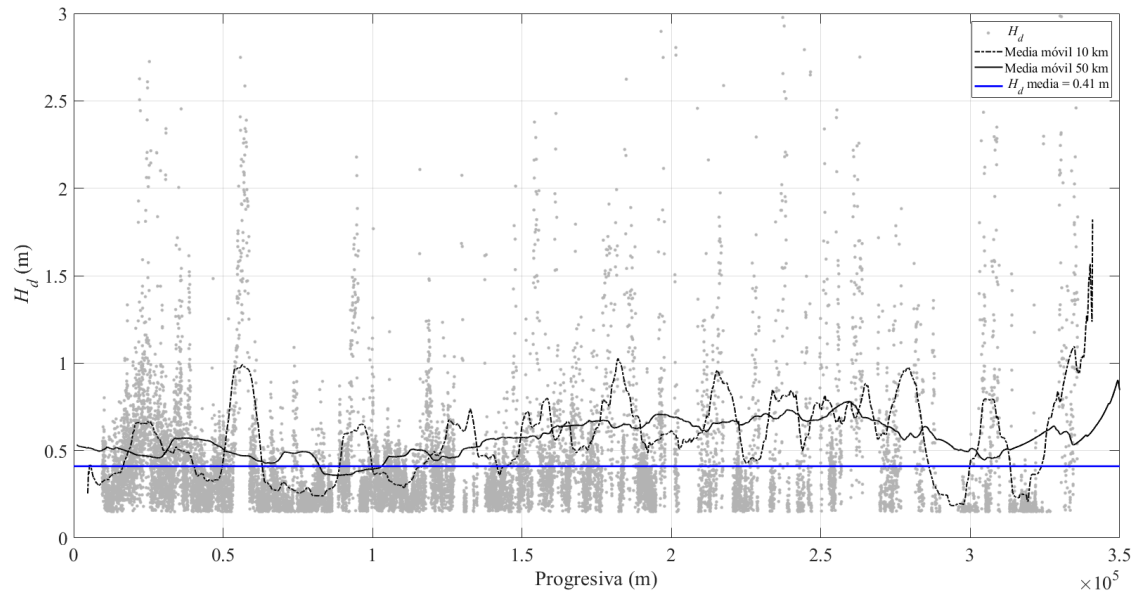


Figura 7.18.- Altura de dunas (H_d) a lo largo del canal de navegación.

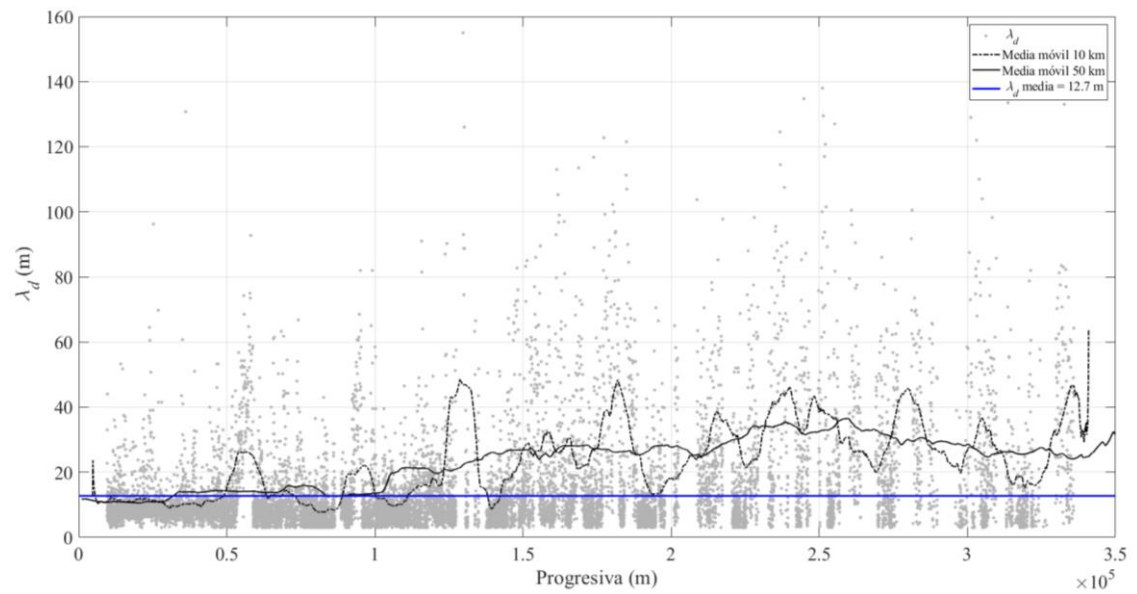


Figura 7.19.- Longitud de dunas (λ_d) a lo largo del canal de navegación.

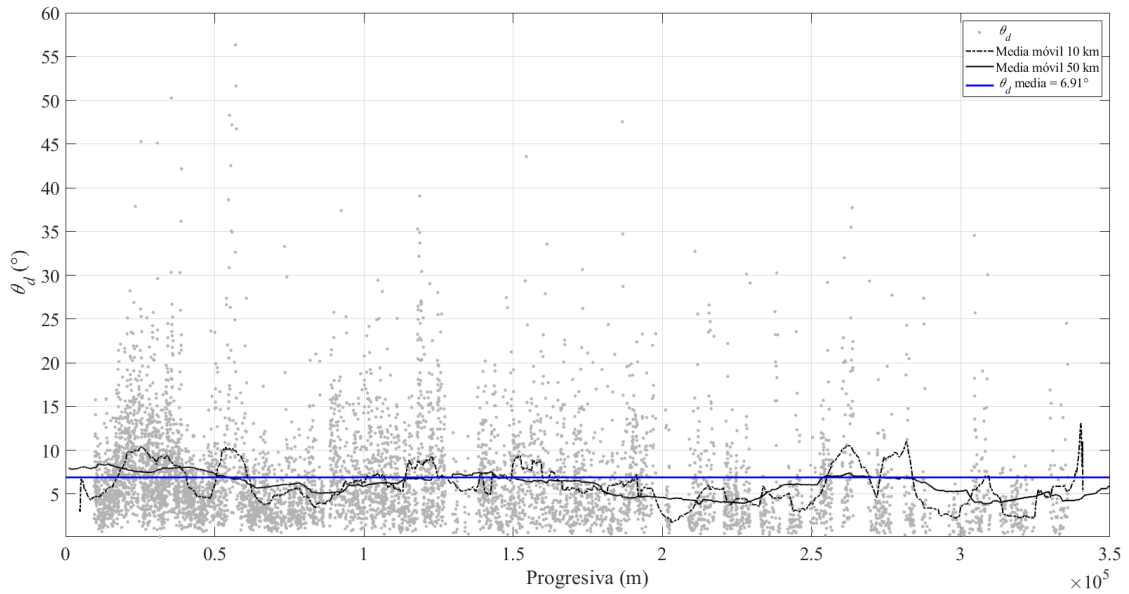


Figura 7.20.- Ángulo de la cara de aguas abajo de las dunas (θ_d) a lo largo del canal de navegación.

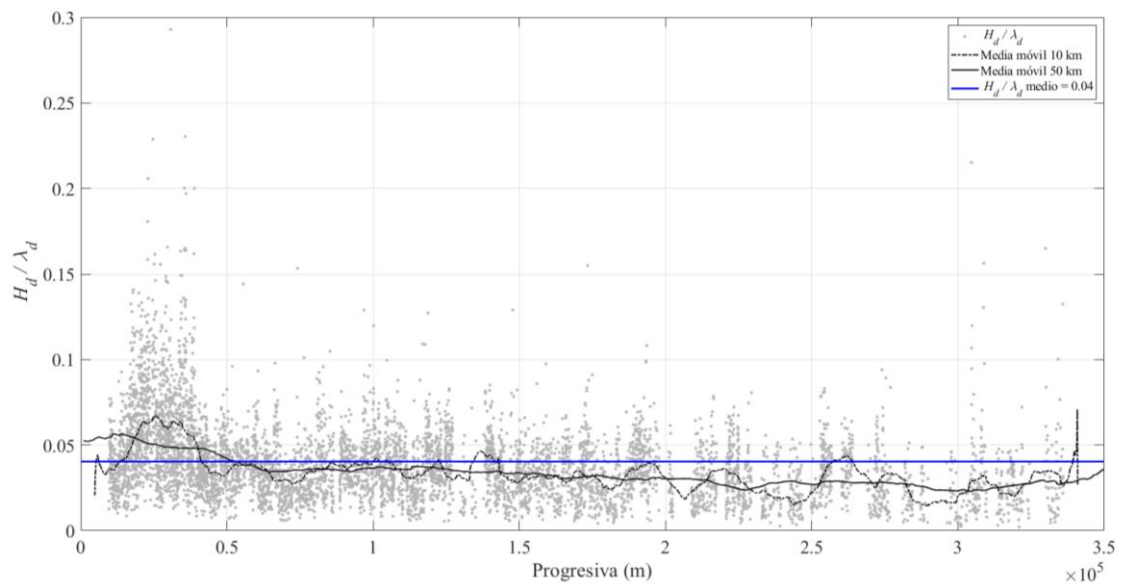


Figura 7.21.- Empinamiento de las dunas (H_d / λ_d) a lo largo del canal de navegación.

En la Figura 7.22 se señalan, por último, las alturas de dunas tal y como en la Figura 7.18, y se indican las ubicaciones (kilómetro) donde se encontraron formas de fondo compuestas (dunas menores o dunitas sobre dunas mayores), que fueron identificadas de manera manual.

En esta última imagen se aprecia claramente que el sector con predominancia de formas de fondo compuestas corresponde al delta holoceno del río Uruguay, tal y como lo definieron Iriondo & Kröhling (2008), que coincide con el sector más activo en términos hidro sedimentológicos.

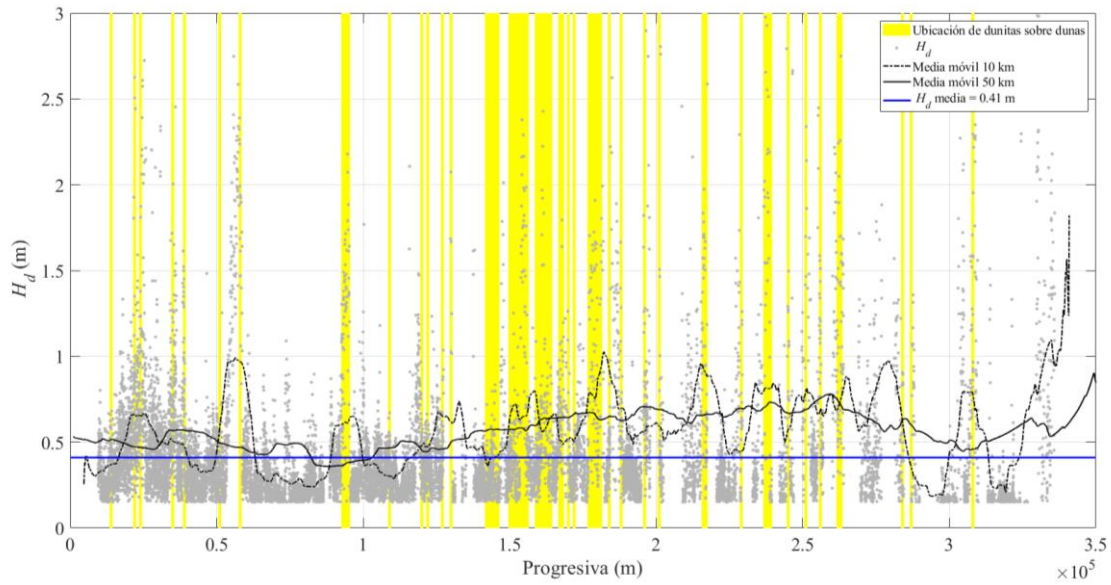


Figura 7.22.- Alturas de dunas y ubicación de formas de fondo compuestas (dunitas sobre dunas).

Dada la variación en las formas de fondo a lo largo de los distintos sectores del río, se analizó la existencia de una correlación entre el patrón geomorfológico, representado por el ancho del cauce, y las dimensiones de dichas formas. En la Figura 7.23 se observan los anchos medidos, mientras que en la Figura 7.24 se los contrasta con la altura y longitud de dunas, medida de manera manual. A los efectos de dar una idea de la respuesta a la geomorfología de cada subtramo descripto, se identificó en código de colores la pertenencia a cada uno, manifestando la subdivisión del tramo superior, aguas arriba a la altura del Parque Nacional El Palmar (km 265).

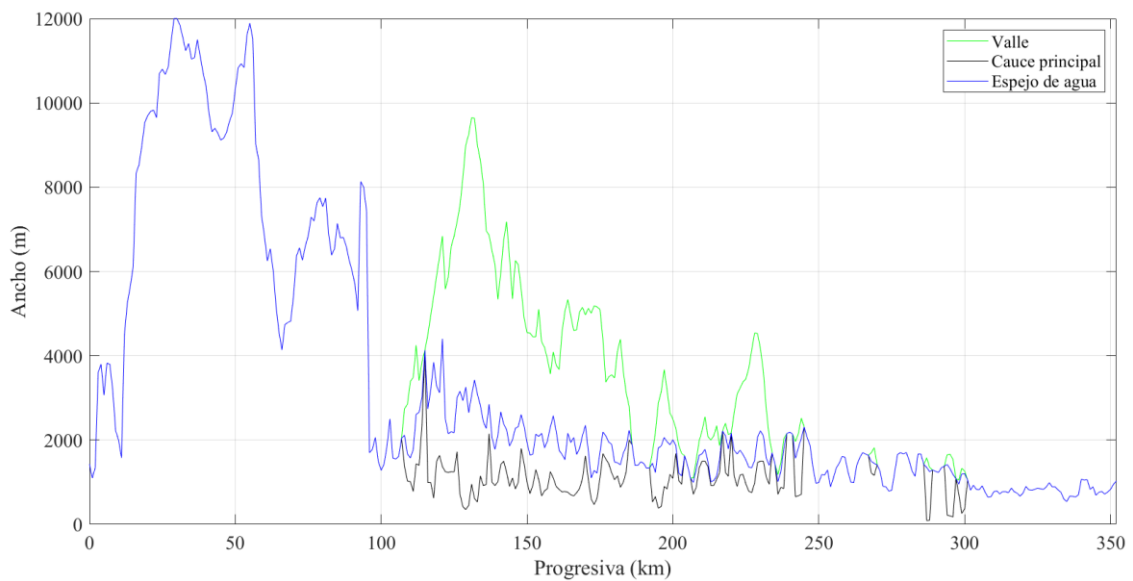


Figura 7.23.- Anchos del río medidos cada 1 kilómetro.

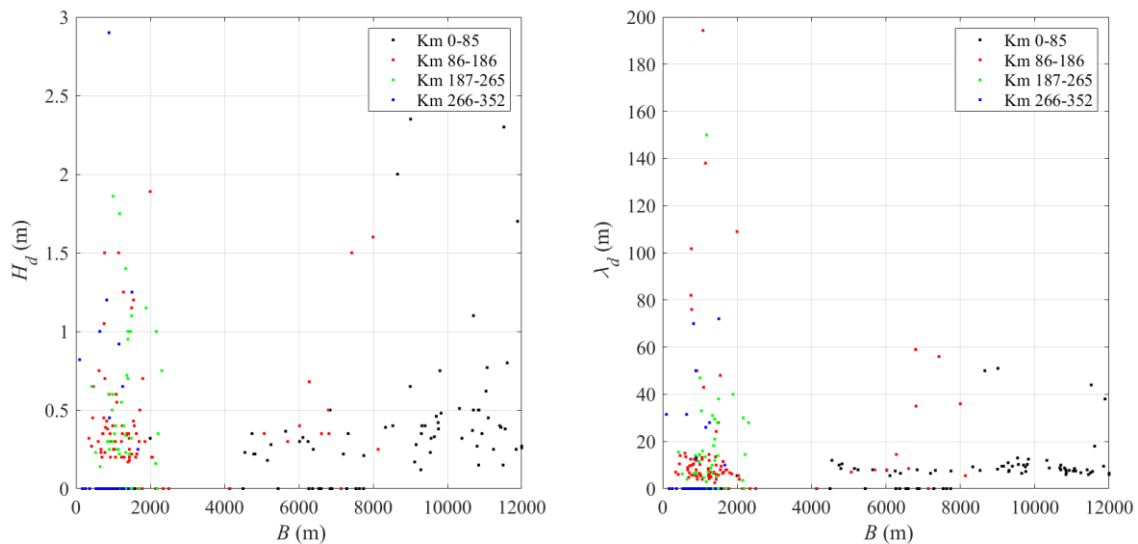


Figura 7.24.- Altura y longitud de dunas con respecto al ancho del cauce principal.

De la observación de la Figura 7.24 se desprende que las dunas mayores ocurren con mayor frecuencia en el tramo de menor ancho, es decir, aguas arriba del km 85. Este espacio incluye el delta holoceno definido por Iriondo & Kröhling (2008), y la zona transicional hacia el tramo de mayor control estructural (km 187-265). La utilización de los otros anchos medidos, así como también la adimensionalización del ancho con el tirante (B/H), para el mismo gráfico, no permite inferir ninguna conclusión diferente.

En cuanto a la sinuosidad, el cálculo manual resultó en un valor promedio de 1,06, un desvío estándar de 0,05 y un máximo de 1,20. Estos valores fueron también consistentes con los resultados de MStat (Dominguez Rúben et al., 2021). El software identificó 61 meandros, con una sinuosidad promedio de 1,09, un desvío estándar de 0,15, y un máximo de 1,89. Debe destacarse que se registraron valores mayores a 1,20 solo para 3 meandros. Estos valores permiten clasificar al canal principal del río Uruguay en el área de estudio como sinuoso, atendiendo a la clasificación de Brice (1975). La relativa estabilidad de esta variable sugiere que su influencia sobre las dimensiones de las formas de fondo sería reducida.

La relación del tamaño de las formas de fondo con el diámetro representativo (d_{50}) se muestra en la Figura 7.25. Allí se exhibe nuevamente la falta de una correspondencia clara entre las variables representadas. Sin embargo, vuelve a quedar de manifiesto la discontinuidad del lecho en la transición del sector inferior (km 0 al 85), con la composición del lecho hacia aguas arriba. Esta discontinuidad es también exhibida cuando se evalúa la capacidad de las ecuaciones de van Rijn (1984c) para la predicción del tamaño de las formas de fondo. Nardin et al. (2019b) señalaron que en el tramo aguas

abajo del km 100, las ecuaciones no predicen formas de fondo, mientras que aguas arriba (entre los km 100 y 220), la escala de las formas de fondo calculada es consistente con las observaciones de campo.

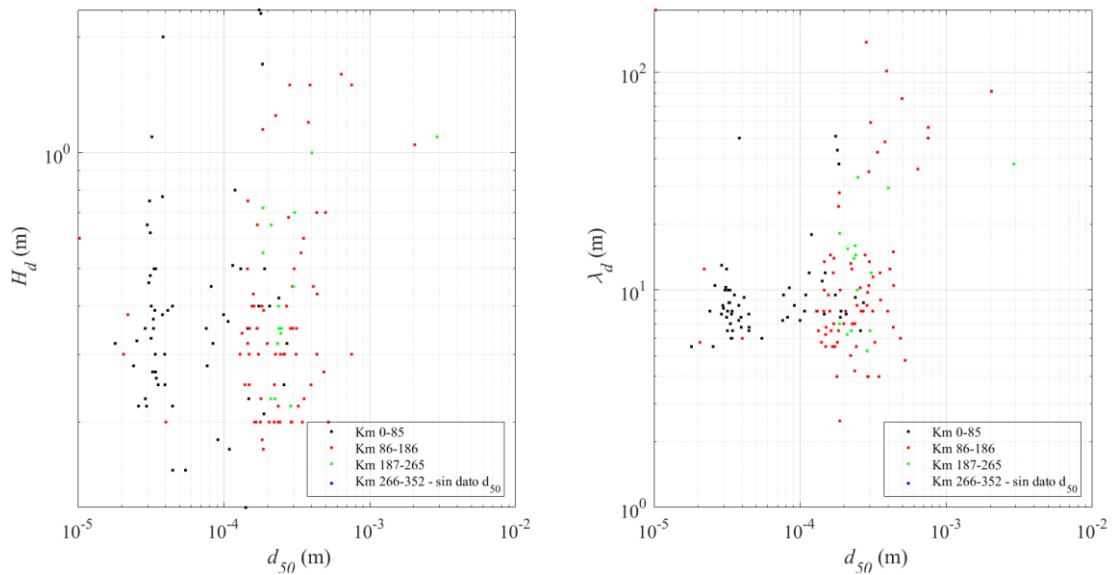


Figura 7.25.- Altura y longitud de dunas con respecto al diámetro representativo (d_{50}).

A los efectos de contabilizar los efectos de la pendiente del lecho (S_b) sobre las formas de fondo, se estimó la potencia específica potencial de la corriente con la ecuación [7.1], según lo propuesto por Kleinhans & van den Berg (2011). En dicha expresión $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ es la densidad del agua, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ es la aceleración de la gravedad y $Q_{ef} = 14.500 \text{ m}^3/\text{s}$ es el caudal efectivo (ver sección 10.3.4).

$$\omega_{pv} = \frac{\rho g Q_{ef} S_b}{B} \quad [7.1]$$

En la Figura 7.26 se observa que este tipo de enfoque, con la variabilidad inherente de los datos de campo, parece mostrar una relación directa entre las variables, quedando las grandes formas observadas a la altura del km 55 – los valores de altura y longitud mayores de dicha figura para el tramo que va hasta el km 85 – restringidas a factores locales.

Por último, los pares de datos de diámetro representativo y potencia específica potencial de la corriente se contrastaron con los criterios de transporte de sedimentos y movilidad/inmovilidad lateral del cauce utilizados por Kleinhans & van den Berg (2011), en la Figura 7.27. Allí se verifica que la potencia específica potencial de la corriente es relativamente baja para producir migraciones laterales significativas, y presenta un comportamiento mixto asociado al transporte de sedimentos, donde el transporte de

sedimentos con mayor potencia se verifica en el tramo transicional ubicado entre los km 186 y 265.

Considerando B y S_b varían relativamente poco para todo el rango de caudal del río, se observa que ω_{pv} será principalmente una función del caudal. Es decir que, para un caudal máximo del río, la potencia se duplicará, dejando a los valores del tramo transicional (km 186-265 en la Figura 7.27), con capacidad de producir migraciones o cambios morfológicos.

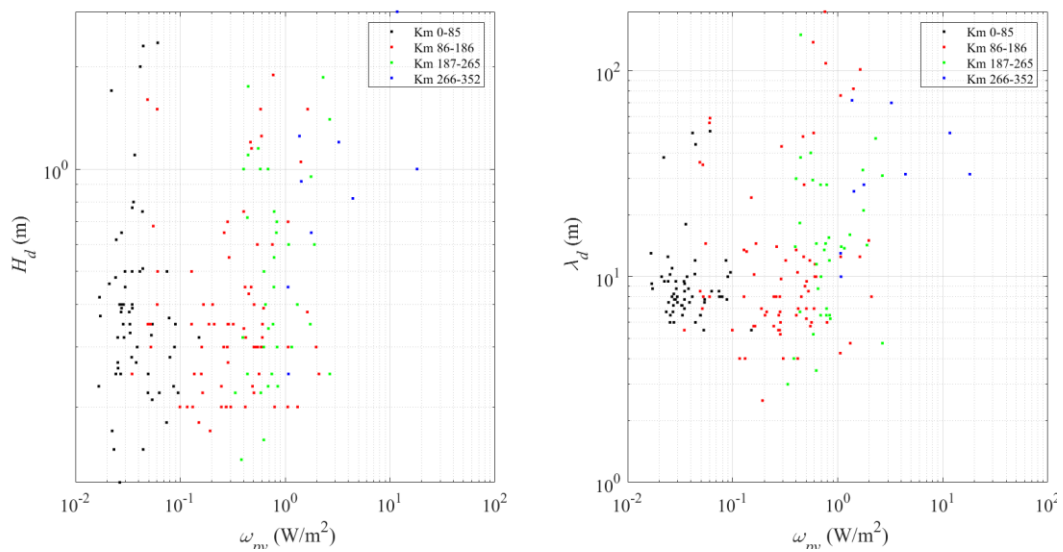


Figura 7.26.- Altura y longitud de dunas con respecto a la potencia específica potencial de la corriente.

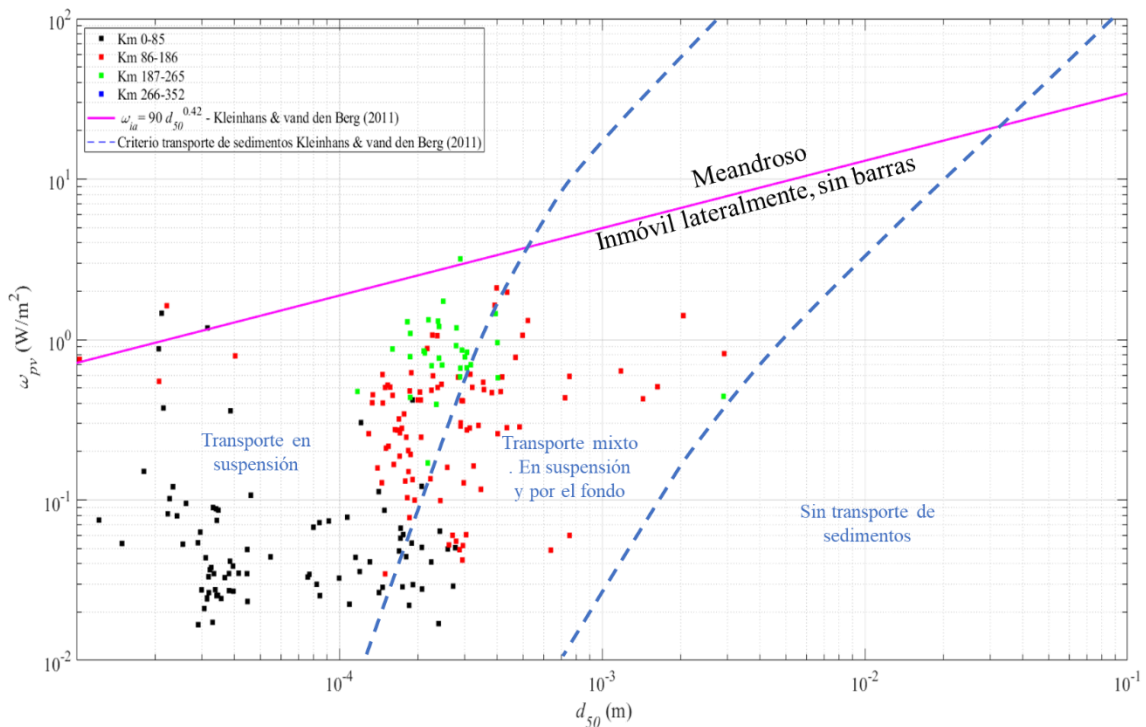


Figura 7.27.- Criterios de movilidad lateral y transporte de sedimentos de Kleinhans & van den Berg (2011) – diámetro representativo y potencia específica potencial de la corriente.

7.4. Conclusiones

Se describió, a partir de datos disponibles, la constitución granulométrica del lecho en el área de estudio. Se logró también la medición de las dunas presentes en el canal de navegación. Para esto último se realizó una medición manual y se aplicó un algoritmo desarrollado por van der Mark & Blom (2007) para la determinación de las dimensiones características de las formas de fondo. Se identificaron dunas en la mayor parte del tramo, y formas de fondo compuestas (dunas con dunas menores superimpuestas) principalmente en el tramo entre los kilómetros 140 y 190.

De esta aplicación se pudo medir cada duna presente en el tramo, totalizando más de 24.000. Sobre estas se lograron calcular las estadísticas de alturas, longitudes y pendientes de la cara de aguas abajo de las mismas. Se observó un valor medio de 0,41 m para alturas y 12,73 m para longitudes medidas con el algoritmo, en contraste con los valores medios de altura, $H_d = 0,53$ m, y longitud, $\lambda_d = 18,22$ m, medidas manualmente. Una de la explicación de esta diferencia puede radicar en la gran variabilidad de estos valores a lo largo del tramo.

En cuanto a la pendiente de la cara aguas abajo, ésta se pudo computar en más de 6000 dunas. Lo surgido permitió identificar que las dunas del río Uruguay tienen pendientes relativamente bajas en comparación con otros grandes ríos, particularmente en sus dunas mayores.

En cuanto a la distribución geográfica de las formas de fondo, se observa una clara diferenciación en subtramos asociados a la constitución del lecho y a las características geomorfológicas del área de estudio. Tanto para la altura como para la longitud se observa una tendencia creciente desde el kilómetro 0 hacia aguas arriba, hasta el kilómetro 140, y un mantenimiento relativo de los valores altos hasta el kilómetro 270, que es donde comienza el cambio geológico/geomorfológico asociado a los afloramientos rocosos en gran parte del cauce y el estrechamiento del cauce principal. Esto tendría una asociación con la prevalencia textural de las arenas de mayor diámetro en dicho entorno. Es excepción a la regla la ocurrencia de dunas mayores en el tramo entre los kilómetros 20 y 60. En esta zona se observan dunas más altas, pero a su vez más cortas (mayor empinamiento). La tendencia opuesta es observada para la pendiente de las dunas. Esto es dunas más empinadas en los kilómetros iniciales de la vía navegable (hasta el km 50), con una tendencia a la disminución de este valor hacia aguas arriba.

Estas formas podrían estar asociadas al ingreso de material más grueso proveniente del río Negro, y a la hidrodinámica condicionada por el nivel del Río de la Plata.

Un ítem relevante en sí mismo es la presencia de las dunas con dunitas superimpuestas. Esta forma de fondo compuesta es así compleja para su identificación automática como para también su estudio. De manera manual, se pudo constatar su existencia, en diferentes frecuencias, a lo largo del área de estudio. La zona donde predominan estas formas se ubica entre los kilómetros 140 y 190. Independientemente de los valores medios ya señalados ($\lambda_d = 119,5$ m y $H_d = 1,36$ m), se destaca que estos valores varían entre 42,5 m y 250 m para las longitudes y entre 0,50 m y 2,50 m para las alturas.

Estas dimensiones observadas, parecen a priori ser independientes del patrón geomorfológico del río caracterizado por su ancho, o sus condiciones hidrodinámicas promedio, sino más bien producto de la combinación de escenarios hidrodinámicos que se producen en cada tramo del área de estudio. Sin embargo, del enfoque asociado a la potencia específica potencial de la corriente, se ha establecido que el tramo con capacidad de generar desplazamientos laterales y barras, es el tramo transicional entre los km 185 y 265, en los cuales se verifican escenarios como el exhibido en la Figura 7.1.

Capítulo 8

Transporte de sedimentos por el fondo

8.1. Introducción

A la fecha, en el río Uruguay no existe información sistematizada de transporte de sedimento grueso por fondo (g_{sf}). Cuando se iniciaron los trabajos de dragado de apertura en el año 2015, los dragados de mantenimiento se estimaron sobre la base de la información empírica disponible. Se contrató oportunamente una consultora para realizar una modelación hidrosedimentológica de los pasos de navegación, pero al observarse resultados no compatibles con la realidad empírica, esta herramienta fue desechada.

Esta modelación fue retomada en el 2018, en el marco de una Práctica Profesional realizada bajo la supervisión técnica del Departamento de Hidrología de la CARU (Villalba, 2018). El estudio antes mencionado presentó inconsistencias en la carga de datos al modelo, que podrían explicar errores de un orden de magnitud en las estimaciones de g_{sf} , para los distintos pasos de navegación.

Experiencias de este estilo son un gran aliciente para desarrollar conocimiento en esta área. Cualquier aporte metodológico y de información que se realice podrá servir de variable de entrada para los modelos hidrosedimentológicos, y arribar así a productos con mayor nivel de certidumbre. Esto último permitiría a los Estados Parte de la Comisión Administradora del Río Uruguay desarrollar la vía navegable sobre un conocimiento más sólido sobre la dinámica de los sedimentos en el lecho, proveyendo herramientas técnico-económicas como la presentada en Villalba et al. (2019) “*Use of hydrodynamic models for decision-making in dredging works. Uruguay River waterway case (Argentina)*”.

En términos generales, en los grandes ríos existen pocos datos sobre mediciones directas de esta variable debido a su dificultad de obtención. Normalmente los muestreos implican

el anclado en el canal de navegación, con equipos pesados que permitan alcanzar el fondo, sometiendo a la embarcación a grandes tensiones. A esto se le suma la dificultad de la toma de muestras, empaquetado y procesamiento de las mismas con sus inherentes costos.

Una de las metodologías tradicionales para la estimación de esta variable se basa en el seguimiento de la migración de formas de fondo, y ha probado dar resultados satisfactorios desde hace más de cinco décadas (Simons et al., 1965). No obstante, debido a la complejidad de la variable, aún las mejores mediciones presentan errores comprendidos en el rango del 100% en la sección transversal (van Rijn, 2007). Este método requiere formas de fondo de tamaños detectables, y que se muevan lo suficientemente rápido para observar cambios entre dos relevamientos sucesivos. Particularmente, este método debe aplicarse con cuidado en los casos donde existen formas de fondo compuestas (Serra, 2007), tal y como en el río Uruguay. Estas restricciones hacen que su uso sea relativamente limitado.

Una mejora significativa en esta metodología se logra con la aplicación de los sistemas de ecosondas multihaz (los denominados equipos Multibeam o MBES), que permiten la cuantificación de las formas de fondo de manera tridimensional y, por lo tanto, realizando mediciones sucesivas en el tiempo, la incertidumbre en la cuantificación del transporte de fondo se reduce sustancialmente en comparación a las mediciones con equipo de haz simple. Lamentablemente, aun no se disponen en la actualidad sistemas multihaz que puedan ser utilizados en el río Uruguay.

Para generar bases de datos de transporte de fondo más extendidas, en las últimas dos décadas se comenzaron a explorar distintas metodologías basadas en ADCPs para la cuantificación de g_{sf} , no obstante, el número de publicaciones es más limitado que para el caso de g_{ss} . Se destacan aquí las contribuciones tempranas de Colin Rennie y sus colaboradores (2002; 2004a; 2004b), Villard et al. (2005), Kostaschuk et al. (2005), Gaeuman & Jacobson (2006; 2007), Jamieson et al. (2011), y las recientes de Latosinski et al. (2017) y Conevski (2020). Estas publicaciones basan sus resultados en la medición de la velocidad de desplazamiento del fondo, v_B , a partir de la diferencia entre la velocidad del bote registrada con sistemas de posicionamiento global (DGPS), v_{DGPS} , y la velocidad del bote registrada por un sistema que poseen los ADCPs llamado “*BottomTrack*” (*BT*), v_{BT} . En este sentido, se subraya la publicación de Latosinski et al. (2017), en la cual se realizan comparaciones entre el transporte obtenido con los parámetros medidos por el ADCP y el calculado con el método de seguimiento de dunas, método tradicional

utilizado en grandes cauces como los Ríos Paraná o Uruguay. Sin embargo, mayores comprobaciones son necesarias para encontrar metodologías confiables y estandarizadas en el uso de los ADCPs para el cálculo de la velocidad de las partículas de fondo. Esto es particularmente importante en condiciones de lecho arenoso de bajas pendientes (como el caso del Río Uruguay), en donde las velocidades de desplazamiento de este material se estima que sean menores que las registradas en los trabajos previos para lecho gravoso o arenoso, de alta velocidad y pendiente.

De la misma manera que se ha desarrollado la tecnología acústica de los ADCPs para la estimación del movimiento de sedimentos, también existen trabajos recientes que intentan vincular el transporte de sedimentos con la señal acústica de las ecosondas multihaz, tanto para sedimentos en suspensión (Best, et al., 2010), como para sedimentos transportados por el fondo (Holmes, 2010; Leary & Buscombe, 2020).

A costo de menor resolución temporal, las trincheras de captación de sedimentos son un método directo para la determinación del volumen de sedimentos transportado por el fondo en un intervalo de tiempo dado (Rennie, 2017). Este método permite capturar los clastos circulantes por el fondo, y cuantificarlos por el contraste topográfico entre dos relevamientos batimétricos subsecuentes. Luego, el transporte de sedimentos surge como una solución de la ecuación de Exner (Parker, 2004), para el tramo de estudio, en el intervalo de tiempo dado. Un canal de navegación recientemente dragado puede funcionar, en cierta medida, como un cuenco de captación y permitir este tipo de estimaciones, siempre y cuando se verifique que la salida de sedimentos es despreciable con respecto a la entrada.

Por último, y con errores aceptables de hasta 100% (Vanoni, 2006), las fórmulas de transporte de sedimentos por el fondo permiten estimar esta variable a partir de los datos hidrodinámicos y sedimentológicos. Sin embargo, antes de aplicar cualquier fórmula de transporte disponible en la bibliografía, se debe realizar la validación de las mismas utilizando datos medidos en campo. La determinación de las incertidumbres de las fórmulas es un paso clave y absolutamente necesario a fin de seleccionar la que mejor se adapta las condiciones del cauce en estudio.

Se daba por sentado en la planificación de este doctorado que la metodología principal a seguir en este trabajo sería la asociada a la hidroacústica activa (medición con ADCPs). Las limitaciones a los trabajos de campo impuestas por la pandemia, impidieron explotar estas metodologías al nivel que se esperaba. Supletoriamente, este capítulo se nutre de

una variedad de información de campo, trabajos previos inéditos y antecedentes publicados como Nardin et al. (2019a; 2021) para lograr una aproximación al objetivo inicial. Es pues, objetivo del presente capítulo, utilizar este universo de datos, tecnologías y metodologías disponibles para lograr, tal y como se hizo para el tamaño de dunas en el capítulo anterior, un panorama completo del área de estudio en cuanto a transporte de fondo se refiere.

8.2. Metodologías y Resultados

Se utilizó toda la información disponible respecto de mediciones de transporte de fondo, independientemente de la metodología o de la calidad de la información disponible (teniendo en cuenta que hubo campañas no diseñadas para este fin). Este conjunto de información fue procesado de acuerdo a los métodos introducidos en el apartado 2.3.3 “Medición del transporte de sedimentos aluviales transportados por el fondo”, que se profundizan a continuación.

Debido a que este capítulo contempla la aplicación de cuatro metodologías diferentes para la obtención del transporte de sedimentos por el fondo, a los efectos de simplificar la lectura se presenta cada metodología en conjunto con los resultados alcanzados.

8.2.1. Estimación a partir del análisis de batimetrías del canal de navegación

8.2.1.1. Introducción y marco teórico

En un tramo de cauce aluvial como el esquematizado en la Figura 8.1, puede aplicarse la ecuación de Exner [8.1] para estimar el transporte de sedimentos de fondo. Ésta representa el balance sedimentológico unidimensional (en la dirección del eje x), para un lecho con granulometría relativamente uniforme, de porosidad igual a P , y de altura (η) sobre un plano de referencia, que varía en el tiempo y en la dirección x (Parker, 2004). La porosidad, P , se define como el volumen de vacíos sobre el volumen total de depósito sedimentario, en este caso el lecho del río. La porosidad, para arenas como las del río Paraná, toma un valor aproximado de 0,4 (Latosinski, 2014), lo cual es homologable al caso del río Uruguay (López Weibel, 2018).

Para compatibilizar con gran parte de la bibliografía, se utiliza en este capítulo la variable q_{sf} , que representa el transporte de fondo ya definido, dividido entre la densidad del sedimento transportado. Es decir: $q_{sf} = g_{sf} / \rho_s$.

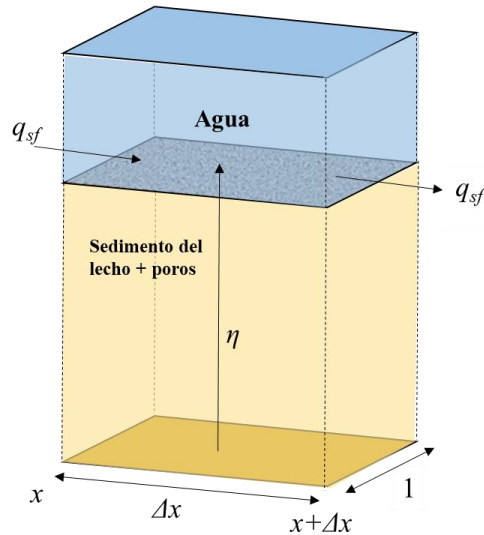


Figura 8.1.- Esquematación de un tramo unidimensional de cauce aluvial. Adaptado de Parker (2004).

$$(1 - P) \frac{\partial \eta}{\partial t} = - \frac{\partial q_{sf}}{\partial x} \quad [8.1]$$

Esta ecuación se traduce como un balance entre la variación de volumen de sedimentos almacenados en el tramo de estudio con la diferencia entre el sedimento que entra y sale del mismo en un período de tiempo determinado. Esto, en términos discretos se escribe como [8.2], que puede ser integrada para un intervalo de tiempo dado (Δt) tal que:

$$(1 - P) \frac{\Delta \eta}{\Delta t} = - \frac{\Delta q_{sf}}{\Delta x} \Rightarrow \Delta q_{sf} = -(1 - P) \frac{\Delta \eta}{\Delta t} \Delta x = -(1 - P) \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad [8.2]$$

Siendo ΔV el cambio en el volumen de sólidos almacenado en el paso. En [8.2] se observa que para el caso donde no exista caudal sólido de salida, el caudal de entrada será igual a la variación del volumen de sedimento acumulado a lo largo del tiempo. Para un paso de navegación, esta condición no puede ser asegurada, y por este motivo la expresión puede utilizarse para conocer la variación del transporte de fondo. Este dato puede luego ser contrastado con el calculado por fórmulas.

8.2.1.2. *Procesamiento*

En la Tabla 5.8 se señaló la existencia de 295 batimetrías distribuidas en 20 pasos de navegación fluvial ubicados entre el km 0 y el 206.

Dichas batimetrías se dividieron considerando cada paso de navegación. La primera batimetría correspondiente a cada paso fue la batimetría de recepción final de la etapa de construcción de la vía navegable. Por esto último, se puede considerar que es una

condición de referencia para el paso. Luego, en cada paso se registraron desde 3 hasta 33 batimetrías posteriores, dependiendo de la frecuencia establecida en la Tabla 5.8.

Cada batimetría consistió en un relevamiento trasversal, espaciado cada 50 metros, y tres líneas longitudinales, ubicadas en la línea central del canal y en cada veril del mismo. Posteriormente al relevamiento, la empresa contratista que ejecutó las tareas de batimetría (Jan de Nul), reportó un archivo (de formato .xyz) de sondeos reducidos por marea al cero local interpolado. Este archivo presentaba una selección de datos cada 5 metros (promedio espacial), que permitía una correcta apreciación de los perfiles y reducía significativamente el volumen de información.

El modelo de Exner, explicitado en el punto anterior, es unidimensional. En este sentido se utiliza dicho modelo entendiendo que la dirección predominante del movimiento de sedimentos es paralela al canal de navegación. Por este motivo, si bien se computan las variaciones transversales del canal, la variación en el transporte de sedimentos (Δq_b) se calcula como unidimensional.

El procesamiento de la información recibida consistió en un algoritmo con las siguientes etapas:

- 1) Obtención del área mínima relevada: se obtuvo, para cada paso, el polígono mínimo que fue relevado en todas las batimetrías.
- 2) Cálculo del volumen de agua suprayacente: La información batimétrica recibida se refirió al nivel de referencia hidrométrico en cada paso. Por ello, la coordenada η corresponde a la cota del fondo desde dicho nivel de referencia. Se interpolaron las profundidades relevadas en una cuadrícula de 10 m x 10 m. Luego, se calculó el volumen total de dicha superficie al nivel de referencia. Este volumen se calculó como la sumatoria de los volúmenes de los correspondientes prismas de 10 m x 10 m, y altura correspondiente a un valor de la coordenada η .
- 3) Volumen relativo (sedimentación o erosión en el paso): se tomó como volumen de referencia el correspondiente a la primera batimetría disponible en cada paso. Luego, el volumen sedimentado o erosionado de cada batimetría subsecuente se calculó como la diferencia entre el volumen calculado para la batimetría analizada y la de referencia.

- 4) Tasa de sedimentación, T_{sed} : este valor se obtuvo como el volumen relativo dividido el área del polígono del paso, y el tiempo transcurrido entre batimetrías subsiguientes.
- 5) Cambio en el caudal sólido volumétrico, Δq_{sf} : en los tiempos donde no existió dragado entre dos batimetrías sucesivas, el valor de T_{sed} , multiplicado por $(1-P)$ resulta en Δq_{sf} de la ecuación [8.2].

8.2.1.3. Resultados y discusión

En la Figura 8.2 se muestra la evolución del volumen relativo en cada paso, considerando como valor de referencia el correspondiente a la primera batimetría analizada. Esto permite evaluar el comportamiento cronológico de cada paso de navegación.

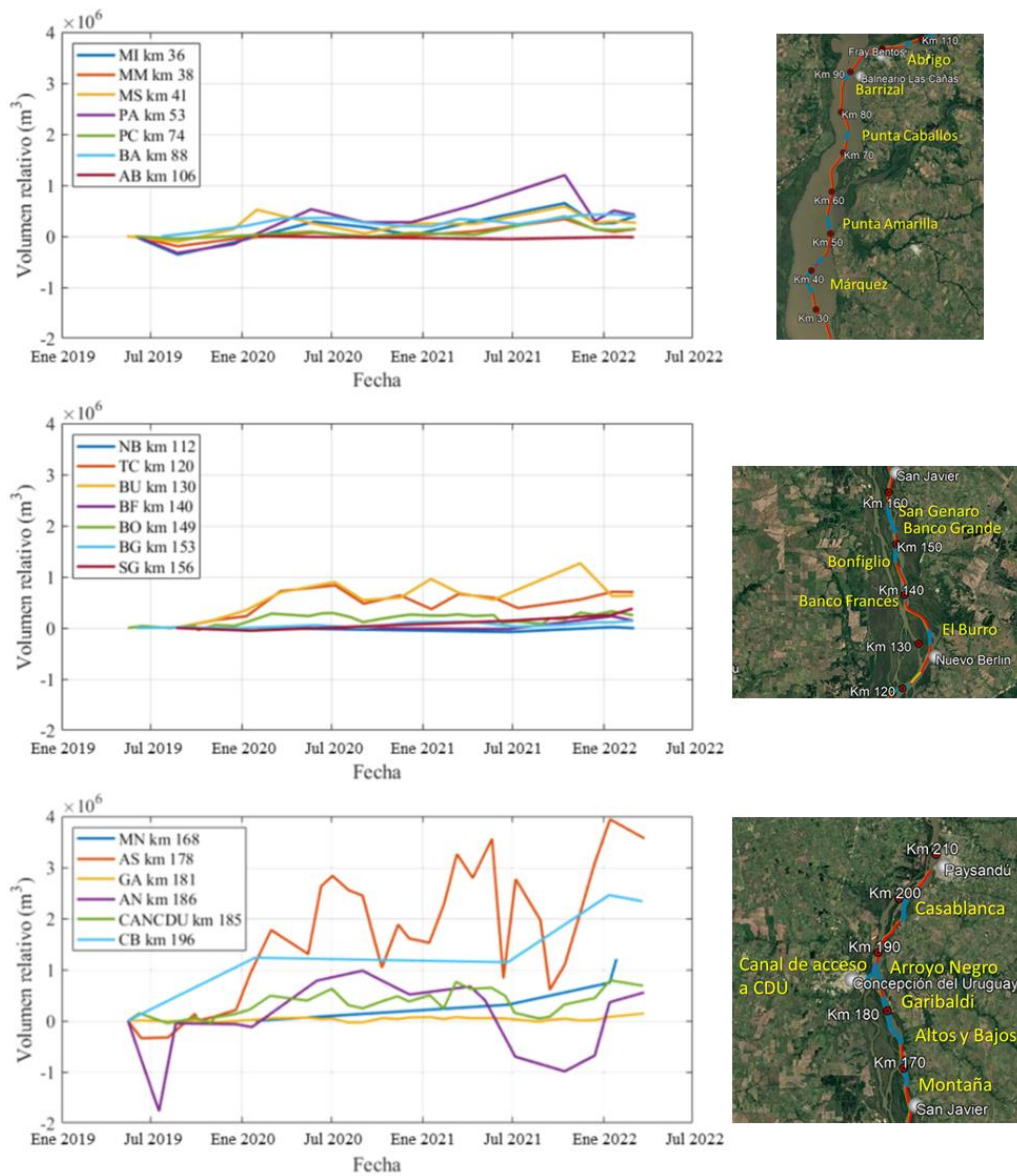


Figura 8.2.- Volumen relativo relevado en cada batimetría.

Allí se observa un proceso de sedimentación en la mayoría de los pasos, en la mayoría del tiempo. Así también puede verse una diferencia de magnitud en el volumen acumulado en los pasos ubicados hacia aguas arriba.

A los efectos de evaluar la sedimentación en cada paso en contraste con los dragados efectuados, se presenta la Figura 8.3, en la que se exhibe la sedimentación total, es decir el volumen final en la figura anterior. Esta gráfica contiene implícitamente los volúmenes dragados en cada paso, que se explicitan en la Figura 8.4.

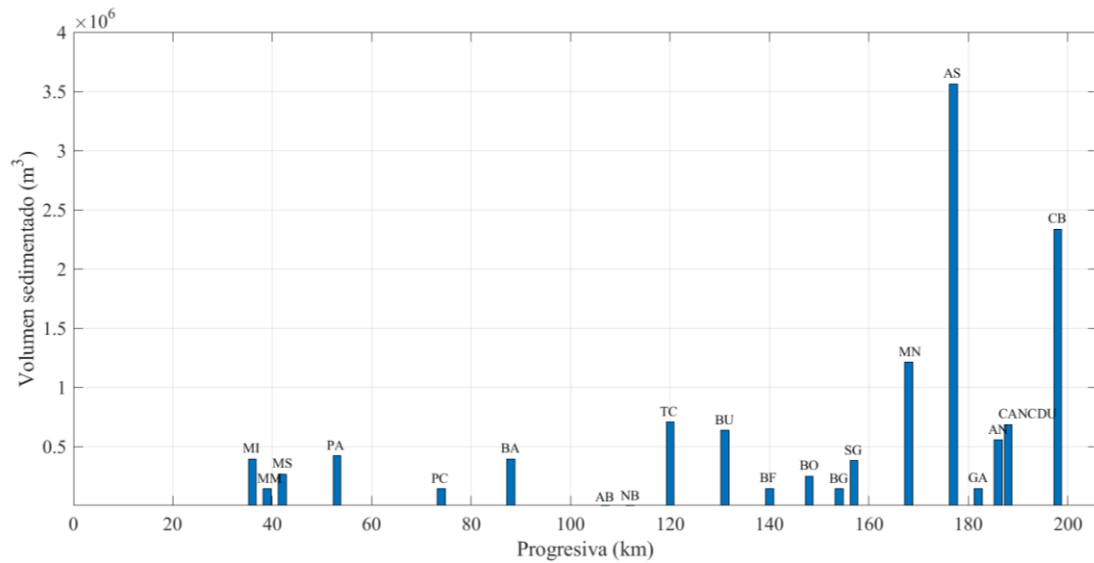


Figura 8.3.- Volumen sedimentado en cada paso de navegación (Tabla 5.8).

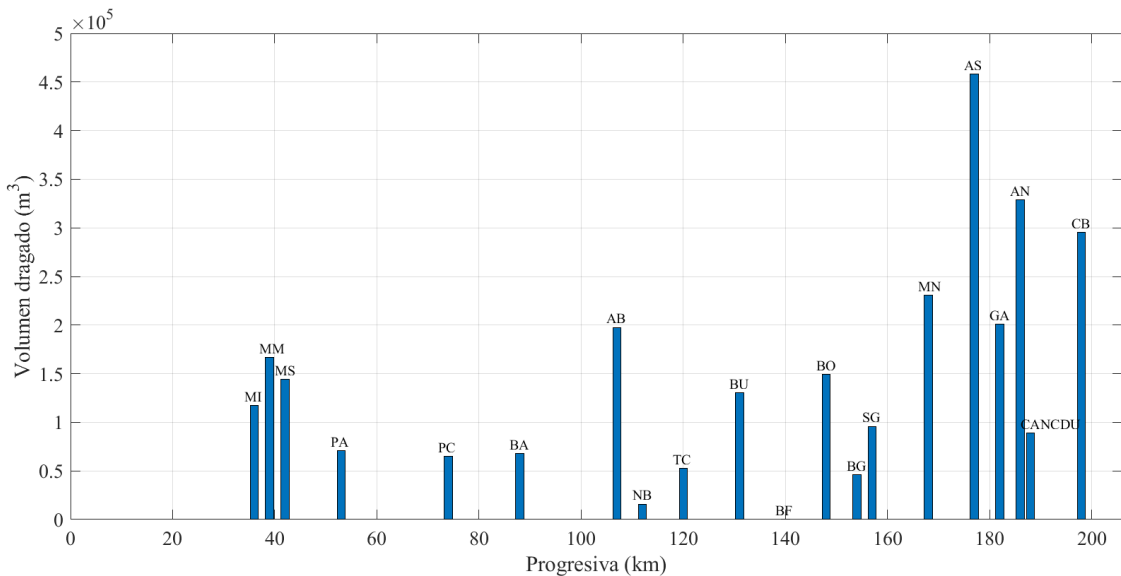


Figura 8.4.- Volumen dragado en cada paso de navegación (Tabla 3.8).

Suponiendo que el dragado en cada paso no indujo ni evitó ningún tipo de proceso morfodinámico, la sedimentación total será entonces la suma del volumen efectivamente

sedimentado (Figura 8.3) y el volumen dragado (Figura 8.4). Ver Figura 8.5, atendiendo al orden de magnitud de las figuras precedentes.

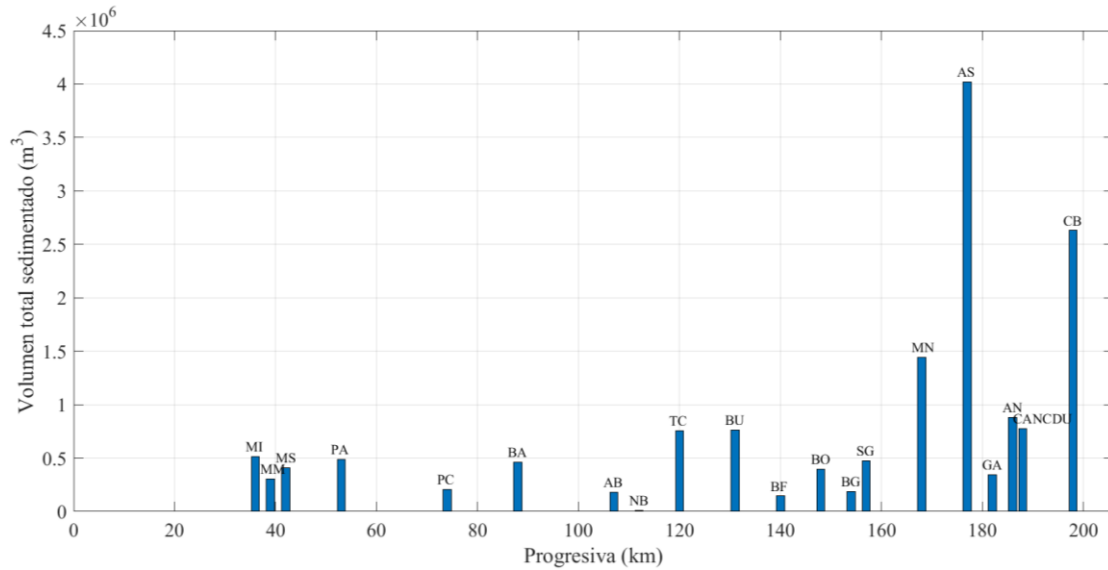


Figura 8.5.- Volumen total sedimentado y dragado.

Este valor se asume como una cota superior de la sedimentación en cada paso. Si a este volumen se lo divide por el tiempo transcurrido entre la primera y la última batimetría (tomando como unidad de tiempo el año), se obtiene la tasa de sedimentación media (T_{sed}), que se presenta en la Figura 8.6. Si a este último valor se lo multiplica por $(1-P)$ y se lo divide por la longitud del paso, se obtiene el valor del cambio promedio de transporte de sedimento de fondo, Δq_{sf} . Ver Figura 8.7.

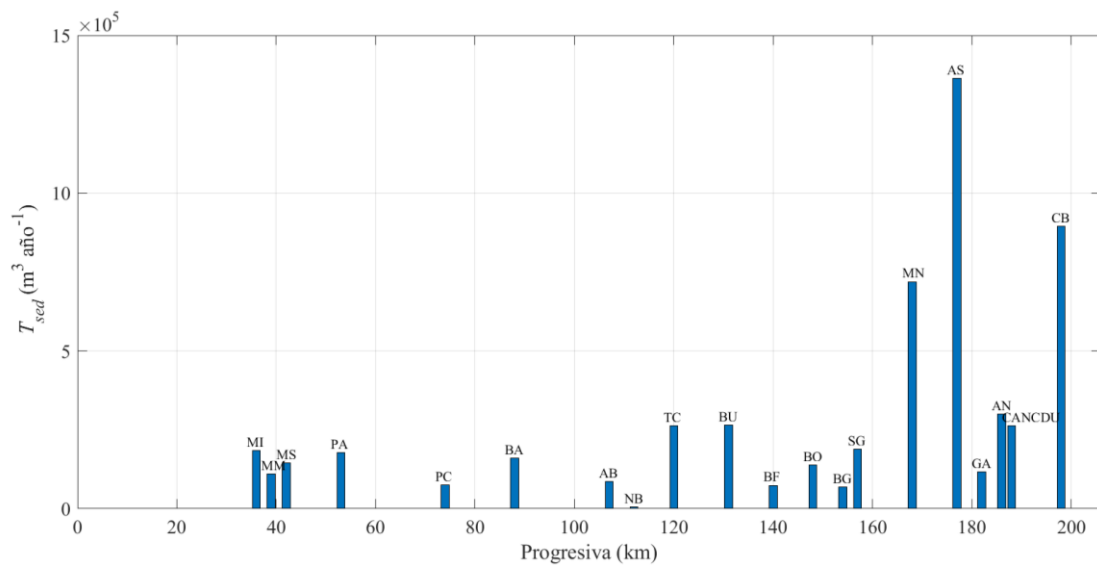


Figura 8.6.- Tasa de sedimentación media en cada paso.

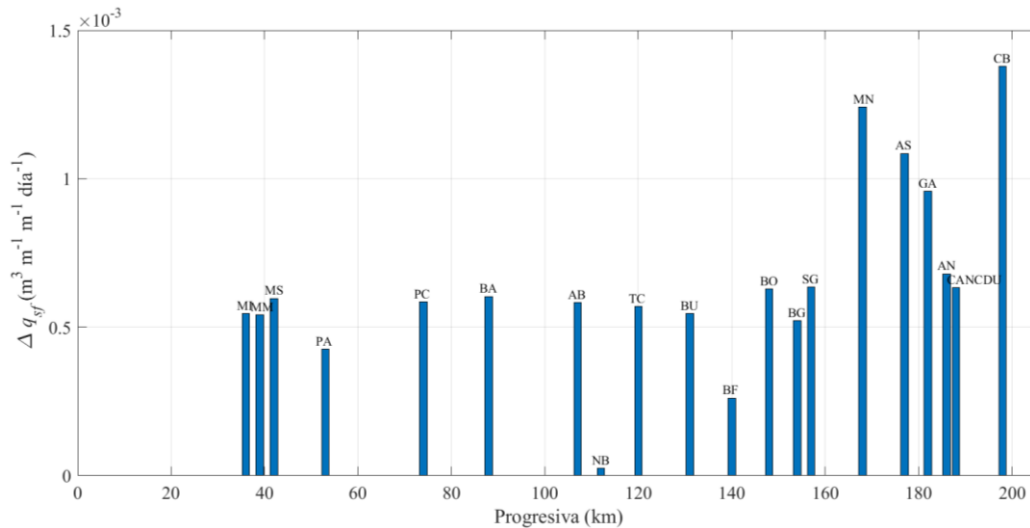


Figura 8.7.- Cambio en el caudal sólido de fondo en la longitud del paso.

En esta última figura se observa una constancia aproximada, salvando los casos de Ñandubaysal (km 112) y Banco Francés (km 140), del diferencial de caudal sólido hasta el kilómetro 160. Este diferencial corresponde al caudal sólido por metro de ancho de río y por metro de longitud del paso de navegación. Es decir, si se aplican las ecuaciones predictivas de transporte al tramo inicial y al final de un paso de navegación, el caudal sólido (q_{sf}) debería ser similar al obtenido de multiplicar el valor de la Figura 8.7 por la distancia entre ambas secciones.

Se entiende, entre otros factores, que una de las causas principales de la sedimentación en el tramo entre los kilómetros 160 y 200 son las dos grandes bifurcaciones de caudal que ocurren en los kilómetros 170 y 185 (cabecera de las islas Cambacúa y Dolores/Montaña). Este sector coincide con el inicio del Delta holoceno definido por Iriondo & Kröhling (2008).

8.2.2. Estimación a partir del movimiento de formas de fondo

8.2.2.1. Introducción y marco teórico

Se denomina c_d a la celeridad con la que se desplaza una duna bidimensional por el lecho de un río (Figura 8.8). Luego, la tasa de transporte de la carga de fondo, q_{sf} ($\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$), puede ser estimada por el volumen de material transportado hacia aguas abajo, por unidad de ancho de la sección transversal, por unidad de tiempo (Δt) (Simons, et al., 1965). Si bien en la bibliografía normalmente este término hace referencia a q_{sf} , Rubin & Hunter (1982) propusieron distinguir esta cantidad denominándola tasa de transporte de forma de fondo. Esta última denominación se utiliza en el presente para distinguir el origen del dato de transporte sin realizar una discusión de las diferencias conceptuales.

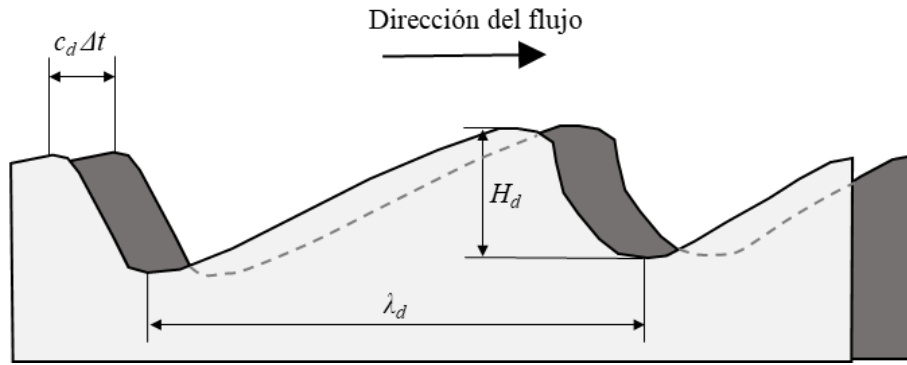


Figura 8.8.- Modelo conceptual de la tasa de transporte de forma de fondo.

En términos matemáticos, Ten Brinke et al. (1999) presentaron la derivación de la ecuación [8.3], que resulta similar a la aproximación de la duna con una geometría triangular realizada por diversos autores (García, 2008).

$$q_{sf} = f_d(1 - P)c_d H_d \cong \frac{1}{2}(1 - P)c_d H_d \quad [8.3]$$

En esta ecuación, f_d es el factor de forma de las dunas presentes y P es la porosidad de la forma de fondo, como ya fuera introducida. En el río Paraná, esta ecuación ha sido aplicada desde 1969 (Serra, 2007), y se tiene como consenso que f_d adopta un valor cercano a 0.66 para dunas naturales (Latosinski, 2014). Serra (2007) también señala la importancia de los procesos vinculados a las dunas de orden menor, que transportan en ciertos escenarios mayor carga que las dunas mayores.

8.2.2.2. Procesamiento

Para esta tarea se utilizaron los datos relevados con ADCP y ecosonda monohaz (SBES), descritos en el apartado 5.3.2.2, correspondientes a la sección San Francisco, frente a la localidad de Colón, Entre Ríos (Figura 8.9). La aplicación de esta metodología en otras secciones del área de estudio resultó difícil de implementar debido a las condiciones hidrométricas registradas durante los relevamientos. La principal limitación fue la velocidad de desplazamiento de las dunas, que impidió detectar cambios significativos en lapsos de pocas horas. Por este motivo, cualquier evaluación debía contemplar un intervalo de varios días bajo condiciones de aguas medias o bajas, aunque este plazo podría reducirse en situaciones de aguas altas. Esta exigencia implicaba una complejidad logística que excedía las posibilidades operativas en el marco de las actividades de la CARU. La cercanía del paso San Francisco a la sede del organismo permitió, en cambio, disponer de embarcaciones y equipos sin requerir una planificación previa extensa,

limitando las condiciones necesarias al seguimiento fenomenológico del desplazamiento de dunas.

La metodología aplicada en este apartado se realizó en tres etapas: la primera de ellas fue calcular el valor de f_d . Esto se logró a través del cálculo del área de cada una de las dunas (A_d) por el método de los trapecios. Luego, conociendo la altura (H_d) y longitud (λ_d), puede utilizarse la ecuación [8.4] para despejar el valor de f_d .

$$A_d = f_d \lambda_d H_d \quad [8.4]$$

Posteriormente, el conjunto de valores de f_d se procesó para obtener sus valores estadísticos representativos.

La segunda etapa fue la determinación de los desplazamientos de las dunas. Para esto se pueden utilizar diferentes técnicas a saber: medir el desplazamiento de puntos significativos de manera manual sobre el Perfil Longitudinal Original (PLO), y luego tomar un promedio de estos desplazamientos (López Weibel, 2018), medir el desplazamiento de crestas o valles en su conjunto (Perfil Longitudinal Simplificado, PLS), o tomar la correlación cruzada entre ambos perfiles longitudinales (PLS y/o PLO), cuyo pico indicará el desplazamiento promedio más significativo (Duffy & Hughes-Clarke, 2005; Zorndt, et al., 2011). En este caso se aplicó la última alternativa al perfil longitudinal original (PLO). Éste fue interpolado cada 0.50 m para contar con datos en las mismas progresivas, y luego corregido. La corrección consistió en la sustracción del valor medio del perfil, para eliminar posibles errores inducidos en la reducción de los sondeos al nivel de agua observado en el puerto local.

La tercera y última parte de este proceso consistió en la transformación, vía la ecuación [8.3], de los desplazamientos calculados en tasa de transporte de forma de fondo. Estos datos se integraron en la sección transversal San Francisco (Figura 8.9) utilizando el método de la semisección (Edwards & Glysson, 1999), con las progresivas indicadas en la Tabla 8.1. De esta manera se obtuvo el aforo sólido en la sección (G_{sf}).

Los relevamientos procesados se muestran en la Tabla 8.2, que complementa la Tabla 5.5. En la Figura 8.10 se exhiben los resultados del procesamiento granulométrico de las muestras obtenidas. Asimismo, en la Figura 8.11 a Figura 8.14 se muestran los relevamientos realizados sobre las líneas expuestas en la Figura 5.15 (panel B) y la Figura 8.9.

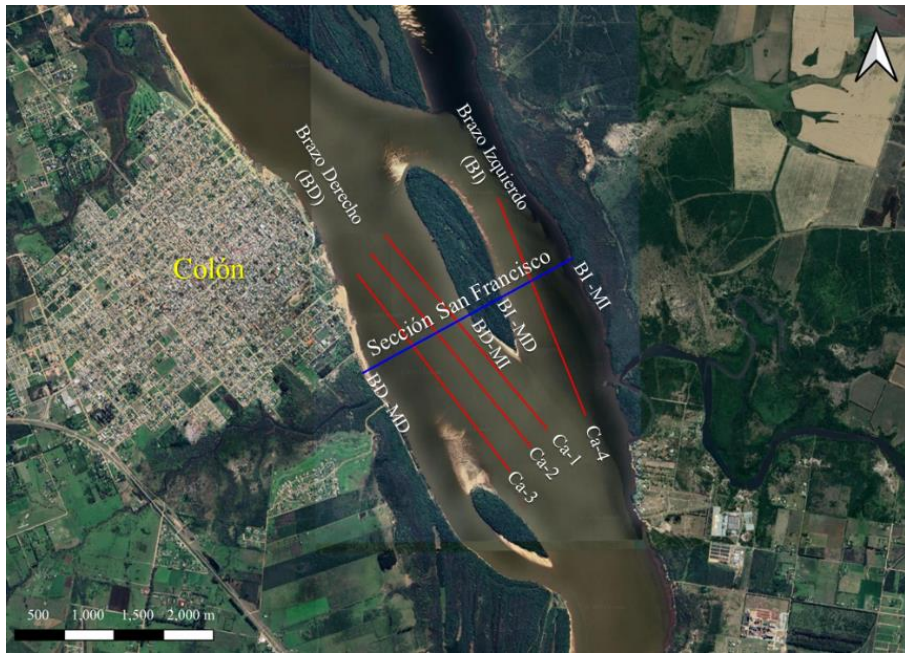


Figura 8.9.- Sección de aforo sólido en paso San Francisco (Colón, Entre Ríos).

Tabla 8.1.- Progresivas de la sección San Francisco.

		Progresiva (m)	
Brazo Derecho	Margen Derecha	BD-MD	0.00
	Línea	Ca-3	571.95
	Línea	Ca-2	845.84
	Línea	Ca-1	1081.68
	Margen Izquierda	BD-MI	1235.01
Brazo Izquierdo	Margen Derecha	BI-MD	1589.14
	Línea	Ca-4	1931.67
	Margen Izquierda	BI-MI	2400.74

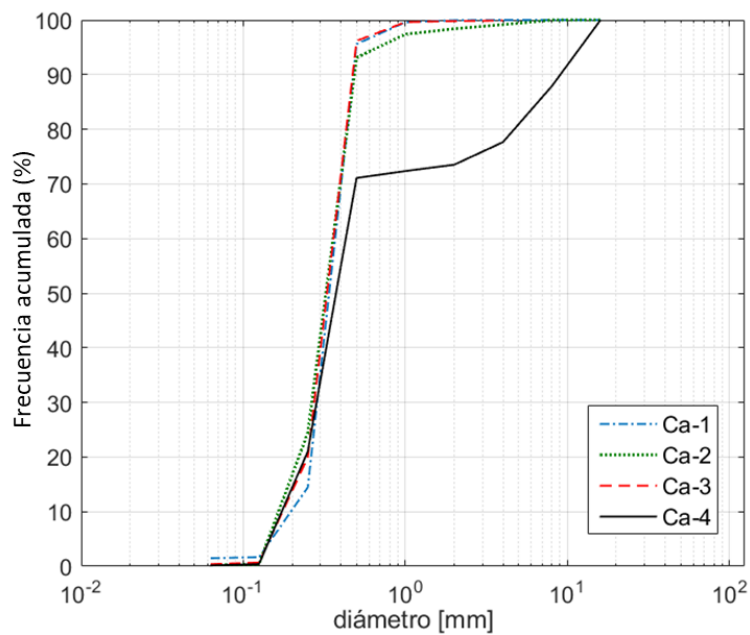


Figura 8.10.- Distribución granulométrica de muestras de sedimento de fondo. Río Uruguay en relevamiento *R1* - zona Colón. Modificado de López Weibel (2023).

Tabla 8.2.- Relevamientos realizados para la determinación del desplazamiento de dunas.

Fecha	Línea	Relevamiento	Equipo de medición	Altura al cero de la escala Colón (m)
29/06/2017 13:17	Ca-1			3,67
29/06/2017 13:48	Ca-2			3,53
29/06/2017 14:14	Ca-3			3,49
29/06/2017 14:45	Ca-4			3,51
29/06/2017 19:04	Ca-3			3,71
30/06/2017 13:47	Ca-3			3,59
30/06/2017 14:17	Ca-2	<i>RI</i>	ADCP	3,58
30/06/2017 14:39	Ca-1			3,57
30/06/2017 15:02	Ca-4			3,56
06/07/2017 14:56	Ca-2			1,85
06/07/2017 15:21	Ca-1			1,87
06/07/2017 15:44	Ca-4			1,89
06/07/2017 16:17	Ca-3			1,91
22/08/2017 10:52	Ca-3			3,81
22/08/2017 11:07	Ca-2			3,81
22/08/2017 11:22	Ca-1			3,80
22/08/2017 11:37	Ca-4			3,80
31/08/2017 09:26	Ca-3	<i>RA</i>	SBES	3,28
31/08/2017 09:36	Ca-2			3,28
31/08/2017 09:50	Ca-1			3,28
31/08/2017 10:09	Ca-4			3,29
01/11/2017 09:17	Ca-2			4,75
08/11/2017 09:14	Ca-2	<i>RB</i>	SBES	3,77
10/11/2017 11:01	Ca-2			3,87
18/12/2018 16:01	Ca-2			2,84
18/12/2018 16:21	Ca-3			2,87
21/12/2018 17:21	Ca-2	<i>R4</i>	ADCP	3,59
21/12/2018 17:49	Ca-3			3,63
25/01/2019 14:18	Ca-3			8,55
25/01/2019 14:50	Ca-2			9,07
25/01/2019 15:19	Ca-1			9,23
25/01/2019 15:40	Ca-4			9,23
28/01/2019 13:40	Ca-3			7,48
28/01/2019 14:06	Ca-2			7,43
28/01/2019 14:29	Ca-1	<i>R5</i>	ADCP	7,75
28/01/2019 14:54	Ca-4			8,09
30/01/2019 13:08	Ca-3			6,76
30/01/2019 13:33	Ca-2			6,56
30/01/2019 13:55	Ca-1			6,40
30/01/2019 14:18	Ca-4			6,43

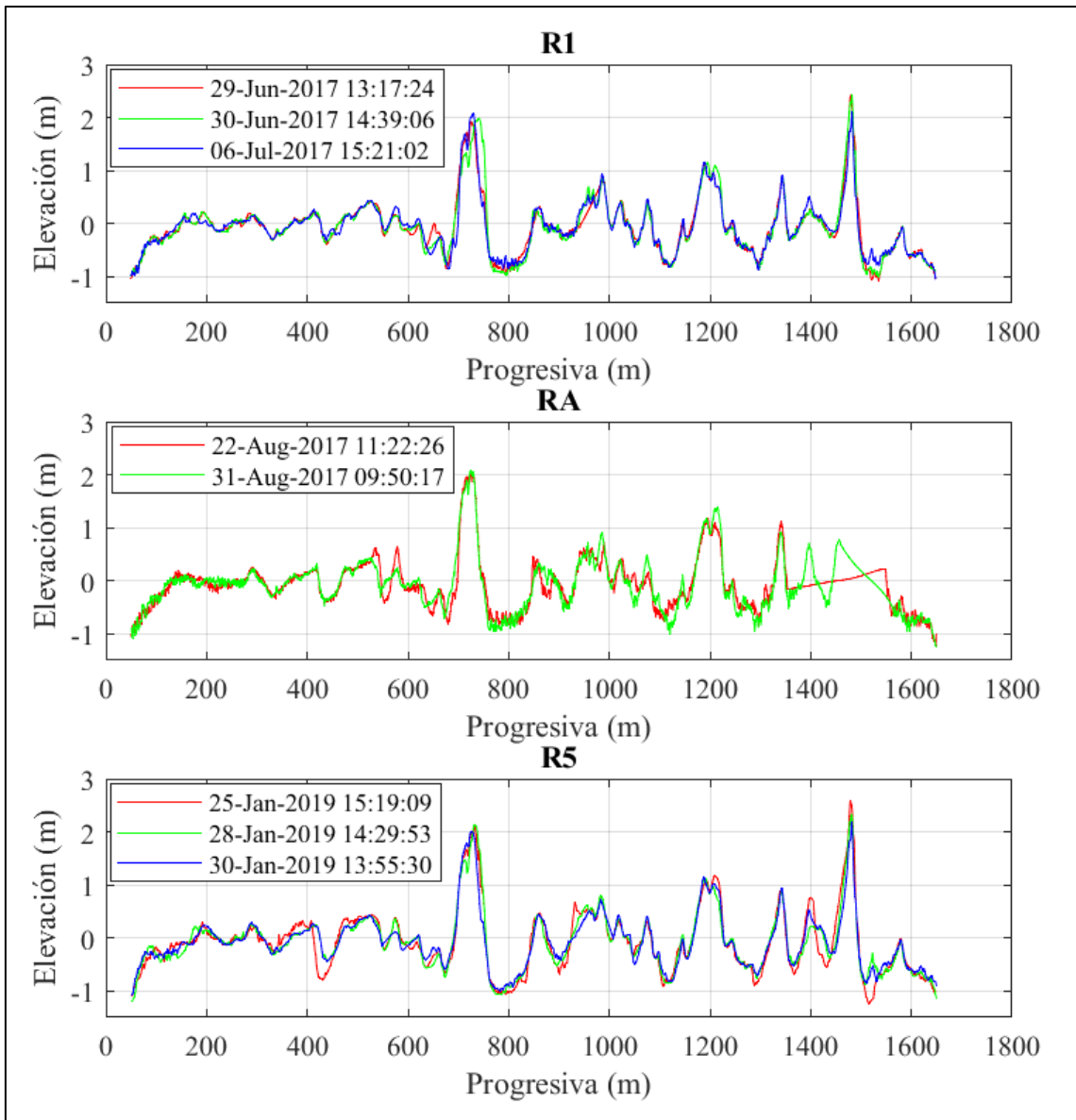


Figura 8.11.- Relevamientos realizados, Línea Ca-1.

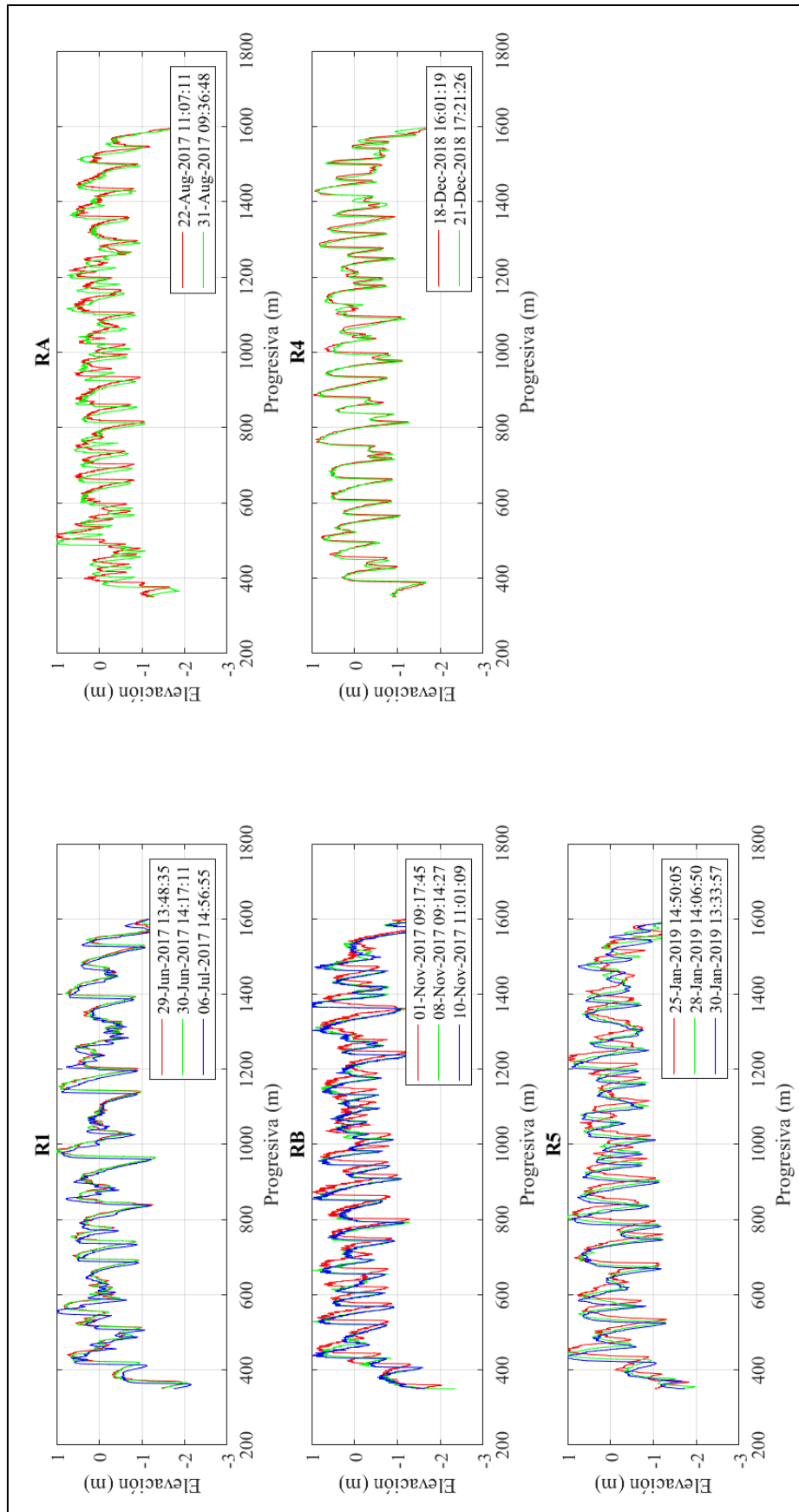


Figura 8.12.- Relevamientos realizados, Línea Ca-2.

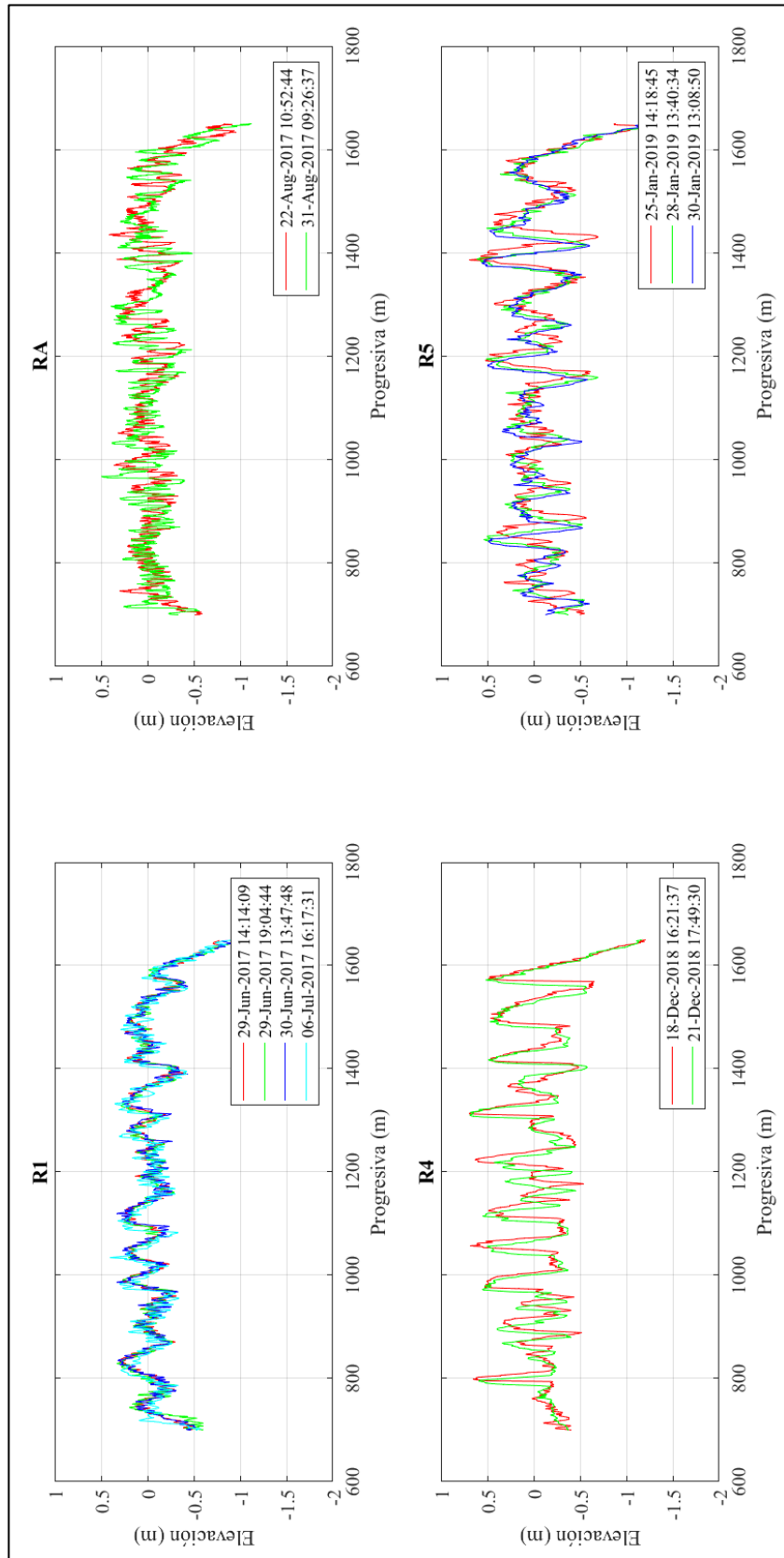


Figura 8.13.- Relevamientos realizados, Línea Ca-3.

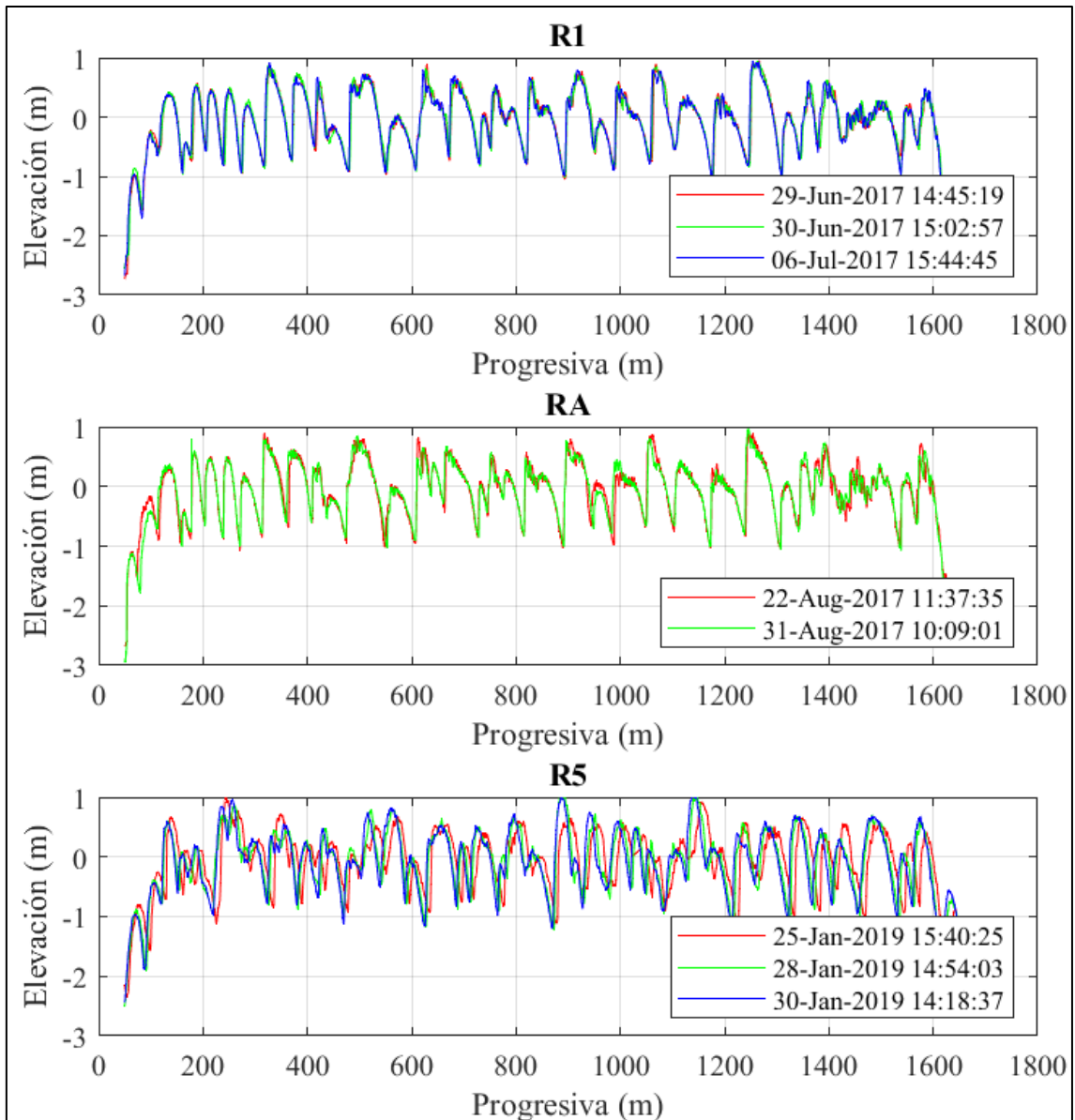


Figura 8.14.- Relevamientos realizados, Línea Ca-4.

8.2.2.3. Resultados y discusión

Como antecedente, del procesamiento de las 15.912 dunas mencionadas en el capítulo anterior, se obtuvo un resultado para el factor de forma de la duna (f_d) medio de 0.58.

Para la aplicación particular a los relevamientos descritos, se aplicó el algoritmo *BTT* para cada una de las batimetrías señaladas en la Tabla 8.2. En la Tabla 8.3 se muestran los resultados promedio obtenidos para las alturas de dunas (H_d), longitudes (λ_d) y factor de forma en cada perfil longitudinal medido.

Tabla 8.3.- Resultados de la aplicación del algoritmo BTT a los perfiles relevados y resultados de f_d .

Fecha	Línea	Relevamiento	Nro. de dunas medidas	H_d (m)		λ_d (m)		f_d	
				Medido	Promedio	Medido	Promedio	Medido	Promedio
29-Jun-2017 13:17:24		R1	14	1.29		92.57		0.50	
30-Jun-2017 14:39:06		R1	13	1.39		100.85		0.51	
06-Jul-2017 15:21:02		R1	13	1.18		93.88		0.49	
22-Ago-2017 11:22:26	Ca-1*	RA	13	1.21	1.31	87.04	94.18	0.52	0.52
31-Ago-2017 09:50:17		RA	14	1.26		92.50		0.53	
25-Ene-2019 15:19:09		R5	14	1.51		90.39		0.53	
28-Ene-2019 14:29:53		R5	12	1.30		99.08		0.53	
30-Ene-2019 13:55:30		R5	13	1.36		97.12		0.51	
29-Jun-2017 13:48:35		R1	23	1.38		52.33		0.64	
30-Jun-2017 14:17:11	R1	23	1.36	52.54	0.64				
06-Jul-2017 14:56:55	R1	23	1.46	52.48	0.65				
18-Dic-2018 16:01:19	R4	25	1.47	48.24	0.63				
21-Dic-2018 17:21:26	R4	25	1.48	46.22	0.66				
22-Ago-2017 11:07:11	RA	28	1.24	42.65	0.64				
31-Ago-2017 09:36:48	Ca-2	RA	29	1.24	1.44	37.33	48.87	0.65	0.63
01-Nov-2017 09:17:45		RB	27	1.47		45.85		0.61	
08-Nov-2017 09:14:27		RB	24	1.46		45.28		0.62	
10-Nov-2017 11:01:09		RB	28	1.46		44.02		0.63	
25-Ene-2019 14:50:05		R5	19	1.58		60.42		0.61	
28-Ene-2019 14:06:50		R5	21	1.54		54.50		0.62	
30-Ene-2019 13:33:57		R5	21	1.53		53.45		0.63	
29-Jun-2017 14:14:09		R1	20	0.42		46.70		0.56	
29-Jun-2017 19:04:44	R1	21	0.40	36.83	0.55				
30-Jun-2017 13:47:48	R1	24	0.43	36.28	0.56				
06-Jul-2017 16:17:31	R1	31	0.41	27.30	0.55				
18-Dic-2018 16:21:37	R4	17	0.78	49.88	0.54				
22-Ago-2017 10:52:44	Ca-3	RA	46	0.30	0.56	13.23	38.70	0.58	0.56
31-Ago-2017 09:26:37		RA	54	0.37		11.23		0.55	
21-Dic-2018 17:49:30		R4	15	0.78		48.40		0.54	
25-Ene-2019 14:18:45		R5	19	0.72		45.58		0.57	
28-Ene-2019 13:40:34		R5	15	0.77		52.97		0.59	
30-Ene-2019 13:08:50		R5	15	0.78		57.33		0.60	
29-Jun-2017 14:45:19	R1	32	1.19	44.09	0.62				
30-Jun-2017 15:02:57	R1	28	1.30	50.41	0.62				
06-Jul-2017 15:44:45	R1	30	1.22	46.97	0.62				
22-Ago-2017 11:37:35	Ca-4	RA	33	1.30	1.31	44.08	46.67	0.65	0.63
31-Ago-2017 10:09:01		RA	32	1.31		46.44		0.62	
25-Ene-2019 15:40:25		R5	31	1.43		51.02		0.65	
28-Ene-2019 14:54:03		R5	34	1.32		43.16		0.64	
30-Ene-2019 14:18:37		R5	31	1.43		47.21		0.65	

* En la línea Ca-1 existen dunas en el sector ubicado más aguas arriba del perfil longitudinal. Hacia aguas abajo, más cerca de la isla San Francisco, aparecen afloramientos de formaciones duras. Ver Figuras 8.9 y 8.11.

La medición de los desplazamientos requirió del agrupamiento, tomando de a dos perfiles longitudinales, de los relevamientos presentados en la Figura 8.11 a Figura 8.14. Para esto se tomaron, por línea y por relevamiento, desde la primera batimetría hasta la última, comparadas entre sí. Esto resultó en 36 mediciones de desplazamiento, en diferentes líneas, que pueden observarse en la Tabla 8.4.

Como ya se mencionó, el desplazamiento se calculó como la correlación cruzada de ambos relevamientos comparados. Se entiende que los valores negativos observados en dicha correlación corresponden a errores en la metodología, y son del orden de la discretización de los perfiles interpolados. Un análisis gráfico de los perfiles originales relevados con SBES permite identificar movimiento hacia aguas abajo de dunas por debajo del límite de detección establecido. Esto permite inferir, que para el caso de la

línea Ca-1, los desplazamientos, y consecuentemente los caudales sólidos, serán una cota inferior del fenómeno.

Tabla 8.4.- Relevamientos con medición del desplazamiento de dunas.

Relevamiento	Línea	Fecha			Tiempo transcurrido (días)	Desplazamiento (m)
		Inicial	Final	Promedio		
R1	Ca-1	29/06/2017 13:17	30/06/2017 14:39	30/06/2017	1.06	No detectado
R1	Ca-1	29/06/2017 13:17	06/07/2017 15:21	03/07/2017	7.09	0.00
R1	Ca-1	30/06/2017 14:39	06/07/2017 15:21	03/07/2017	6.03	1.50
R1	Ca-2	29/06/2017 13:48	30/06/2017 14:17	30/06/2017	1.02	1.00
R1	Ca-2	29/06/2017 13:48	06/07/2017 14:56	03/07/2017	7.05	7.00
R1	Ca-2	30/06/2017 14:17	06/07/2017 14:56	03/07/2017	6.03	6.50
R1	Ca-3	29/06/2017 14:14	29/06/2017 19:04	29/06/2017	0.20	0.00
R1	Ca-3	29/06/2017 14:14	30/06/2017 13:47	30/06/2017	0.98	1.00
R1	Ca-3	29/06/2017 14:14	06/07/2017 16:17	03/07/2017	7.09	6.00
R1	Ca-3	29/06/2017 19:04	30/06/2017 13:47	30/06/2017	0.78	0.00
R1	Ca-3	29/06/2017 19:04	06/07/2017 16:17	03/07/2017	6.88	5.50
R1	Ca-3	30/06/2017 13:47	06/07/2017 16:17	03/07/2017	6.10	6.00
R1	Ca-4	29/06/2017 14:45	30/06/2017 15:02	30/06/2017	1.01	0.00
R1	Ca-4	29/06/2017 14:45	06/07/2017 15:44	03/07/2017	7.04	1.00
R1	Ca-4	30/06/2017 15:02	06/07/2017 15:44	03/07/2017	6.03	1.00
RA	Ca-1	22/08/2017 11:22	31/08/2017 09:50	26/08/2017	8.94	1.50
RA	Ca-2	22/08/2017 11:07	31/08/2017 09:36	26/08/2017	8.94	8.00
RA	Ca-3	22/08/2017 10:52	31/08/2017 09:26	26/08/2017	8.94	16.50
RA	Ca-4	22/08/2017 11:37	31/08/2017 10:09	26/08/2017	8.94	0.00
RB	Ca-2	01/11/2017 09:17	08/11/2017 09:14	04/11/2017	7.00	10.50
RB	Ca-2	01/11/2017 09:17	10/11/2017 11:01	05/11/2017	9.07	11.50
RB	Ca-2	08/11/2017 09:14	10/11/2017 11:01	09/11/2017	2.07	1.00
R4	Ca-2	18/12/2018 16:01	21/12/2018 17:21	20/12/2018	3.06	2.50
R4	Ca-3	18/12/2018 16:21	21/12/2018 17:49	20/12/2018	3.06	6.50
R5	Ca-1	25/01/2019 15:19	28/01/2019 14:29	27/01/2019	2.97	No detectado
R5	Ca-1	25/01/2019 15:19	30/01/2019 13:55	28/01/2019	4.94	0.00
R5	Ca-1	28/01/2019 14:29	30/01/2019 13:55	29/01/2019	1.98	0.50
R5	Ca-2	25/01/2019 14:50	28/01/2019 14:06	27/01/2019	2.97	10.50
R5	Ca-2	25/01/2019 14:50	30/01/2019 13:33	28/01/2019	4.95	16.50
R5	Ca-2	28/01/2019 14:06	30/01/2019 13:33	29/01/2019	1.98	5.50
R5	Ca-3	25/01/2019 14:18	28/01/2019 13:40	27/01/2019	2.97	11.00
R5	Ca-3	25/01/2019 14:18	30/01/2019 13:08	28/01/2019	4.95	14.00
R5	Ca-3	28/01/2019 13:40	30/01/2019 13:08	29/01/2019	1.98	2.50
R5	Ca-4	25/01/2019 15:40	28/01/2019 14:54	27/01/2019	2.97	7.50
R5	Ca-4	25/01/2019 15:40	30/01/2019 14:18	28/01/2019	4.94	10.50
R5	Ca-4	28/01/2019 14:54	30/01/2019 14:18	29/01/2019	1.98	2.50

De la unión de la Tabla 8.3 y la Tabla 8.4 se obtuvieron los valores para el cálculo de la tasa de transporte de forma de fondo, q_{sf} , con la ecuación [8.3], que se presentan en la Tabla 8.5.

Con esta información, se pudieron construir 11 aforos sólidos. 7 de éstos contemplaron las 4 líneas relevadas, 3 se calcularon solamente con la línea Ca-2, y 1 con las líneas Ca-2 y Ca-3. Los resultados se exhiben en la Tabla 8.6, que se resume en la Tabla 8.7.

Para los aforos sin datos en el brazo izquierdo se realizó un ajuste lineal, por mínimos cuadrados, de la relación del cociente caudal sólido en el brazo izquierdo (Q_{sf-BI}) con el caudal sólido en el brazo derecho (Q_{sf-BD}), en función del caudal sólido en el brazo derecho. Este ajuste permitió completar la Tabla 8.7 con los datos indicados.

Tabla 8.5.- Cálculo de la tasa de transporte de forma de fondo.

Relevamiento	Línea	Fecha		H_d (m)			f_d	c_d , celeridad del tren de dunas (m/d)	q_{sf} (m ³ /día/m)
		Inicial	Final	Inicial	Final	Promedio			
R1	Ca-1	29/06/2017 13:17	30/06/2017 14:39	1.03	1.11	1.07	0.52	No calculado	0.000
R1	Ca-1	29/06/2017 13:17	06/07/2017 15:21	1.03	1.07	1.05	0.52	0.00	0.000
R1	Ca-1	30/06/2017 14:39	06/07/2017 15:21	1.11	1.07	1.09	0.52	0.25	0.084
R1	Ca-2	29/06/2017 13:48	30/06/2017 14:17	1.08	1.06	1.07	0.63	0.98	0.396
R1	Ca-2	29/06/2017 13:48	06/07/2017 14:56	1.08	1.17	1.12	0.63	0.99	0.421
R1	Ca-2	30/06/2017 14:17	06/07/2017 14:56	1.06	1.17	1.11	0.63	1.08	0.454
R1	Ca-3	29/06/2017 14:14	29/06/2017 19:04	0.33	0.32	0.32	0.56	0.00	0.000
R1	Ca-3	29/06/2017 14:14	30/06/2017 13:47	0.33	0.33	0.33	0.56	1.02	0.113
R1	Ca-3	29/06/2017 14:14	06/07/2017 16:17	0.33	0.34	0.33	0.56	0.85	0.095
R1	Ca-3	29/06/2017 19:04	30/06/2017 13:47	0.32	0.33	0.33	0.56	0.00	0.000
R1	Ca-3	29/06/2017 19:04	06/07/2017 16:17	0.32	0.34	0.33	0.56	0.80	0.089
R1	Ca-3	30/06/2017 13:47	06/07/2017 16:17	0.33	0.34	0.34	0.56	0.98	0.111
R1	Ca-4	29/06/2017 14:45	30/06/2017 15:02	1.06	1.17	1.12	0.63	0.00	0.000
R1	Ca-4	29/06/2017 14:45	06/07/2017 15:44	1.06	1.09	1.08	0.63	0.14	0.058
R1	Ca-4	30/06/2017 15:02	06/07/2017 15:44	1.17	1.09	1.13	0.63	0.17	0.071
RA	Ca-1	22/08/2017 11:22	31/08/2017 09:50	1.04	1.11	1.07	0.52	0.17	0.056
RA	Ca-2	22/08/2017 11:07	31/08/2017 09:36	1.01	1.06	1.03	0.63	0.90	0.349
RA	Ca-3	22/08/2017 10:52	31/08/2017 09:26	0.34	0.40	0.37	0.56	1.85	0.227
RA	Ca-4	22/08/2017 11:37	31/08/2017 10:09	1.11	1.10	1.11	0.63	0.00	0.000
RB	Ca-2	01/11/2017 09:17	08/11/2017 09:14	1.23	1.27	1.25	0.63	1.50	0.711
RB	Ca-2	01/11/2017 09:17	10/11/2017 11:01	1.23	1.23	1.23	0.63	1.27	0.590
RB	Ca-2	08/11/2017 09:14	10/11/2017 11:01	1.27	1.23	1.25	0.63	0.48	0.228
R4	Ca-2	18/12/2018 16:01	21/12/2018 17:21	1.27	1.25	1.26	0.63	0.82	0.390
R4	Ca-3	18/12/2018 16:21	21/12/2018 17:49	0.70	0.74	0.72	0.56	2.12	0.516
R5	Ca-1	25/01/2019 15:19	28/01/2019 14:29	1.22	1.18	1.20	0.52	No calculado	0.000
R5	Ca-1	25/01/2019 15:19	30/01/2019 13:55	1.22	1.13	1.18	0.52	0.00	0.000
R5	Ca-1	28/01/2019 14:29	30/01/2019 13:55	1.18	1.13	1.16	0.52	0.25	0.091
R5	Ca-2	25/01/2019 14:50	28/01/2019 14:06	1.37	1.34	1.36	0.63	3.54	1.814
R5	Ca-2	25/01/2019 14:50	30/01/2019 13:33	1.37	1.37	1.37	0.63	3.34	1.728
R5	Ca-2	28/01/2019 14:06	30/01/2019 13:33	1.34	1.37	1.35	0.63	2.78	1.425
R5	Ca-3	25/01/2019 14:18	28/01/2019 13:40	0.55	0.63	0.59	0.56	3.70	0.733
R5	Ca-3	25/01/2019 14:18	30/01/2019 13:08	0.55	0.66	0.61	0.56	2.83	0.576
R5	Ca-3	28/01/2019 13:40	30/01/2019 13:08	0.63	0.66	0.64	0.56	1.26	0.274
R5	Ca-4	25/01/2019 15:40	28/01/2019 14:54	1.15	1.14	1.14	0.63	2.53	1.093
R5	Ca-4	25/01/2019 15:40	30/01/2019 14:18	1.15	1.20	1.18	0.63	2.12	0.944
R5	Ca-4	28/01/2019 14:54	30/01/2019 14:18	1.14	1.20	1.17	0.63	1.27	0.560

Tabla 8.6.- Aforos sólidos.

Relevamiento	Aforo sólido (AS)			Brazo	Línea	Progresiva (m)	Ancho (m)	q_{sf} (m ³ /día/m)	Q_{sf} (m ³ /día)	
	Nombre	Inicio	Fin							
RI	AS1	29/06/2017	30/06/2017	Derecho	BD-MD	0.00	285.98	0.00	0.00	75.62
					Ca-3	571.95	422.92	0.13	53.77	
					Ca-2	845.84	254.87	0.33	83.38	
					Ca-1	1081.68	194.59	-0.32	-61.53	
					BD-MI	1235.01	76.67	0.00	0.00	
					BI-MD	1589.14	171.27	0.00	0.00	
RI	AS2	29/06/2017	06/07/2017	Derecho	BD-MD	0.00	285.98	0.00	0.00	135.59
					Ca-3	571.95	422.92	0.09	40.10	
					Ca-2	845.84	254.87	0.37	95.48	
					Ca-1	1081.68	194.59	0.00	0.00	
					BD-MI	1235.01	76.67	0.00	0.00	
					BI-MD	1589.14	171.27	0.00	0.00	
RI	AS3	30/06/2017	06/07/2017	Derecho	BD-MD	0.00	285.98	0.00	0.00	186.20
					Ca-3	571.95	422.92	0.12	52.86	
					Ca-2	845.84	254.87	0.45	115.63	
					Ca-1	1081.68	194.59	0.09	17.71	
					BD-MI	1235.01	76.67	0.00	0.00	
					BI-MD	1589.14	171.27	0.00	0.00	
RI	AS3	30/06/2017	06/07/2017	Izquierdo	Ca-4	1931.67	405.80	0.07	28.86	28.86
					BI-MI	2400.74	234.54	0.00	0.00	
					BD-MD	0.00	285.98	0.00	0.00	
					Ca-3	571.95	422.92	0.12	52.86	
					Ca-2	845.84	254.87	0.45	115.63	
					Ca-1	1081.68	194.59	0.09	17.71	
RA	AS4	22/08/2017	31/08/2017	Derecho	BD-MD	0.00	285.98	0.00	0.00	195.83
					Ca-3	571.95	422.92	0.23	95.95	
					Ca-2	845.84	254.87	0.35	88.96	
					Ca-1	1081.68	194.59	0.06	10.91	
					BD-MI	1235.01	76.67	0.00	0.00	
					BI-MD	1589.14	171.27	0.00	0.00	
RA	AS4	22/08/2017	31/08/2017	Izquierdo	Ca-4	1931.67	405.80	0.00	0.00	0.00
					BI-MI	2400.74	234.54	0.00	0.00	
					BD-MD	0.00	422.92	0.00	0.00	
					Ca-3	571.95	422.92	0.23	95.95	
					Ca-2	845.84	254.87	0.35	88.96	
					Ca-1	1081.68	194.59	0.06	10.91	
RB	AS5	01/11/2017	08/11/2017	Derecho	BD-MD	0.00	422.92	0.00	0.00	438.92
					Ca-3	571.95	422.92	0.71	438.92	
					Ca-2	845.84	617.51	0.71	438.92	
					Ca-1	1081.68	194.59	0.00	0.00	
					BD-MI	1235.01	194.59	0.00	0.00	
					BI-MD	1589.14	171.27	0.00	0.00	
RB	AS6	01/11/2017	10/11/2017	Izquierdo	Ca-4	1931.67	405.80	0.00	0.00	364.14
					BI-MI	2400.74	234.54	0.00	0.00	
					BD-MD	0.00	422.92	0.00	0.00	
					Ca-3	571.95	422.92	0.59	364.14	
					Ca-2	845.84	617.51	0.59	364.14	
					Ca-1	1081.68	194.59	0.00	0.00	
RB	AS7	08/11/2017	10/11/2017	Derecho	BD-MD	0.00	422.92	0.00	0.00	140.81
					Ca-3	571.95	422.92	0.23	140.81	
					Ca-2	845.84	617.51	0.23	140.81	
					Ca-1	1081.68	194.59	0.00	0.00	
					BD-MI	1235.01	194.59	0.00	0.00	
					BI-MD	1589.14	171.27	0.00	0.00	
RB	AS7	08/11/2017	10/11/2017	Izquierdo	Ca-4	1931.67	405.80	0.00	0.00	140.81
					BI-MI	2400.74	234.54	0.00	0.00	
					BD-MD	0.00	285.98	0.00	0.00	
					Ca-3	571.95	422.92	0.52	218.35	
					Ca-2	845.84	331.53	0.39	129.22	
					Ca-1	1081.68	194.59	0.00	0.00	
R4	AS8	18/12/2018	21/12/2018	Derecho	BD-MI	1235.01	194.59	0.00	0.00	347.57
					BI-MD	1589.14	171.27	0.00	0.00	
					Ca-4	1931.67	405.80	0.00	0.00	
					BD-MD	0.00	285.98	0.00	0.00	
					Ca-3	571.95	422.92	0.52	218.35	
					Ca-2	845.84	331.53	0.39	129.22	
R5	AS9	25/01/2019	28/01/2019	Izquierdo	BI-MI	2400.74	234.54	0.00	0.00	443.39
					BI-MD	1589.14	171.27	0.00	0.00	
					Ca-4	1931.67	405.80	1.09	443.39	
					BD-MD	0.00	285.98	0.00	0.00	
					Ca-3	571.95	422.92	0.58	243.42	
					Ca-2	845.84	254.87	1.73	440.42	
R5	AS10	25/01/2019	30/01/2019	Derecho	Ca-1	1081.68	194.59	0.00	0.00	683.84
					BD-MI	1235.01	76.67	0.00	0.00	
					BI-MD	1589.14	171.27	0.00	0.00	
					Ca-4	1931.67	405.80	0.84	340.61	
					BI-MI	2400.74	234.54	0.00	0.00	
					BD-MD	0.00	285.98	0.00	0.00	
R5	AS11	28/01/2019	30/01/2019	Izquierdo	Ca-4	1931.67	405.80	0.56	227.38	227.38
					BI-MI	2400.74	234.54	0.00	0.00	
					BD-MD	0.00	285.98	0.00	0.00	
					Ca-3	571.95	422.92	0.31	130.18	
					Ca-2	845.84	254.87	1.42	363.09	
					Ca-1	1081.68	194.59	0.10	19.16	
R5	AS11	28/01/2019	30/01/2019	Derecho	BD-MI	1235.01	76.67	0.00	0.00	512.43
					BI-MD	1589.14	171.27	0.00	0.00	
					Ca-4	1931.67	405.80	0.56	227.38	
					BI-MI	2400.74	234.54	0.00	0.00	
					BD-MD	0.00	285.98	0.00	0.00	
					Ca-3	571.95	422.92	0.31	130.18	

Tabla 8.7.- Resumen de aforos sólidos.

Aforo sólido	Q_{sf} (m ³ /día)		Total	Q_{sf-BI} / Q_{sf-BD}
	Brazo derecho (BD)	Brazo izquierdo (BI)		
AS1	75.62	0.00	75.62	0%
AS2	135.59	20.91	156.49	15%
AS3	186.20	28.86	215.06	16%
AS4	195.83	0.00	195.83	0%
AS5	438.92	109.18*	548.10*	25%*
AS6	364.14	74.24*	438.38*	20%*
AS7	140.81	9.84*	150.66*	7%*
AS8	347.57	67.41*	414.98*	19%*
AS9	657.11	443.39	1100.50	67%
AS10	683.84	340.61	1024.45	50%
AS11	512.43	227.38	739.80	44%

* Datos estimados a partir de la relación Q_{sf-BD} vs. BI/BD .

8.2.3. Estimación a partir de mediciones estacionarias con ADCP

8.2.3.1. Introducción y marco teórico

En esta metodología se destacan las contribuciones tempranas de Colin Rennie y sus colaboradores (2002; 2004; 2004), Villard et al. (2005), Kostaschuk et al. (2005), Gaeuman & Jacobson (2006; 2007), Jamieson et al. (2011), y las recientes de Latosinski et al. (2017) y Conevski (2020). Dichas publicaciones basan sus resultados en la medición de la velocidad aparente de desplazamiento del fondo, v_a , a partir de la diferencia entre la velocidad del bote registrada con sistemas de posicionamiento global (DGPS), v_{DGPS} , y la velocidad del bote registrada por un sistema que poseen los ADCPs llamado “*BottomTrack*” (BT), v_{BT} . En este sentido, se subraya la publicación de Latosinski et al. (2017) en la cual se realizan comparaciones entre el transporte obtenido con los parámetros medidos por el ADCP, el calculado con el método de seguimiento de dunas, y los resultados de fórmulas de estimación del transporte de fondo como la de van Rijn (1993). Si bien la falta de datos no permitió ser concluyente, Latosinski (2014) observó una dependencia directa entre la velocidad aparente (v_a) y la frecuencia acústica (f_a) del ADCP, así como con la longitud del pulso acústico (L).

Para el cálculo del caudal sólido a partir de esta metodología, Haschenburger & Church (1998) propusieron un modelo cinemático interpretado a partir del balance de masa Exner.

$$q_{sf} = c_{sf} v_{sf} d_{sf} \quad [8.5]$$

La ecuación [8.5] representa el transporte de fondo como una capa movilizadora, muy cercana al lecho (d_{sf}), con una concentración de sedimentos (c_{sf}) similar a la dada por el

volumen de una porción de lecho menos su porosidad $(1-P)$, y que se desplaza a una velocidad promedio v_{sf} .

Si se puede asumir que $v_a = v_{sf}$, puede estimarse el transporte de fondo a partir de las mediciones realizadas con el ADCP (Latosinski, 2014). Para ello será necesario el cálculo de d_{sf} y c_{sf} . El primer valor puede ser estimado por los criterios dados en Latosinski et al. (2017) $d_a=2d_{50}$ o $d_a=3d_{90}$, o calculado con la expresión propuesta por van Rijn (1993) a tal fin. El segundo valor, c_{sf} , puede calcularse con expresiones teóricas o estimarse como $(1-P)$, siendo P la porosidad del lecho.

Las expresiones teóricas para estos cálculos requieren información hidráulica y sedimentológica como la velocidad media del flujo unidimensional (U), el tirante medio del flujo (H), y los diámetros representativos (d_{50} y d_{90}).

Con esta información se puede calcular la velocidad de corte del perfil de velocidades (u_*), utilizando la expresión logarítmica (Ecuación [8.6]) en García (2008). Allí, u es la velocidad media en la profundidad z y u_{max} es la máxima de dichas velocidades.

$$\frac{(u_{max} - u)}{u_*} = -\frac{1}{0,41} \ln\left(\frac{z}{H}\right) \quad [8.6]$$

Asimismo, la metodología requiere el cálculo de la velocidad de corte correspondiente al grano de arena (u'_* , esta velocidad de corte desconoce el efecto de las formas de fondo en el perfil de velocidades). Para este cálculo se utilizó la expresión de van Rijn para tal fin:

$$u'_* = U \left[5,75 \log\left(\frac{12 H}{3 d_{90}}\right) \right]^{-1} \quad [8.7]$$

Este último autor utiliza dos parámetros adimensionales que permiten modelar la mayor parte de los procesos geomorfológicos: el parámetro adimensional de partícula (D_*) y la tensión adimensional sobre el fondo (T).

$$D_* = d_{50} \left[\left(\frac{S - 1}{\nu^2} \right) \right]^{1/3} \quad [8.8]$$

$$T = \left(\frac{u'_*}{u_{*c}} \right)^2 - 1 \quad [8.9]$$

En la ecuación [8.9], u_{*c} es la velocidad crítica de iniciación del movimiento, que se obtiene de la Curva de Shields, parametrizada por van Rijn, como función del diámetro adimensional (D_*).

Van Rijn propuso, además, la ecuación [8.10] como función del parámetro de movilidad (T) y el diámetro adimensional (D_*), para la estimación de la altura de saltación (δ_{sf}). Luego, este valor puede asumirse como equivalente al espesor de la capa activa (d_a).

$$d_{sf} \approx \delta_{sf} = d_{50} 0,3 D_*^{0,7} T^{0,5} \quad [8.10]$$

Asimismo, van Rijn (1993) propuso que la concentración de partículas que se desplazan en la capa activa (c_{sf}) se calcule según indica la ecuación [8.11].

$$c_{sf} = 0,117 \frac{T}{D_*} \quad [8.11]$$

Por último, se presenta la expresión [8.12] utilizada por el autor para el cálculo de la velocidad de movimiento de los sedimentos en la capa activa (v_{sf}).

$$\frac{v_{sf}}{u_{*c}} = 9 + 2,6 (D_*) - 8 \left(\frac{1}{T + 1} \right)^{1/2} \quad [8.12]$$

Teniendo en cuenta los datos medidos (Título 5.3.2.3) y las herramientas teóricas disponibles, se realizó aquí una implementación de esta teoría. A continuación, se describe el procedimiento aplicado a los datos de Colón y su contraste con los cálculos realizados en el punto anterior.

8.2.3.2. *Procesamiento*

En la Figura 8.15 se exhiben las mediciones de la Tabla 5.6. Para cada medición se graficaron las posiciones de la embarcación anclada, registradas con GPS y Bottom Track del ADCP. También se exhiben en la gráfica la frecuencia acústica de medición del ADCP (f_a) y la longitud del pulso (L).

Para el cómputo de la velocidad aparente (v_{BT}) se tomó, para cada tiempo, la distancia entre ambos registros (GPS y Bottom Track). Luego, se ajustó la ecuación de una línea recta ($y=mx$) para la función tiempo-distancia. La pendiente de dicha recta (m) resulta ser el valor medio de la velocidad v_{BT} para la medición.

Con el valor calculado de la velocidad aparente del fondo, y asumiendo que $v_{sf}=v_{BT}$, entonces se pudo calcular q_{sf} bajo distintas hipótesis, siguiendo la metodología de

Latosinski et al. (2017), con las expresiones propuestas por van Rijn (1993). Para ello se siguió el siguiente procedimiento:

- se calculó la velocidad media del flujo unidimensional (U) integrando el perfil medio de velocidades obtenido en la vertical durante la medición.
- Se determinó el tirante medio del flujo (H) como la profundidad registrada en el punto de medición.
- Se establecieron los diámetros representativos (d_{50} y d_{90}), correspondientes a la línea Ca-2 en el Paso San Francisco (ver Figura 8.9 y Figura 8.10). Para las mediciones en Concepción del Uruguay, Nuevo Berlín y Puente Libertador General San Martín se utilizaron los diámetros correspondientes al kilómetro donde se realizó la medición, tal y como fueron informados en el título 7.3.1.
- Se calculó la velocidad de corte (u_*) mediante de la ecuación de la ley de defecto de la velocidad.
- Se determinó la velocidad de corte correspondiente al grano (u'_*) con la ecuación [8.7].
- Se calcularon los parámetros de van Rin T y D_* , así como también la tensión de corte y velocidades críticas (τ_{*c} y u_{*c}) correspondientes al tamaño de grano.
- Se calcularon la velocidad de transporte de fondo (v_{sf}), altura de saltación (δ_{sf}) y concentración máxima volumétrica (c_{sf}) correspondientes a las expresiones de van Rijn (1993).
- Se calculó el transporte de sedimentos de fondo, q_{sf} , para las diferentes combinaciones entre los parámetros medidos, estimados, y los propuestos por Latosinski et al. (2017).
- Estos cálculos fueron luego comparados con la información obtenida en el título anterior, respecto del transporte de fondo estimado en Colón para el desplazamiento de dunas.

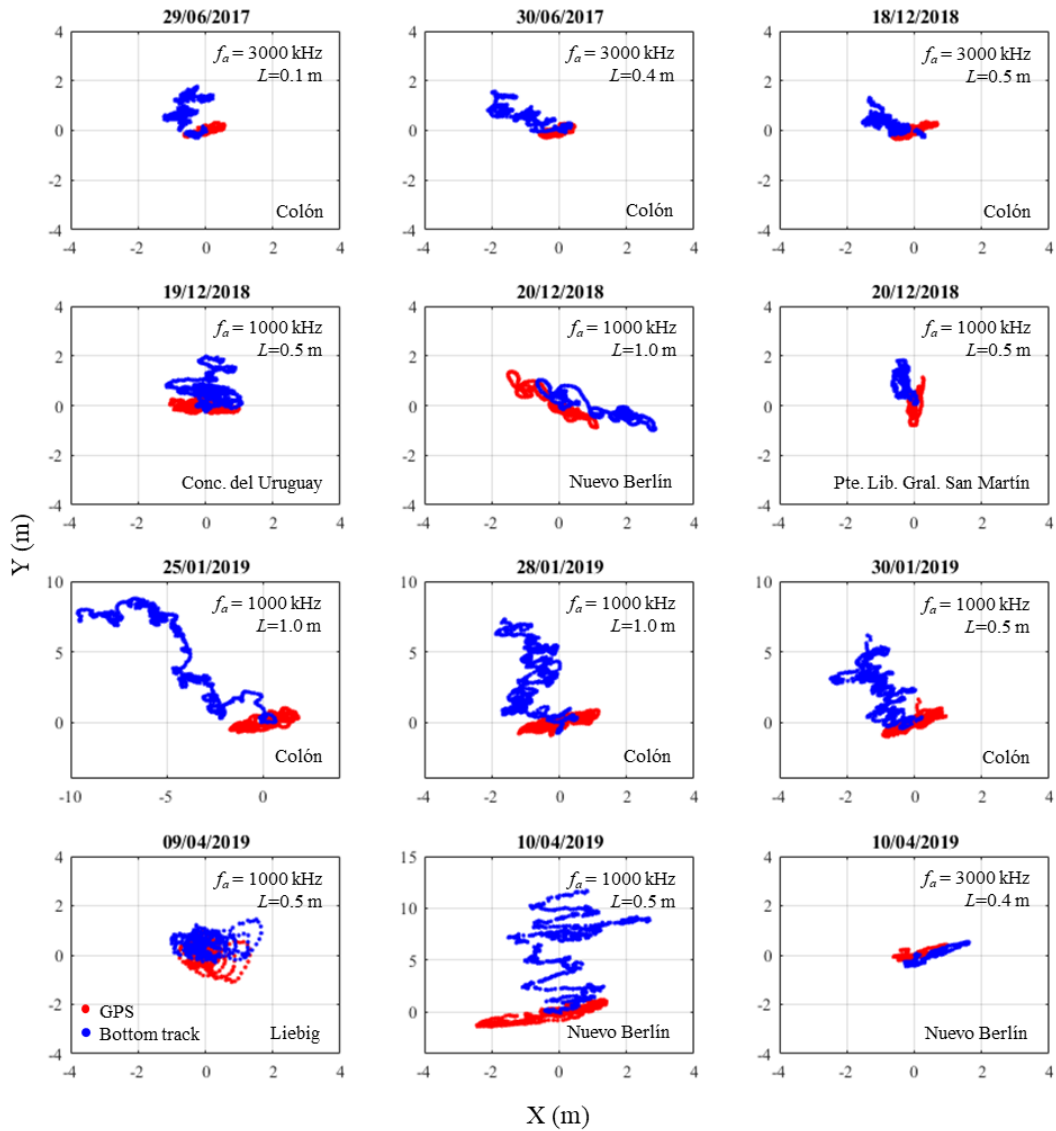


Figura 8.15.- Posiciones relevadas con ADCP.

8.2.3.3. Resultados y discusión

En la Tabla 8.8 se muestran los resultados correspondientes al cálculo de q_{sf} con la metodología descrita. La lectura directa de la tabla permite inferir que los resultados mayores de transporte de sedimentos de fondo se logran con las expresiones semiempíricas de van Rijn (1993), columna (a). Las metodologías alternativas producen resultados menores, particularmente la alternativa donde el cálculo de la velocidad de desplazamiento de partículas (v_{sf}) es sustituida por la velocidad aparente medida con ADCP (v_{BT}), en la columna (b). En este caso se observa un orden de magnitud de diferencia en los resultados obtenidos, que es consistente con lo reportado por Latosinski et al. (2017) para mediciones en el río Paraná.

Tabla 8.8.- Cálculo del caudal sólido por el fondo.

Fecha	Altura al cero de Colón (m)	Ubicación	Tiempo de medición	v _{gr} (m/s)	U (m/s)	h (m)	d ₅₀ (mm)	d ₉₀ (mm)	D _s	T	δ _{sf} (m)	C _s (m ³ /m ³)	v _{sf} (m/s)	Caudal sólido, q _{sf} (m ³ /dia/m)				
														(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
														$c_{sf} \cdot \delta_{sf} \cdot v_{sf}$	$c_{sf} \cdot \delta_{sf} \cdot v_{gr}$	$(1-P) \cdot \delta_{sf} \cdot v_{gr}$	$(1-P) \cdot 2d_{50} \cdot v_{gr}$	$(1-P) \cdot 3d_{90} \cdot v_{gr}$
29/6/2017	4,01	Colón	10:11	0.0029	0.71	4.75	0.33	0.46	8.292	2.740	0.0007	3.9E-02	0.195	0.469	0.007	0.109	0.100	0.210
30/6/2017	3,64	Colón	10:19	0.0040	0.77	5.13	0.33	0.46	8.292	3.296	0.0008	4.7E-02	0.217	0.688	0.013	0.164	0.137	0.286
18/12/2018	3,36	Colón	10:15	0.0021	0.54	5.75	0.33	0.46	8.292	1.093	0.0005	1.5E-02	0.118	0.071	0.001	0.050	0.073	0.153
19/12/2018		Concepción del Uruguay	15:12	0.0018	0.73	7.60	0.19	0.33	4.774	3.166	0.0003	7.8E-02	0.176	0.357	0.004	0.028	0.035	0.091
20/12/2018		Nuevo Berlín	15:11	0.0027	0.69	16.81	0.16	0.26	4.021	2.297	0.0002	6.7E-02	0.137	0.152	0.003	0.027	0.044	0.108
20/12/2018		Pte. Lib. Gral. San Martín	08:04	0.0032	0.49	7.21	0.10	0.23	2.513	1.261	0.0001	5.9E-02	0.080	0.026	0.001	0.011	0.033	0.115
25/1/2019	9,30	Colón	15:23	0.0152	1.17	16.39	0.33	0.46	8.292	7.118	0.0012	1.0E-01	0.340	3.423	0.153	0.915	0.520	1.088
28/1/2019	8,22	Colón	15:23	0.0068	1.05	11.60	0.33	0.46	8.292	5.928	0.0011	8.4E-02	0.305	2.338	0.052	0.373	0.233	0.486
30/1/2019	7,30	Colón	15:41	0.0061	0.97	10.52	0.33	0.46	8.292	4.948	0.0010	7.0E-02	0.275	1.605	0.036	0.306	0.208	0.436
9/4/2019		Liebig	07:25	0.0023	0.76	5.46	0.33	0.46	8.292	3.143	0.0008	4.4E-02	0.211	0.624	0.007	0.092	0.079	0.165
10/4/2019		Nuevo Berlín	15:18	0.0130	0.37	9.56	0.16	0.26	4.021	0.041	0.0000	1.2E-03	0.034	0.000	0.000	0.017	0.216	0.527
10/4/2019		Nuevo Berlín	08:11	0.0018	0.34	5.17	0.16	0.26	4.021	0.000	0.0000	2.1E-06	0.031	0.000	0.000	0.000	0.029	0.072

Para el caso específico de las mediciones en Colón, en la Figura 8.16 se contrastan los valores de q_{sf} contra las alturas hidrométrica medidas en dicha ciudad. Allí se verifica la relación directa entre la altura y el caudal de fondo para cualquiera de las fórmulas de cálculo propuestas.

Asimismo, se vincularon los datos de altura en el río con los datos de la Tabla 8.5. Allí, considerando todas las mediciones de q_{sf} en la línea Ca-2, se construyó una curva de altura- q_{sf} . Ésta, complementariamente a la Figura 8.16, resulta en la Figura 8.17.

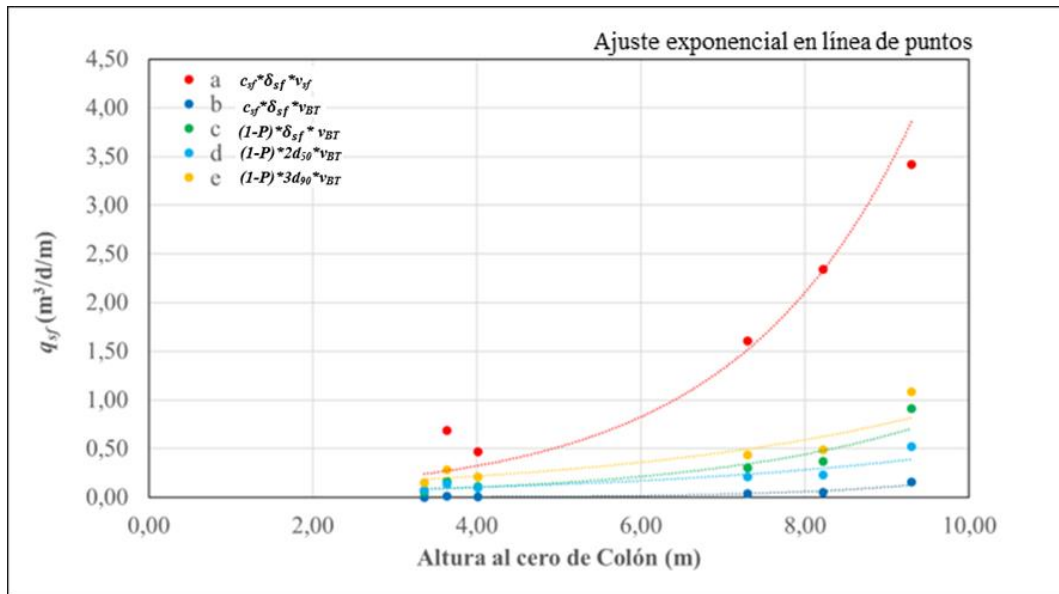


Figura 8.16.- Caudal sólido por el fondo en la sección de Colón, en función de la altura. Datos de Tabla 8.8.

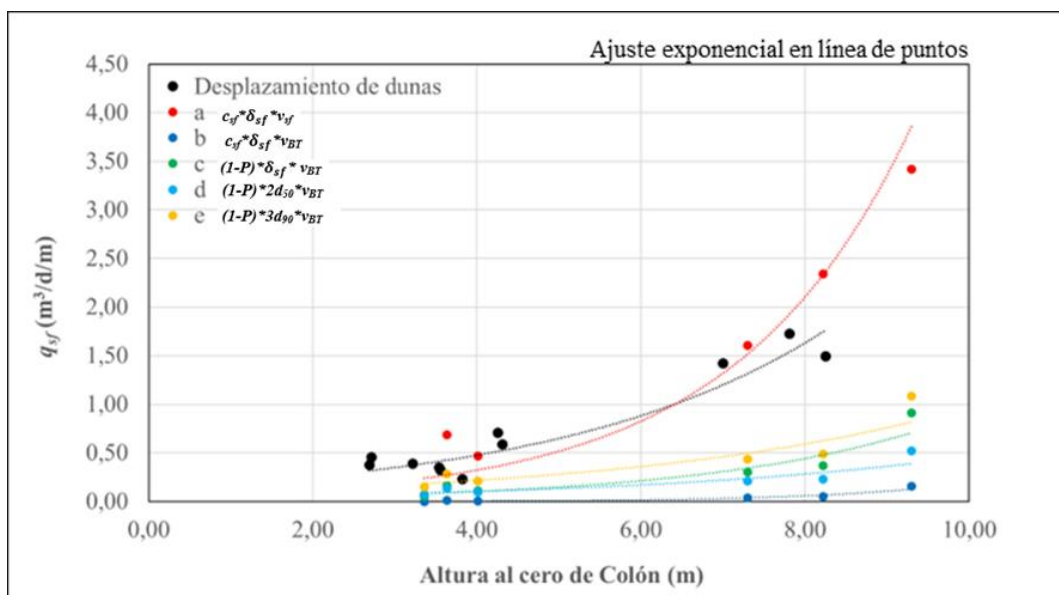


Figura 8.17.- Caudal sólido por el fondo en la sección de Colón, en función de la altura, con datos de medición por desplazamiento de dunas. Datos de Tabla 8.8 y Tabla 8.5.

De esta última figura se observa una mayor correspondencia de los valores estimados con los resultados de la ecuación semiempírica de van Rijn con los valores medidos por la metodología del desplazamiento de dunas. Esta situación también es consistente con lo descrito por Latosinski et al. (2017) en el río Paraná. También es evidente, de la misma figura, que los resultados más ajustados a la medición por transporte de dunas, considerando la velocidad aparente del fondo (v_{BT}), es la que contempla la concentración más alta posible ($c_{sf} = (1-P) = 0.6$), y un espesor de la capa activa de $3d_{90}$.

Por otra parte, dada la homogeneidad de la muestra de sedimentos en la línea Ca-2 analizada para Colón (Figura 8.10), no existiría un desvío de la señal acústica hacia diámetros mayores que implicaría una subestimación de la velocidad aparente como consecuencia de la frecuencia acústica utilizada (Latosinski et al., 2017).

En este sentido y considerando la subestimación observada por el método de la velocidad aparente, se entiende que la hipótesis más probable de la subestimación, más allá de los efectos de la frecuencia acústica y la longitud del pulso que se discuten en Latosinski (2014), es la dispersión del haz acústico en el fondo. El volumen de lecho impactado por los pulsos acústicos presenta una dimensión comparable con las dunas más pequeñas presentes, por lo que la velocidad aparente se mediría como un promedio en toda la duna, y no solamente la cresta como sugiere la formulación de la teoría (McLean et al., 1999).

8.2.4. Estimación a partir de fórmulas

8.2.4.1. Introducción y marco teórico

Este procedimiento tiene en su núcleo dos componentes: el primero, un conocimiento de la hidrodinámica del área a estudiar y de la composición del lecho (granulometría y formas de fondo); y el segundo, la disponibilidad de datos para calibrar las fórmulas a los efectos de acotar sus incertidumbres, que en buenas condiciones de aplicabilidad son elevados (Vanoni, 2006).

Hasta este punto, en el presente capítulo se ha expuesto la información disponible sobre transporte de sedimentos de fondo en el área de estudio. En el capítulo anterior se hizo una descripción de la granulometría y formas de fondo observadas en los 350 kilómetros de extensión de la misma.

Por otra parte, se cuenta con datos hidrodinámicos de la serie 2004-2010, obtenidos a partir de una modelación hidrodinámica bidimensional (Junes, 2020),

Esta información disponible permite la utilización de un conjunto de herramientas teóricas, semiempíricas y empíricas, desarrolladas por varios autores para un acercamiento al transporte de sedimentos como variable, en toda la extensión pretendida.

A continuación, se menciona el contenido teórico y procedimiento para la aplicación de estas ecuaciones al área de estudio donde existe información granulométrica del fondo. De esta manera se cumple con el objetivo de conocer la distribución del transporte de fondo en el tramo de estudio del río.

8.2.4.2. Ecuaciones para predecir el transporte de fondo

En una visión unidimensional del transporte de sedimentos por el fondo (q_{sf}) las partículas se mueven por el fondo rodando, deslizándose o saltando a lo largo del lecho fluvial. La mayoría de las ecuaciones para predecir esta cantidad relaciona tres variables adimensionales, y tienen la forma general dada en la ecuación [8.13], según se expone en García (2008).

$$q^* = q^*(\tau_*, R_{ep}, R) \quad [8.13]$$

Aquí, q^* se denomina *Número de transporte de fondo de Einstein*, que fue introducido por Hans Albert Einstein (1950), y está dado por la ecuación:

$$q^* = \frac{q_{sf}}{d\sqrt{gRd}} \quad [8.14]$$

donde d es el diámetro del sedimento representativo, g es la gravedad y $R = (\rho_s - \rho)/\rho$ es la *gravedad específica del sedimento sumergido*.

El número adimensional (τ_*) se denomina *Número de Shields*, *Número de movilidad*, *parámetro de Shields* o *tensión de corte adimensional*. Este grupo se define según la ecuación [8.15].

$$\tau_* = \frac{\tau_b}{\rho g R d} = \frac{u_*^2}{g R d} \quad [8.15]$$

en donde, τ_b es la tensión de corte sobre el fondo y, u_* es la velocidad de corte.

El último número adimensional por definir es R_{ep} , denominado *Número de Reynolds de la partícula*. Esta variable expresa la relación entre los esfuerzos inerciales y viscosos a los que está sujeta la partícula de sedimento. Se expresa según la ecuación [8.16], donde ν es la viscosidad cinemática del fluido.

$$R_{ep} = \frac{\sqrt{gR\bar{d}}}{\nu} \quad [8.16]$$

Por otra parte, la mayoría de las expresiones de transporte de sedimentos por el fondo manifiestan implícita o explícitamente el valor de tensión crítica de iniciación del movimiento (τ_{bc}) con sus variadas acepciones discutidas en la bibliografía. Este valor también suele expresarse como su equivalente en velocidad de corte crítica (u_{*c}) o la tensión de corte adimensional crítica (τ_{*c}). Para su cálculo u obtención se utiliza el diagrama de Shields (1936) - Rouse (1939) (García, 2008) o sus posteriores derivaciones.

A continuación, se presenta una tabla que sintetiza las ecuaciones utilizadas para el cálculo de q_{sf} . Estas ecuaciones fueron seleccionadas por sus diversas formulaciones y condiciones de desarrollo y validación, y se tabularon los mismos para verificar su aplicabilidad a posteriori. Mayor desarrollo de las ecuaciones puede encontrarse en los textos de García (2008) y Basile (2018).

Tabla 8.9.- Ecuaciones disponibles para la predicción del transporte de sedimentos de fondo.

Autor	Ecuación	Validez/Desarrollo	Observaciones
Ashida & Michiue (1972)	$q^* = 17(\tau^* - \tau_c^*)[(\tau^*)^{1/2} - (\tau_c^*)^{1/2}]$	Sedimento uniforme de 0,3 a 7 mm	Valor recomendado de $\tau_c^*=0,05$
Meyer-Peter & Müller (1948)	$q^* = 8(\tau^* - \tau_c^*)^{3/2}$	Sedimento uniforme, arena gruesa y grava.	Valor recomendado de $\tau_c^*=0,047$
Yalin (1963)	$q^* = 0,635 s (\tau^*)^{1/2} \left[1 - \frac{\ln(1 + a_2 s)}{a_2 s} \right]$	Probada con sedimento de 0,8 y 28,6 mm de diámetro	$a_2 = 2,45(R + 1)^{0,4}(\tau_c^*)^{1/2}$, $s = \frac{\tau^* - \tau_c^*}{\tau_c^*}$
Wilson (1966)	$q^* = 12(\tau^* - \tau_c^*)^{3/2}$	Altas tasas de transporte	Ecuación empírica basada en datos de corrientes naturales
Paintal (1971)	$q^* = 6,56 \cdot 10^{18} \tau^{*16}$	Bajas tasas de transporte $0,007 < \tau^* < 0,06$ 1 a 25 mm de diámetro	Representa bien la no linealidad del proceso para bajas tensiones de fondo
Engelund and Fredsøe (1976)	$q^* = 18,74(\tau^* - \tau_c^*)[(\tau^*)^{1/2} - (\tau_c^*)^{1/2}]$	Testeado para arenas medias y gravas finas.	Valor recomendado de $\tau_c^*=0,05$

continuación Tabla 8.9.

Autor	Ecuación	Validez/Desarrollo	Observaciones
Fernández-Luque & van Beek (1976)	$q^* = 5,7 (\tau^* - \tau_c^*)^{3/2}$	Diámetro entre 0,9 y 3,3 mm	τ_c^* varía desde 0,05 a 3,3 para el rango de diámetros
Parker (1979)	$q^* = 11,2 \frac{(\tau^* - 0,03)^{4,5}}{(\tau^*)^3}$	Sedimentos de tamaño de gravas	
Van Rijn (1984)	$q^* = 0,053 \frac{T^{2,1}}{D_*^{0,3}}$	Diámetro medio de 0,2 a 2,0 mm	T y D_* fueron definidos en las ecuaciones [8.8] y [8.9]
Madsen (1991)	$q^* = F_M (\tau^{*1/2} - 0,7 \tau_c^{*1/2})(\tau^* - \tau_c^*)$	Arena	$F_M=8/\tan \phi$ para partículas que ruedan o se deslizan por el fondo, siendo ϕ el ángulo de fricción interna del material del lecho; $F_M=9,5$ para granos de arena que se desplazan saltando. Se usa principalmente en ingeniería costera
Nielsen (1992)	$q^* = 12 \tau^{*1/2}(\tau^* - \tau_c^*)$	Arena y grava uniforme	Se usa principalmente en ingeniería costera
Niño & García (1998)	$q^* = 52,17 (\tau^{*1/2} - 0,7 \tau_c^{*1/2})(\tau^* - \tau_c^*)$	Desarrollado a partir de laboratorio con arena uniforme de 0,53 mm	
Cheng (2002)	$q^* = 13 \tau^{*3/2} e^{(-0,05/\tau^{*3/2})}$	Fórmula ajustada a datos de diversos autores para distintas escalas de esfuerzo de corte y diámetros	

8.2.4.3. Datos hidrodinámicos

La hidrodinámica del río Uruguay en el área de estudio ha sido motivo de estudio, a lo largo de los años, por investigadores de Argentina y Uruguay. La modelación numérica ha sido una herramienta ampliamente utilizada en estos estudios (Junes, 2020).

En Junes (2020) se presenta la modelación hidrodinámica bidimensional, realizada en el área de estudio, con el sistema Telemac-Mascaret (Consortio TELEMAC-MASCARET, 2022). Luego del extensivo proceso de calibración/validación realizado por Junes (*ídem*), se realizó una explotación del modelo, en conjunto con el autor de esta tesis, para la obtención de una serie de datos de velocidad y elevación de la superficie de agua en el canal de navegación.

Esta explotación consistió en la simulación del período entre el 1 de enero de 2004 y el 31 de diciembre de 2010 (nótese que el período contempla bajantes y crecientes extraordinarias, Figura 8.18).

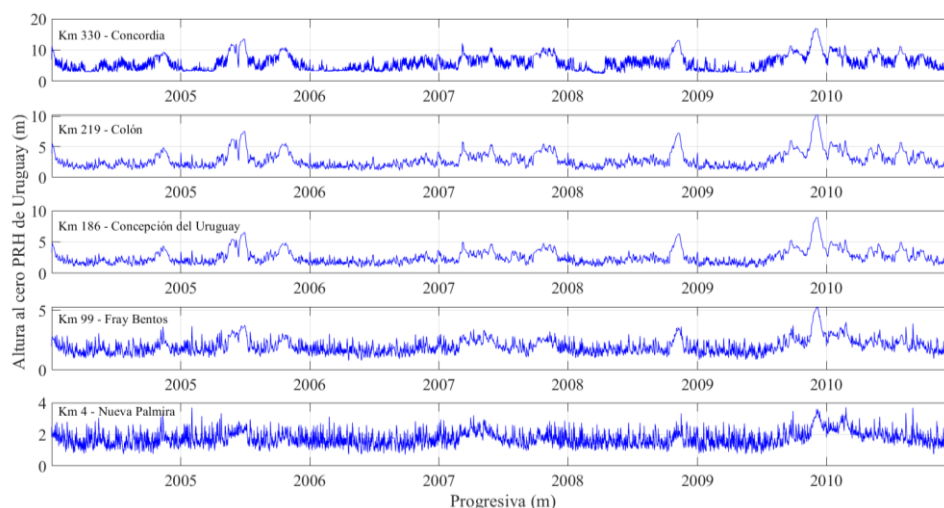


Figura 8.18.-Alturas del río Uruguay simuladas en el período 2004-2010.

En dicho período se obtuvieron, para un intervalo horario y para cada kilómetro sobre el eje del canal de navegación (desde el km 0 al 350, es decir desde Punta Gorda hasta Salto Grande), los valores de velocidad en sus componentes Norte (U_N) y Este (U_E) referidas a la proyección geográfica UTM 21 S y el tirante o profundidad hidráulica (H). De esta manera se cuenta con un set de más de 64.000 datos para cada kilómetro y cada variable. Con dichos datos se construyó la Figura 8.19, en la que se exhiben las velocidades simuladas en sus valores máximos, medios y mínimos para cada kilómetro, como así también el módulo de la velocidad obtenido como la composición vectorial de U_N y U_E .

Así como para la velocidad, en la Figura 8.20 se presentan las alturas simuladas sobre el lecho fluvial a lo largo del canal de navegación. Se observan allí también los percentiles de 5% y 95% que permiten acotar el rango de variación para el 90 % del tiempo. Todas las alturas simuladas se encuentran referidas al cero PRH (Plano de Referencia Hidrométrico de Uruguay, también conocido como Wharton o exWharton). A la fecha de realización de la presente tesis, las alturas de los ceros de las escalas referidas al plano PRH están siendo revisadas. Por este motivo y a los efectos de que la publicación no sea rápidamente invalidada por nueva información, se refiere a la web de la CARU: www.caru.org.uy, (Comisión Administradora del Río Uruguay, 2022), donde puede obtenerse la información de la altura de los ceros de cada estación limnimétrica respecto al plano PRH o MOP (de Argentina).

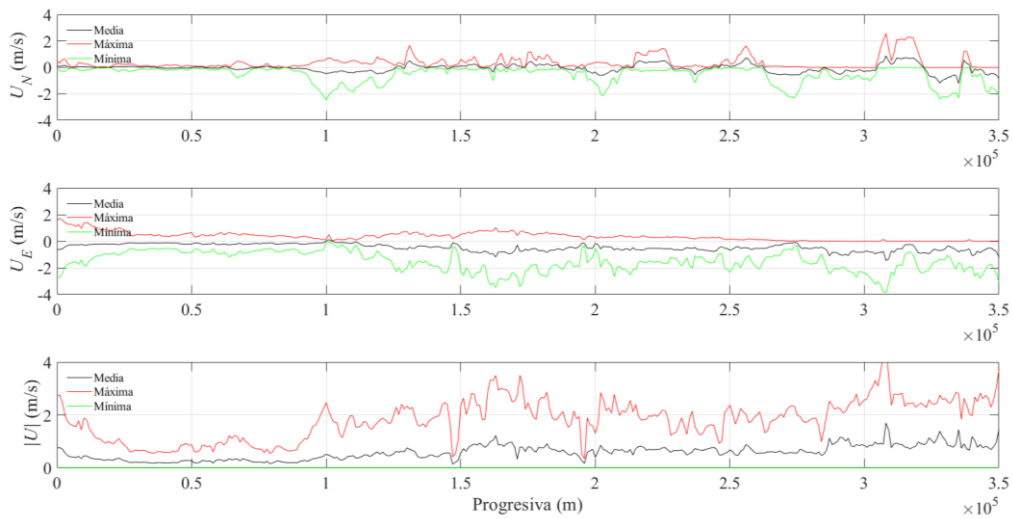


Figura 8.19.- Componentes y módulo de la velocidad a lo largo del canal de navegación.

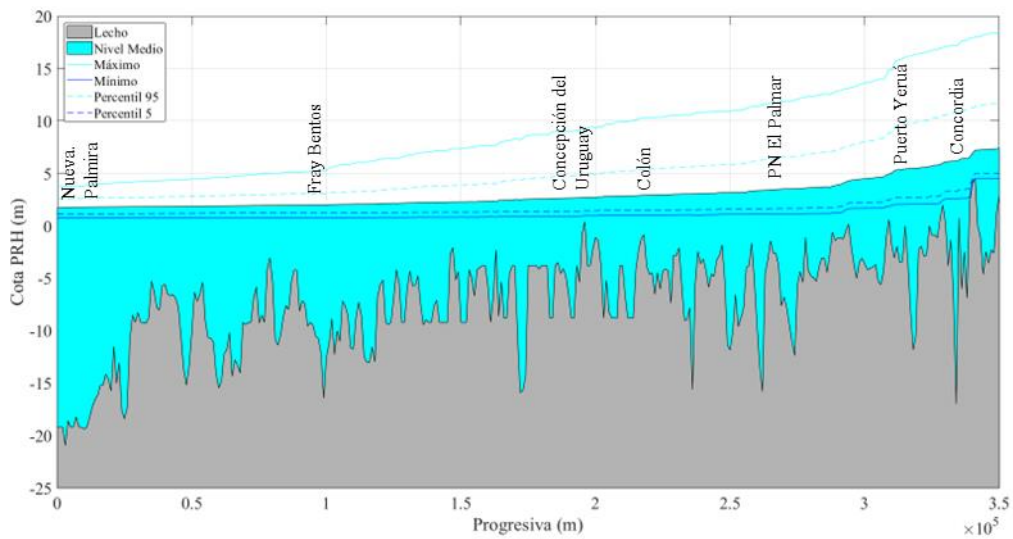


Figura 8.20.- Estadística de alturas simuladas.

8.2.4.4. *Procesamiento*

La implementación de esta teoría consistió en dos pasos. El primero fue la validación de las expresiones para los datos medidos en el paso San Francisco, reportados en los apartados anteriores de este capítulo. El segundo fue la aplicación, de las ecuaciones validadas, al tramo de estudio con información sedimentológica e hidrodinámica disponible. Esto, a los efectos de evaluar las variaciones espaciales del transporte de fondo.

Primer paso - validación de las expresiones disponibles:

Con la información hidrodinámica y sedimentológica expresada en la Tabla 8.8, correspondiente al paso San Francisco frente a Colón, se calcularon los valores de q^* para cada ecuación de la Tabla 8.9. Esta información, en conjunto con los resultados de transporte de sedimentos por el fondo medidos por desplazamiento de dunas (Título 8.2.2. *Estimación a partir del movimiento de formas de fondo*), ya reflejados en la Figura 8.17, permitieron el cálculo y comparación de q_{sf} .

Segundo paso – aplicación de las ecuaciones al canal de navegación:

Se utilizaron las ecuaciones reportadas en la Tabla 8.9 para los datos de profundidad y velocidad modelados con Telemac 2D. Además, se utilizaron los valores de d_{50} y d_{90} de las curvas granulométricas presentadas en el título 7.3.1. En los 350 kilómetros del área de estudio, sólo se contó con la información de diámetros característicos los primeros 220 kilómetros, es por esto que esta metodología se restringió a este subespacio (ver título 7.2.1).

Para cada punto (uno por kilómetro) en los 220 km estudiados se produjeron dos conjuntos de datos hidrodinámicos: profundidad y velocidad. El primero de ellos correspondiente al valor medio de la serie para ambas variables (profundidad media y velocidad media), y el segundo correspondiente a los máximos simulados (profundidad máxima y velocidad máxima). Esto se realizó a los efectos de contabilizar el valor medio y la cota superior del transporte.

Con esta información, y haciendo uso de la ecuación [8.7] se pudieron estimar las velocidades de corte correspondiente a la rugosidad de superficie (u'_*) para cada escenario. De la misma manera, a partir de los valores de diámetro medio se calculó el valor de D^* con la ecuación [8.8], y con este valor se determinó la tensión de corte crítica adimensional (τ_c^*) con la parametrización de van Rijn de la curva de Shields (van Rijn, 1984a).

Siguiendo la experiencia de Latosinski et al. (2022), para el cálculo del número de movilidad se utilizó la velocidad de corte correspondiente a la rugosidad de superficie (u'_{*}) y no a la rugosidad total (u_{*}). Este criterio se adoptó considerando que, en grandes ríos, donde las dunas de bajo ángulo son frecuentes, la separación del flujo en la cara de aguas abajo ocurre de manera intermitente o puede llegar a ser inexistente (Cisneros et al., 2020).

Para el río Uruguay, esta hipótesis fue comprobada utilizando la información de mediciones estacionarias con ADCP (Título 8.2.3), sobre las cuales se estimó el valor de la rugosidad equivalente del lecho (k_s). Para la mayoría de los perfiles analizados, el orden de magnitud de k_s fue similar al de las partículas constitutivas del lecho, y no de las formas de fondo presentes. Esto último se verificó incluso en el paso San Francisco, frente a Colón, con dunas de más de 1 metros de altura, pero con una cara de aguas abajo con ángulos del orden de los 6° (Título 7.3.3).

Además, la concordancia en el orden de magnitud entre la expresión de van Rijn, calculada con la rugosidad de grano, y las mediciones de transporte de fondo por el desplazamiento de dunas presentadas en la Figura 8.17 sugiere que la hipótesis podría ser válida. No obstante, será necesario un análisis más amplio con datos de campo para confirmarla.

Por último, se aplicaron las 13 expresiones de la Tabla 8.9, y se calculó el transporte sólido de fondo, q_{sf} , correspondiente a cada kilómetro tanto para la hidrodinámica media como la máxima.

8.2.4.5. Resultados y discusión

En la Figura 8.21 se presenta la comparación de los datos calculados por las fórmulas de la Tabla 8.9 con los datos de transporte obtenidos por desplazamiento de dunas. Allí se observa una buena concordancia (en el rango $\pm 50\%$) de los resultados predichos en comparación con los medidos. Sobre todo, del valor medio del conjunto de ecuaciones (excluyendo las expresiones de Paintal y Niño & García, que difirieron en un orden de magnitud con el resto). Las expresiones con mejor arreglo a los datos medidos son las de Ashida y Michiue (1972), Parker (1979) y Meyer-Peter & Müller (1948). Teniendo en cuenta el rango de validez y desarrollo de las expresiones, la primera de ellas sería la más consistente para el conjunto de datos analizado. Asimismo, se observa en el mismo gráfico que esta expresión es coincidente con el promedio de todas las expresiones

utilizadas (excluyendo la correspondiente a Niño & García, 1998). Asimismo, tanto Basile (2018) como García (2008) le asignan a la ecuación de Ashida y Michiue (1972) un rol fundamental en el desarrollo de sus capítulos que tratan sobre la temática, por su relevancia teórica e histórica.

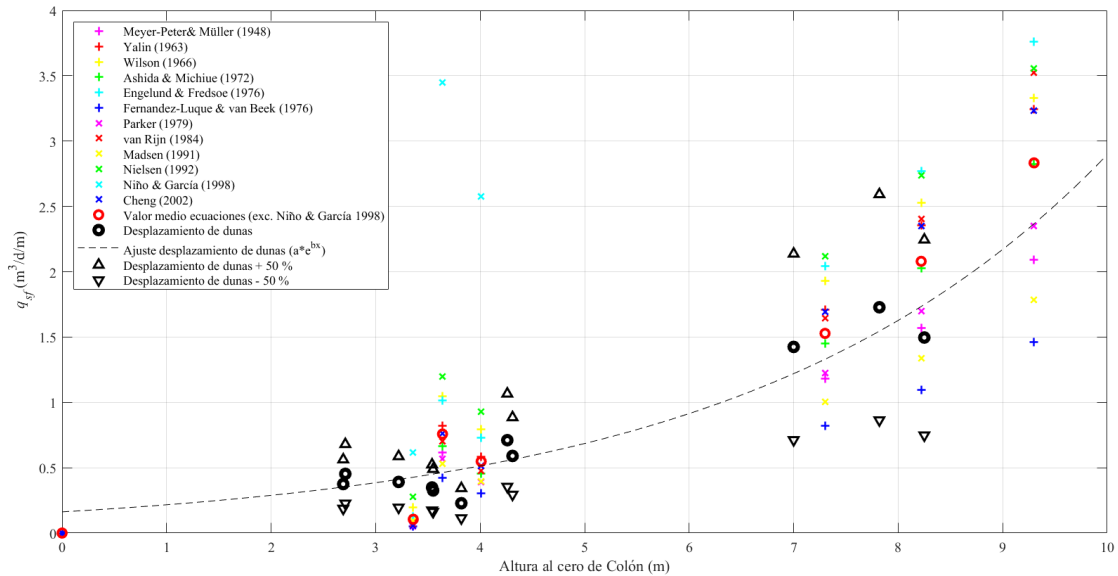


Figura 8.21.- Aplicación de las ecuaciones de predicción de q_{sf} a los datos medidos en el paso San Francisco (Colón, Entre Ríos).

El *segundo paso* consistió en la aplicación de las ecuaciones a dos conjuntos de datos hidrodinámicos. El primero de ellos fue un valor medio de velocidad media en la vertical, con una profundidad media en cada punto, mientras que el segundo se correspondió con los máximos de cada variable.

Este procedimiento resultó en la Figura 8.22 y Figura 8.23, de las cuales se aprecia una consistencia con lo observado empíricamente en los sucesivos trabajos de dragado, donde la acumulación de material a dragar ocurre desde el kilómetro 100 (Fray Bentos) hacia aguas arriba, y los máximos se dan alrededor del kilómetro 160 (Campichuelo-Argentina, San Javier-Uruguay). Esto último valida la mayor presencia de depositaciones de sedimentos en los pasos de navegación Montaña, Altos y Bajos, Arroyo Negro y Casablanca (Figura 8.6). A su vez, los datos de transporte de fondo indican que los primeros 95 km, de acuerdo a la configuración en planta (aumento del ancho) y profundidades, presenta la menor dinámica sedimentológica.

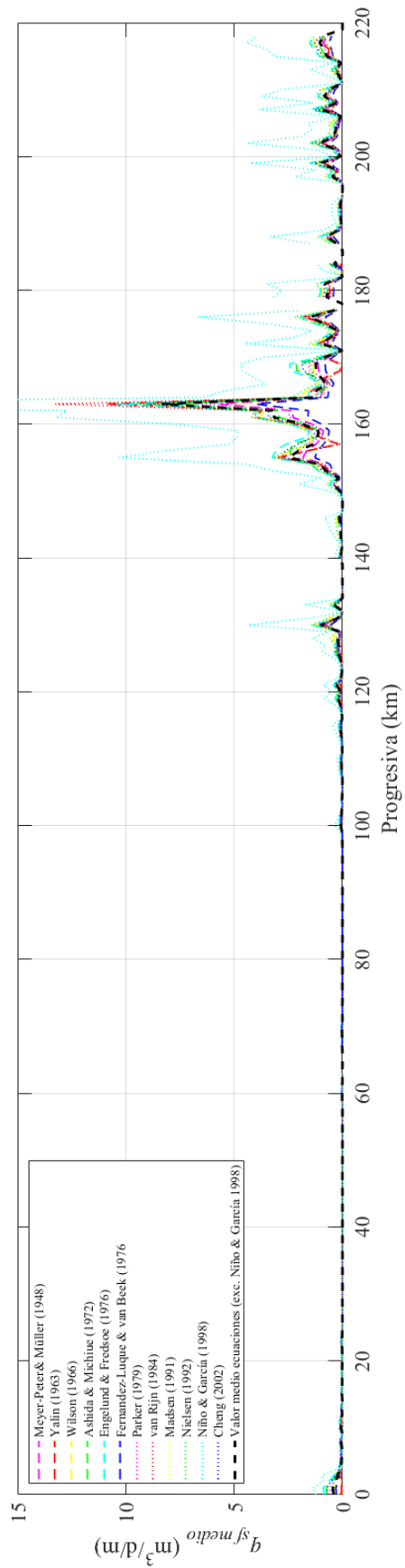


Figura 8.22.- Cálculo de q_{sf} , para datos hidrodinámicos medios, a lo largo del canal de navegación.

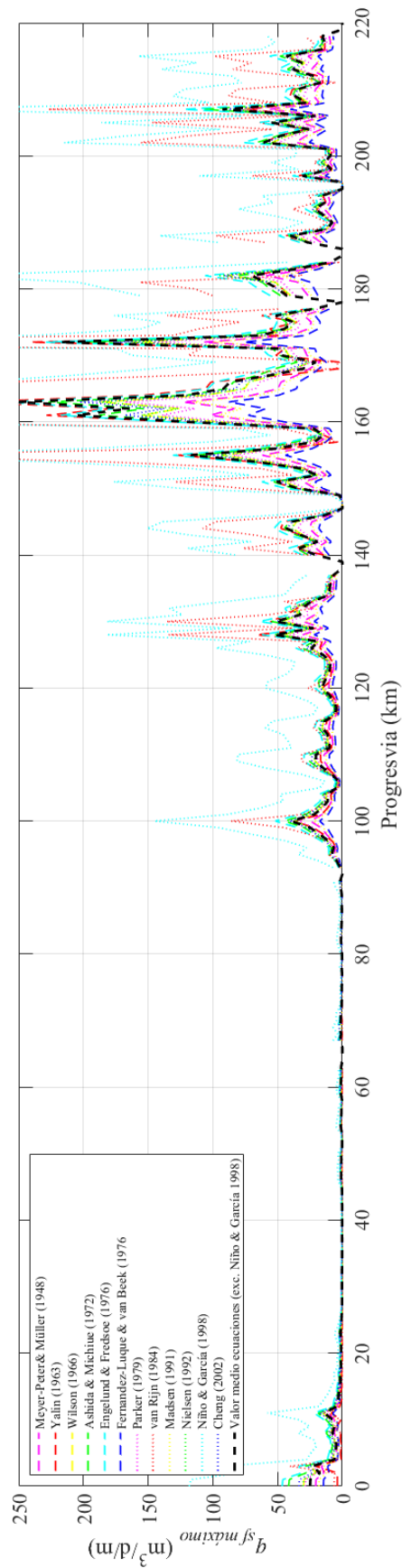


Figura 8.23.- Cálculo de q_{sf} , para datos hidrodinámicos máximos, a lo largo del canal de navegación.

8.3. Discusión y conclusiones generales

En la Figura 8.21 se mostró la precisión de las ecuaciones como predictoras del transporte de sedimentos de fondo (q_{sf}). Resta ahora analizar la compatibilidad de los resultados alcanzados en el título anterior con las ecuaciones, respecto de los valores medidos por sucesión de batimetrías (8.2.1).

Se utilizaron los valores de $q_{sf\text{ máximo}}$ y $q_{sf\text{ medio}}$ calculados, comparándolos con los datos de sedimentación media anual (T_{sed}) reportados en la Figura 8.6. Para homogeneizar las magnitudes, se aplicó la ecuación [8.17], derivada de la [8.2], donde B_p representa el ancho promedio del paso de navegación relevado, expresado como la relación entre el área relevada (A_p) y la longitud del paso (L_p). En este caso, $-\Delta q_{sf}$ se calculó como la máxima diferencia dentro del paso entre las cantidades q_{sf} calculadas cada kilómetro, tal y como se mencionó en el apartado anterior. La porosidad P mantiene aquí la definición ya brindada.

$$-\Delta q_{sf} \frac{B_p}{(1-P)} = -\Delta q_{sf} \frac{A_p}{(1-P)L_p} = \frac{\Delta V}{\Delta t} = T_{sed} \quad [8.17]$$

En la Figura 8.24 se observa que, para los pasos ubicados aguas arriba del kilómetro 100 (Fray Bentos), la tasa de sedimentación medida por batimetrías es compatible con $q_{sf\text{ medio}}$, y menor a las correspondientes a $q_{sf\text{ máximo}}$. Este comportamiento no se verifica en el Paso San Genaro, posiblemente debido a su escasa longitud, que obligó a estimar Δq_{sf} con valores hidrodinámicos externos al tramo.

Otro fenómeno distinguible en dicha figura es la sedimentación medida mayor a la calculada con datos hidrodinámicos máximos, en el tramo aguas abajo (km 0 al 100). Esto sugiere que existen otros fenómenos que explicarían esta depositación, como el aporte de material de los ríos Gualeguaychú y Negro, o la depositación de sedimentos transportados en suspensión.

Por todo lo expuesto, se logró dar respuesta los objetivos específicos OE2 y OE4, respecto de generar conocimientos sobre el transporte de sedimentos por el fondo y su relación con la hidrodinámica. Asimismo, se logró validar al resultado promedio de once ecuaciones, y particularmente de la Ashida & Michiue (1972) como una herramienta que permite la predicción del transporte de fondo ante diferentes condiciones hidrodinámicas, y puede ser usada claramente para la modelación hidrosedimentológica del ambiente fluvial.

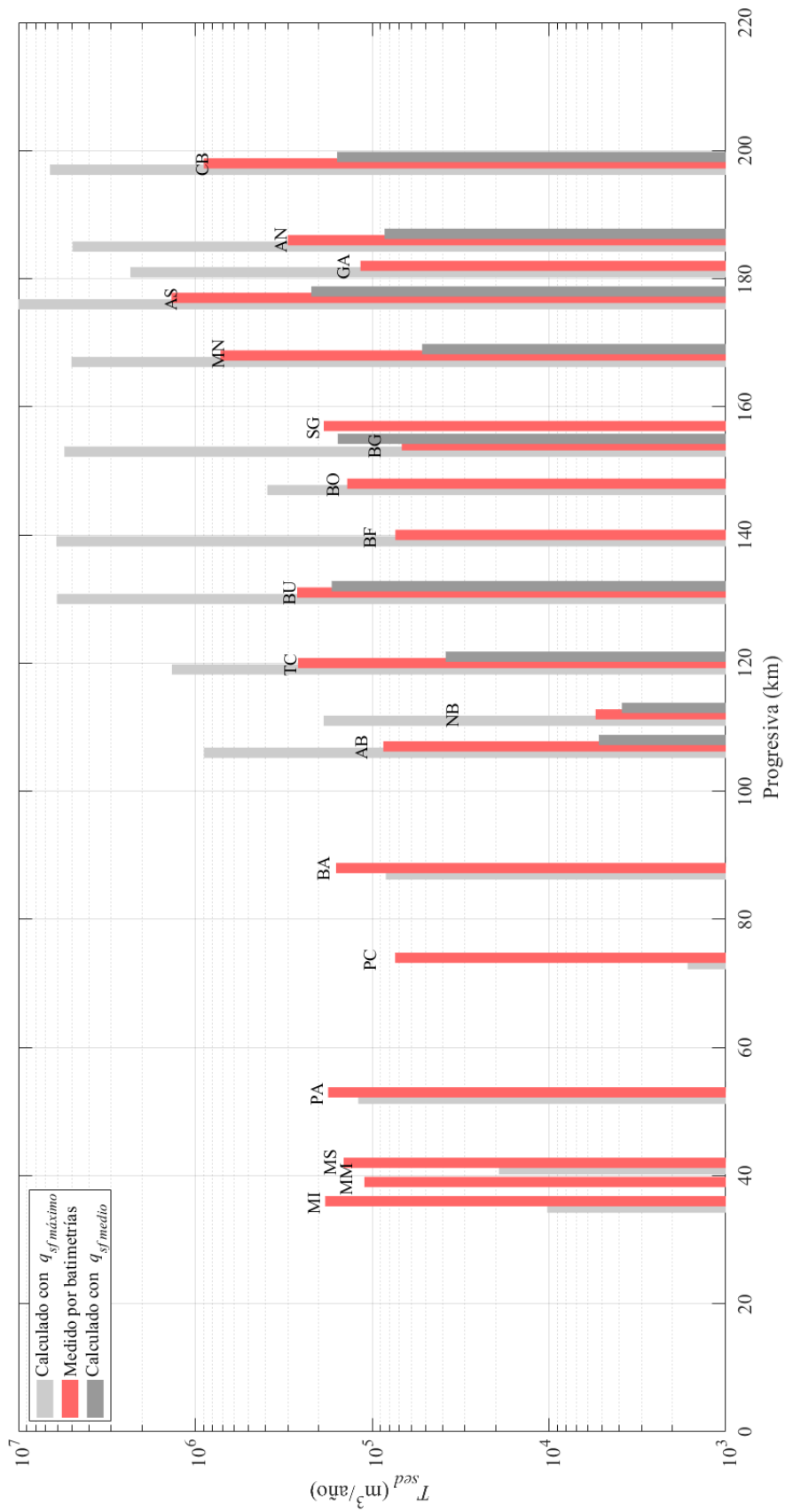


Figura 8.24.- Tasa de sedimentación media anual medida y calculada.

PARTE III – INTEGRACIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Capítulo 9

Curvas de gasto líquido y sólido en las secciones relevadas

9.1. Introducción

Para una estación de medición fluvial, las curvas de gasto o curvas de descarga son una herramienta matemática de la hidrología que vincula la altura limnimétrica con el caudal circulante por una sección transversal del curso de agua (Organización Meteorológica Mundial, 2011). La misma se construye a partir de la observación de pares nivel limnimétrico (altura) – caudal, para distintas condiciones hidrológicas.

Shaw (1994) presentó la ecuación [9.1] para curvas de gasto líquido. Esta expresión puede ajustarse a diferentes segmentos de datos cuando se observan discontinuidades en la relación entre el nivel limnimétrico (H) y el caudal (Q), especialmente si estas discontinuidades se correlacionan con cambios en la sección transversal.

$$Q = a (H - H_0)^b \quad [9.1]$$

En [9.1] se observan, además de H y Q , los coeficientes de ajuste a y b , y H_0 . Este último valor es una altura limnimétrica teórica que se corresponde con un caudal nulo.

Los coeficientes señalados se obtienen mediante el ajuste por mínimos cuadrados de la ecuación presentada, sobre una selección de pares H y Q disponibles. Cabe señalar que esta expresión es válida para secciones transversales estables, y cuya rugosidad tenga una variación poco significativa durante el año hidrológico. Asimismo, estas curvas presentan limitada validez en las secciones con efectos de remanso.

De manera análoga a la relación entre altura limnimétrica y caudal, el transporte de arenas suele variar de forma proporcional al caudal elevado a una potencia n mayor que 1

(Andrews, 1980), como se muestra en la ecuación [9.2] (Glysson, 1987). De igual forma, las componentes del transporte total de arenas (G_s), tanto en suspensión (G_{ss}) como de fondo (G_{sf}), siguen la misma relación, con coeficientes de ajuste a y b donde el subíndice indica su variable de pertenencia.

$$G_s = a_s Q^{b_s}, G_{ss} = a_{ss} Q^{b_{ss}} \text{ y } G_{sf} = a_{sf} Q^{b_{sf}} \quad [9.2]$$

Al igual que para las curvas $H-Q$, las curvas de gasto sólido se ajustan por el método de mínimos cuadrados, sobre los pares $Q-G$ disponibles.

Glysson (1987), en un trabajo exhaustivo sobre la metodología y los aspectos a considerar para el ajuste de este tipo de expresiones, indica que el modelo logarítmico puede calibrarse integrando tanto la información observada en los gráficos como los datos contextuales de los relevamientos. Entre estos últimos se incluyen, por ejemplo, la estación del año en que se llevó a cabo la campaña y la fase del hidrograma (creciente o decreciente), entre otros factores relevantes.

En esta línea, Gray & Simoes (2008) mencionan que una relación directa entre Q y G_s es rara en ríos. Siempre existe una falta de sincronización entre los picos de caudal y de concentración de sedimentos, que es más regla que excepción, y que se traduce en otra dificultad para el establecimiento de este tipo de relaciones.

En resumen, las curvas de descarga son herramientas matemáticas que permiten la obtención del caudal y del transporte de sedimentos a partir de las alturas limnimétricas de una sección conocida. Por este motivo, tienen un valor superlativo en la gestión, tanto hidrológica como de los sedimentos de un tramo de cauce aluvial. A pesar de su importancia, no se tienen hasta el presente un análisis de este tipo en el río Uruguay.

Con el objetivo de generar esta información para el río Uruguay, se utilizaron los datos limnimétricos (alturas de escala) y los aforos con ADCP disponibles. A partir de estos, y munido de las metodologías y resultados presentados en los capítulos 6 y 8 de esta tesis, se pretende construir las curvas de descargas de sedimentos (G_s , G_{ss} , G_{sf} y G_w), en las secciones donde existe información.

9.2. Metodología

9.2.1. Curvas de gasto líquido

Para la obtención de curvas de gasto líquido, se trabajó con los aforos realizados en las secciones transversales mencionadas en el título 5.3 y la correspondiente a Concepción

del Uruguay medida por la Secretaría de Infraestructura y Políticas Hídricas (título 4.2). En la Tabla 9.1 se presentan brevemente detalladas las secciones utilizadas, y la cantidad de información disponible. También se indican en la tabla las alturas limnimétricas de referencia para cada medición, obtenidas del sitio web de la CARU (Comisión Administradora del Río Uruguay, 2022). En los casos en que la sección de aforo se ubicó entre dos limnómetros, la altura correspondiente a cada aforo se obtuvo por interpolación lineal de dichos limnómetros, asumiendo una pendiente del pelo de agua constante entre ellos (ver Figura 9.1).

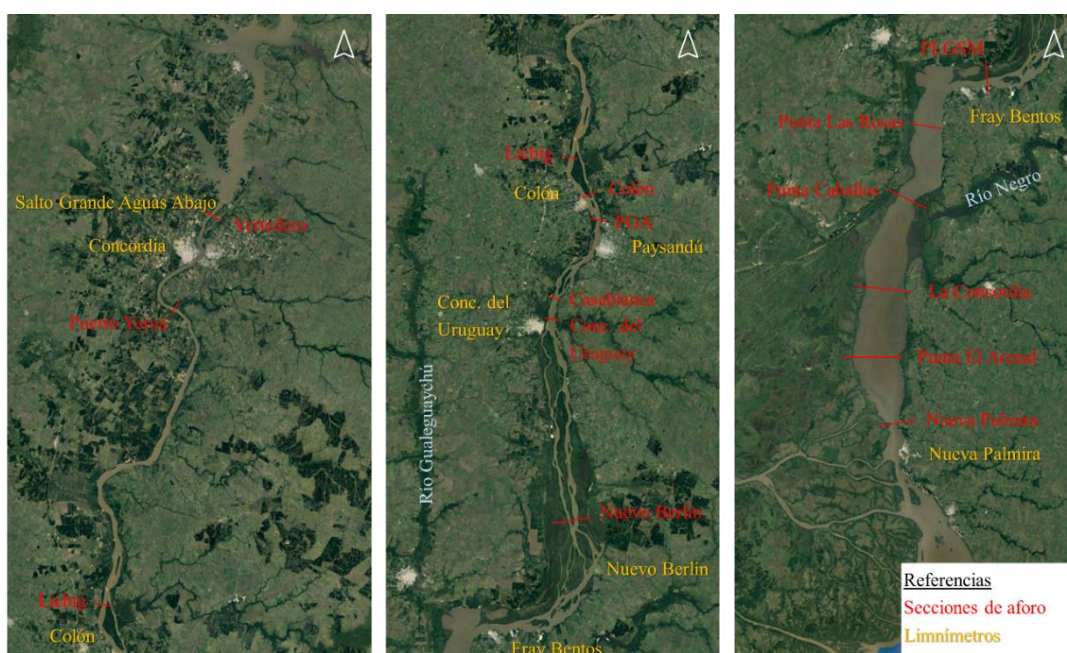


Figura 9.1.- Limnómetros y secciones de aforo.

Tabla 9.1.- Secciones relevadas y alturas limnimétricas asociadas.

Km aprox.	Sección	Cantidad de mediciones disponibles	Altura limnimétrica de referencia
9	Nueva Palmira	29	Puerto Nueva Palmira
25	Punta El Arenal	11	Interpolación lineal entre Nueva Palmira y Fray Bentos
40	La Concordia	2	
70	Punta Caballos	12	
85	Punta Las Rosas	2	
105	PLGSM	117	Puerto Fray Bentos
140	Nuevo Berlín Brazo Derecho	30	Interpolación lineal entre Fray Bentos y Concepción del Uruguay
140	Nuevo Berlín Brazo Izquierdo	29	Concepción del Uruguay
187	Concepción del Uruguay	209	Puerto de Concepción del Uruguay
192	Casablanca	39	Interpolación lineal entre Concepción del Uruguay y Paysandú
213	PGA	69	Interpolación lineal entre Paysandú y Colón
219	Colón		
230	Liebig	58	Puerto de Colón
320	Puerto Yerúa	65	Puerto de Concordia
350	Vertedero	59	Salto Grande aguas abajo

En las secciones ubicadas en los 100 km más al sur del área de estudio, la influencia de la descarga en el Río de la Plata afecta la relación altura-caudal, dependiendo de las condiciones hidrológicas (Junes, 2020). Este efecto se observa claramente en los ábacos elaborados en el año 2006 mediante un convenio CARU – DNH (Uruguay) e INA (Argentina). Estos ábacos son gráficos de doble entrada que relacionan caudal erogado por la represa de Salto Grande y la altura en Nueva Palmira, con el nivel hidrológico en diferentes puertos del área de estudio, a saber: Fray Bentos, Concepción del Uruguay, Paysandú, Colón, Concordia y Salto. Estos ábacos fueron construidos mediante un modelo hidrodinámico unidimensional estacionario, Mike 11 (DHI A/S, 2024), en el que se simuló diferentes caudales erogados por la represa en combinación con una variedad de condiciones de borde en Nueva Palmira. La aplicación práctica de estos ábacos ha sido una herramienta útil para la previsión de caudales máximos de crecida, por cuanto se estima que sus resultados son precisos en $\pm 0,20$ m. En el contexto de esta tesis, los ábacos se compararon con las curvas de altura $H-Q$ obtenidas en las secciones con ábaco disponible, a los efectos de evaluar su validez y aplicabilidad.

9.2.2. Curvas de gasto sólido

9.2.2.1. Curvas de gasto sólido fino (G_w)

En el título 4.2 se presentaron las mediciones realizadas por la Secretaría de Infraestructura y Políticas Hídricas de Argentina, en la latitud de Concepción del Uruguay. Si bien no se cuenta con mayor información, ni otras secciones transversales sistemáticamente relevadas, puede asumirse que los sedimentos finos mantienen una concentración relativamente estable, al menos en el tramo entre la Represa de Salto Grande y Fray Bentos. A partir de allí, hacia aguas abajo, la gran expansión de la sección transversal puede generar cambios en esta variable que aún no han sido estudiados.

A los efectos de proveer una herramienta de estimación de la variable en el contexto de este capítulo, se presenta un ajuste por mínimos cuadrados de los datos presentados en la Figura 4.3, asociado a la sección Concepción del Uruguay, que es donde se cuenta con mayor cantidad de información medida.

9.2.2.2. Curvas de gasto sólido grueso (G_s)

Ante la diversidad de datos y la ausencia de mediciones directas de las variables, en el contexto de esta tesis se desarrollaron diferentes herramientas para la estimación de la componente de fondo (G_{sf}) y en suspensión (G_{ss}) del gasto sólido grueso (G_s).

En el Capítulo 8 se definió la validez del conjunto de fórmulas de transporte de fondo, particularmente la ecuación de Ashida y Michiue (1972), para la estimación de esta componente del gasto sólido. Estas ecuaciones, en conjunto con los datos de granulometría del lecho y la hidrodinámica medida en cada aforo, permitieron calcular el valor de G_{sf} para cada caudal medido.

En el Capítulo 6 se evidenció también que, a partir de mediciones realizadas con ADCP, fue posible obtener estimaciones aceptables de G_{ss} al compararlas con los aforos sólidos obtenidos mediante métodos tradicionales. Esto implica que cada aforo constituye una medición indirecta del caudal sólido en suspensión, con el nivel de incertidumbre inherente tanto a la variable como a la metodología empleada. Por este motivo, se optó por utilizar las estimaciones obtenidas con ADCP para la construcción de las curvas de descarga, en lugar de recurrir a fórmulas de transporte como las validadas para G_{sf} .

Con estas consideraciones, se presenta a continuación la metodología utilizada para transformar cada aforo en una medición indirecta de G_{ss} o G_{sf} , para luego vincularla con las condiciones hidrométricas de la fecha de medición (caudal y altura limnimétrica).

9.2.2.2.1. Transporte por el fondo (G_{sf})

Para estimar el transporte de fondo mediante la metodología indirecta de Ashida y Michiue (1972), según García (2008), se requiere información sobre el sedimento del lecho y las condiciones hidrodinámicas en cada sección. En el Capítulo 7 se presentó la composición del fondo a partir de datos granulométricos del canal de navegación; la Tabla 9.2 resume los diámetros representativos (d_{50} y d_{90}) por sección. Para Liebig y Puerto Yeruá, los valores fueron estimados según la textura del lecho y el conocimiento del área.

Tabla 9.2.- Diámetros representativos del sedimento de fondo.

Sección	d_{50} (μm)	d_{90} (μm)
Nueva Palmira	20	100
Punta El Arenal, La Concordia, Punta Caballos y Punta Las Rosas	40-50	100-120
Fray Bentos	150	400
Nuevo Berlín	200	400
Concepción del Uruguay	250	400
Casablanca	250	400
Colón y Puente General	340	500
Artigas	340	500
Liebig (*)	350	1000
Puerto Yeruá (*)	5.000	20.000
Vertedero	Roca	Roca

(*) Valores estimados.

Asimismo, en la Tabla 9.1 se indicaron las secciones con información hidrodinámica disponible, excluyendo Concepción del Uruguay por falta de archivos ADCP de los aforos reportados por la Subsecretaría de Infraestructura y Política Hídrica.

La ecuación de Ashida y Michiue (1972), para el cálculo de G_{sf} , utiliza como variable de entrada la tensión de corte sobre el fondo (τ_*), la cual se obtiene a partir de la velocidad de corte (u_*). Conforme a lo presentado en el capítulo anterior, la velocidad de corte se estimó a partir de la velocidad media en la vertical (U), la profundidad total (H) y la rugosidad de superficie ($k_s = 3 d_{90}$), empleando la ecuación de van Rijn (1984a):

$$\frac{U}{u_*} = 5.75 \log \left(\frac{12 H}{k_s} \right), \quad [9.3]$$

Para el cálculo de G_{sf} se asumió que los diámetros representativos del fondo son homogéneos a lo largo de la sección transversal en cada tramo analizado. Posteriormente, se aplicó la ecuación de Ashida y Michiue (1972) a los datos de los aforos, utilizando el promedio espacial de las variables hidrodinámicas. De este modo, se obtuvo un valor de G_{sf} para cada intervalo espacial. La totalización del transporte se realizó mediante el método de igual incremento de caudal – EDI (Edwards & Glysson, 1999).

A partir de estos cálculos, se determinaron los pares Q - G_{sf} correspondientes a cada sección transversal. Finalmente, se realizó un ajuste por mínimos cuadrados de la ecuación [9.2] para los pares disponibles en cada sección.

9.2.2.2.2. Transporte en suspensión (G_{ss})

Con la calibración establecida en el 18/12/2018 se realizó una aplicación del algoritmo ASETSM9 para los 522 archivos correspondientes a más de 200 aforos en 12 secciones trasversales (ver Tabla 9.1, excluyendo Concepción del Uruguay por no contar con los datos de la medición). Estos fueron descriptos en la sección 5.3.1 de la presente tesis.

Considerando que no se midió en cada aforo los valores de concentración de sedimentos finos (M_{s1}), diámetro medio de sedimentos finos (d_{50-1}) y diámetros medio de arenas en suspensión (d_{50-2}), se realizaron combinaciones de estos valores para analizar la sensibilidad de los resultados a cada uno de ellos. Se tomaron 3 valores de cada uno, definiendo así 27 combinaciones posibles. Los diámetros y las concentraciones utilizadas se muestran en la Tabla 9.3, y guardan relación con valores mínimos, medios y máximos frecuentes observados en campo (Comité Científico CARU, 2019; Subsecretaría de Infraestructura y Política Hídrica de Argentina, 2022; López Weibel, 2023).

Tabla 9.3.- Concentraciones de sedimentos finos y diámetros utilizados en la aplicación del software ASETSM9.

	M_{s1} (mg/L)	d_{50-1} (micrones)	d_{50-2} (micrones)
Mínimo	5	3.5	100
Medio	15	7.5	150
Máximo	30	15	200

Estas combinaciones realizadas permiten entender la sensibilidad de la inversión acústica a cada una de las variables no medidas. Luego, el resultado más adecuado será el que mejor se ajuste a las características conocidas de la sección, o bien podrá al menos establecerse el rango de variación del transporte de fondo en suspensión.

Mediciones realizadas por la CARU a comienzos de 2024 en el Puente General Artigas, con un caudal líquido de 6.500 m³/s, han resultado en valores de M_{s1} y d_{50-1} cercanos al límite superior de la tabla siguiente, mientras que d_{50-2} se encontró entre 100 y 150 micrones (López Weibel, 2023)

La aplicación del ASETSM9 se realizó para cada sección transversal, utilizando un algoritmo automático de lectura de archivos y ejecución de la rutina de cálculo del transporte de sedimentos. Luego, para cada sección, fueron extraídos los conjuntos de datos caudal líquido (Q), caudal sólido fino (G_w) y caudal sólido en suspensión (G_{ss}), que son resultados del software.

En los casos donde se contó con datos medidos de la variable (ver Tabla 5.4), este se utilizó para contrastar los resultados obtenidos con la metodología descripta.

Además, a fin de realizar una primera evaluación de la capacidad predictiva de una expresión sencilla en el cálculo de G_{ss} , se siguió un procedimiento similar al empleado para el transporte de fondo. Se compararon las mediciones directas realizadas en Colón (CARU-FICH) y en Concepción del Uruguay (SSIPH-EVARSA), con las mediciones indirectas obtenidas mediante ASETSM9 en Colón y Casablanca, y con los resultados de la aplicación de la ecuación simplificada van Rijn [9.4] (Basile, 2018). Esta expresión se seleccionó dado su buen ajuste en el río Paraná, la cual tiene características hidráulicas y sedimentológicas similares al del río Uruguay. Queda para trabajo futuros la evaluación de otras ecuaciones de transporte. La fórmula de Van Rijn se expresa en función de los valores medios de la velocidad de la corriente (U) y del tirante (H) medidos.

$$\frac{q_{ss}}{UH} = 0,012 \left\{ \frac{U - U_c}{(s - 1)g d_{50}} \right\}^{2,4} \left(\frac{d_{50}}{H} \right) D_*^{-0,6} \quad [9.4]$$

U_c es la velocidad crítica de iniciación del movimiento, que se calcula según [9.5], siendo u_{*c} la velocidad de corte crítica correspondiente al d_{50} , para iniciación del movimiento de acuerdo al diagrama de Shields.

$$U_c = u_{*c} * 5,75 \log\left(\frac{12 H}{3 d_{90}}\right) \quad [9.5]$$

Una vez calculado q_{ss} , este se integró por el método EDI (Edwards & Glysson, 1999), y se multiplicó por la densidad aparente del cuarzo (supuesta en 2.650 kg/m^3) para obtener la carga de sedimentos de fondo en suspensión para cada sección G_{ss} . Con estos resultados se construyeron la Figura 9.2 y Figura 9.3. En ambas se observa que la expresión subestima valores de G_{ss} para los valores más frecuentes de caudal, por lo que no sería apropiada para la construcción de series. Sin embargo, para valores altos de caudal provee, en ambos casos una aproximación satisfactoria.

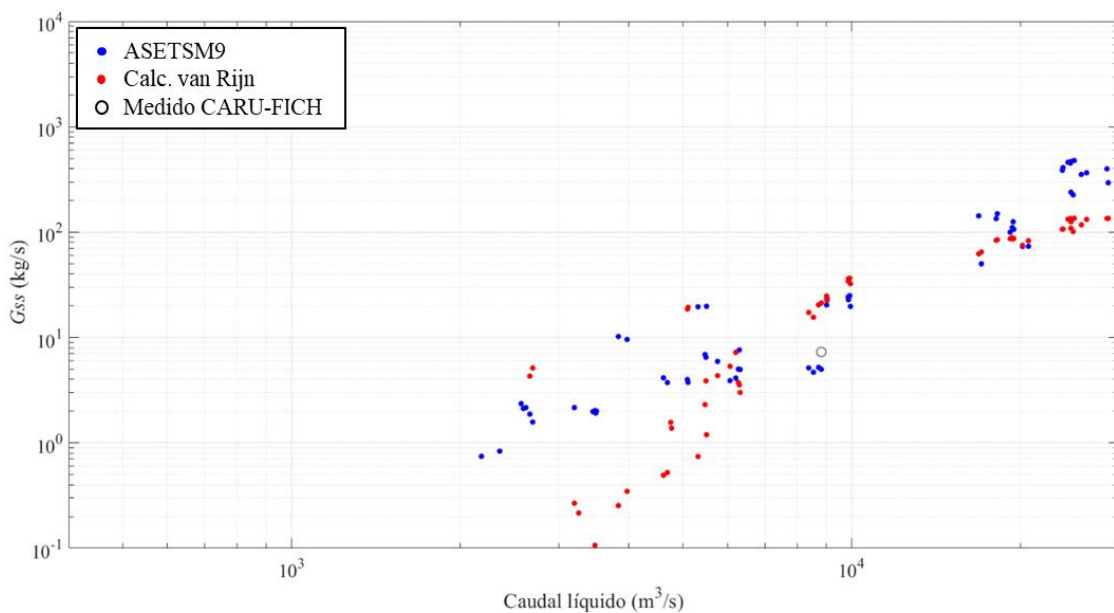


Figura 9.2.- Medición directa con USP-61 realizada por CARU-FICH, indirecta (ADCPSM9) y cálculo (calc. van Rijn) de G_{ss} para la Sección Colón y PGA.

Se observa además que, pese a la gran dispersión de las mediciones indirectas, estas parecen reproducir mejor la variabilidad natural observada del proceso, y el rango de variación del mismo para diferentes condiciones hidrodinámicas.

Por estos motivos, para el caso de G_{ss} las curvas de gasto sólido se ajustaron sobre los resultados de las mediciones indirectas, y no sobre los resultados estimados con la fórmula presentada.

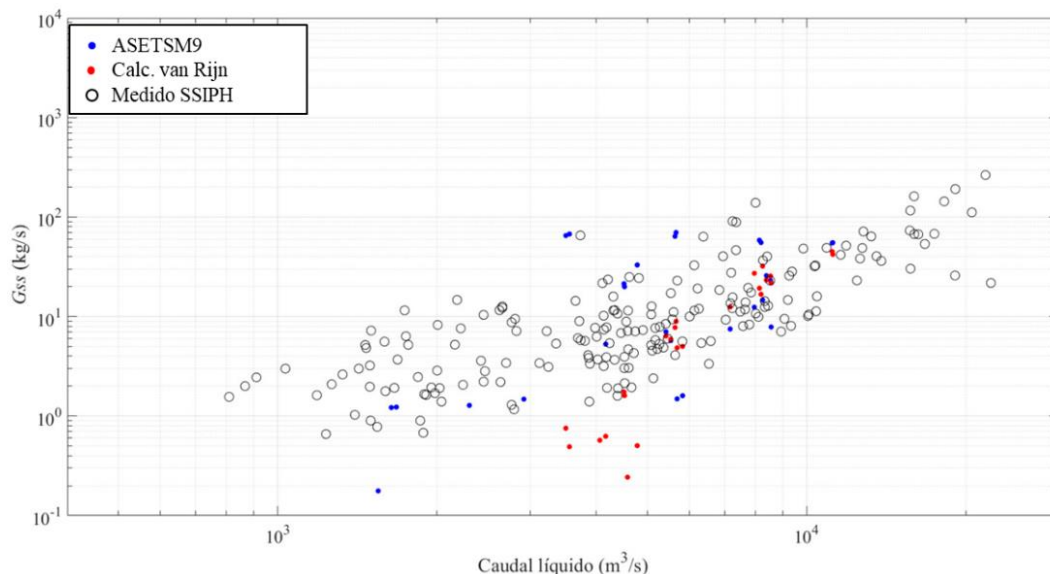


Figura 9.3.- Medición directa Subsecretaría de Infraestructura y Política Hídrica (SSIPH), indirecta (ADCPSM9) y cálculo (calc. van Rijn) de G_{ss} para la Sección Casablanca/Concepción del Uruguay.

9.3. Resultados y discusión

9.3.1. Carga de lavado

La concentración de sedimentos finos en suspensión (M_w) puede calcularse de los valores informados como la relación entre el caudal sólido fino y el caudal líquido. En la Tabla 9.4 se presentan los valores estadísticos muestrales de la serie de datos de concentración de sedimentos finos en suspensión, calculados a los efectos del presente.

Tabla 9.4.-Valores estadísticos muestrales de la serie de concentración de sedimentos finos en suspensión. Datos del Sistema Nacional de Información Hídrica - Sección Concepción del Uruguay (Subsecretaría de Infraestructura y Política Hídrica de Argentina, 2022).

Concentración de sedimentos finos en suspensión (mg/L)	
Promedio	16,87
Mínimo	1,00
Máximo	96,97
Rango	95,97
Desvío estándar	12,59

Se realizó un análisis de frecuencia de dichos datos, lográndose la Tabla 9.5. Asimismo, en la Figura 9.4 se presentan las frecuencias relativas absolutas y acumuladas para cada intervalo de concentraciones. El dato más importante de dichas representaciones es que el 86% de los valores observados se encuentran en el rango 5-30 mg/L, mientras que casi el 95% de los valores son menores a 40 mg/L.

Tabla 9.5.- Análisis de frecuencias de concentración de sedimentos finos en suspensión. Datos del Sistema Nacional de Información Hídrica - Sección Concepción del Uruguay (Subsecretaría de Infraestructura y Política Hídrica de Argentina, 2022).

Intervalo	Concentración de sedimentos finos (mg/L)	Frecuencia Acumulada	Frecuencia	Frecuencia relativa acumulada	Frecuencia relativa
0	0,00	0	0	0,000	0,000
1	5,00	6	6	0,031	0,031
2	10,00	54	48	0,281	0,250
3	15,00	111	57	0,578	0,297
4	20,00	147	36	0,766	0,188
5	25,00	166	19	0,865	0,099
6	30,00	172	6	0,896	0,031
7	35,00	177	5	0,922	0,026
8	40,00	181	4	0,943	0,021
9	45,00	185	4	0,964	0,021
10	50,00	186	1	0,969	0,005
11	55,00	187	1	0,974	0,005
12	60,00	188	1	0,979	0,005
13	65,00	189	1	0,984	0,005
14	70,00	191	2	0,995	0,010
15	75,00	191	0	0,995	0,000
16	80,00	191	0	0,995	0,000
17	85,00	191	0	0,995	0,000
18	90,00	191	0	0,995	0,000
19	95,00	191	0	0,995	0,000
20	100,00	192	1	1,000	0,005
Total	--	192	192	--	1,000

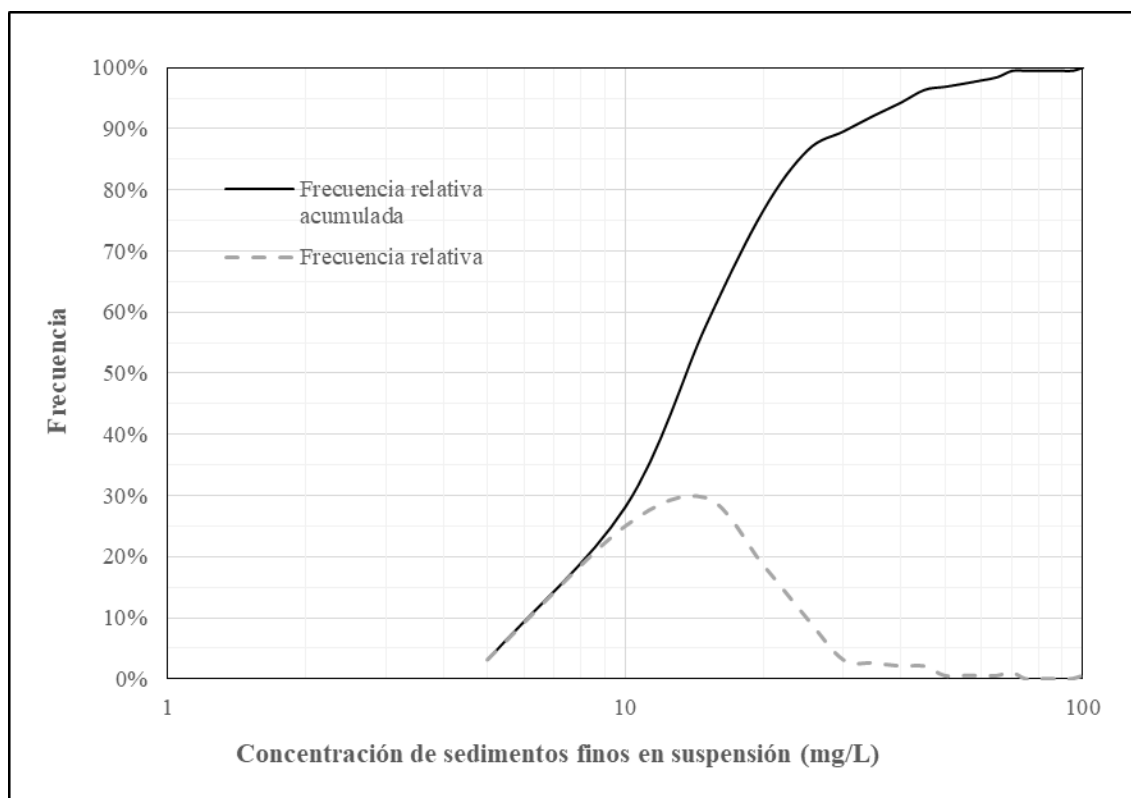


Figura 9.4.- Frecuencia relativa de las concentraciones de sedimentos finos en suspensión. Datos del Sistema Nacional de Información Hídrica - Sección Concepción del Uruguay (Subsecretaría de Infraestructura y Política Hídrica de Argentina, 2022).

El gasto sólido fino relevado (G_w), puede observarse en la Figura 9.5. Un ajuste del tipo potencial como el de la Ecuación [9.1], proporciona un resultado satisfactorio en términos del coeficiente de determinación.

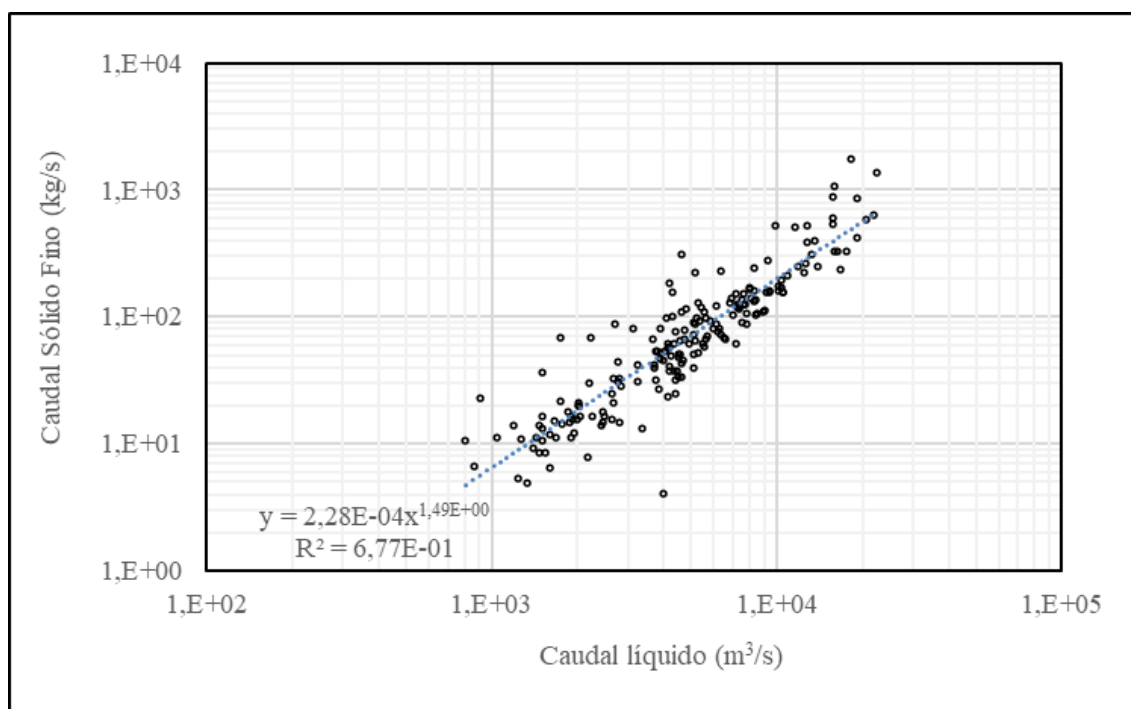


Figura 9.5.- Ajuste curva de gasto sólido fino (G_w) – Sección Concepción del Uruguay.

La ecuación de ajuste se puede expresar como se enuncia a continuación:

$$G_w = 2,283 \cdot 10^{-4} Q^{1,486} \text{ [kg/s]} \quad [9.6]$$

Sin embargo, debe destacarse que la línea de tendencia varía dos órdenes de magnitud para el rango de caudales, mientras que la variación natural de G_w puede alcanzar un orden de magnitud para el mismo caudal.

De la misma manera, debe señalarse que la correlación entre el caudal líquido y el caudal sólido fino presenta un grado de correlación espuria por la definición o cálculo del dato de caudal sólido informado por la Secretaría de Infraestructura y Políticas Hídricas. Esto se observa claramente en la gráfica de concentraciones de la fracción fina como función del caudal a continuación (Figura 9.6), donde la relación es mucho menos evidente que en la Figura 9.5.

Por este motivo, una estimación del caudal sólido de la fracción fina utilizando el producto de la concentración media (16,87 mg/L, de la Tabla 9.4) con el caudal será igualmente válida.

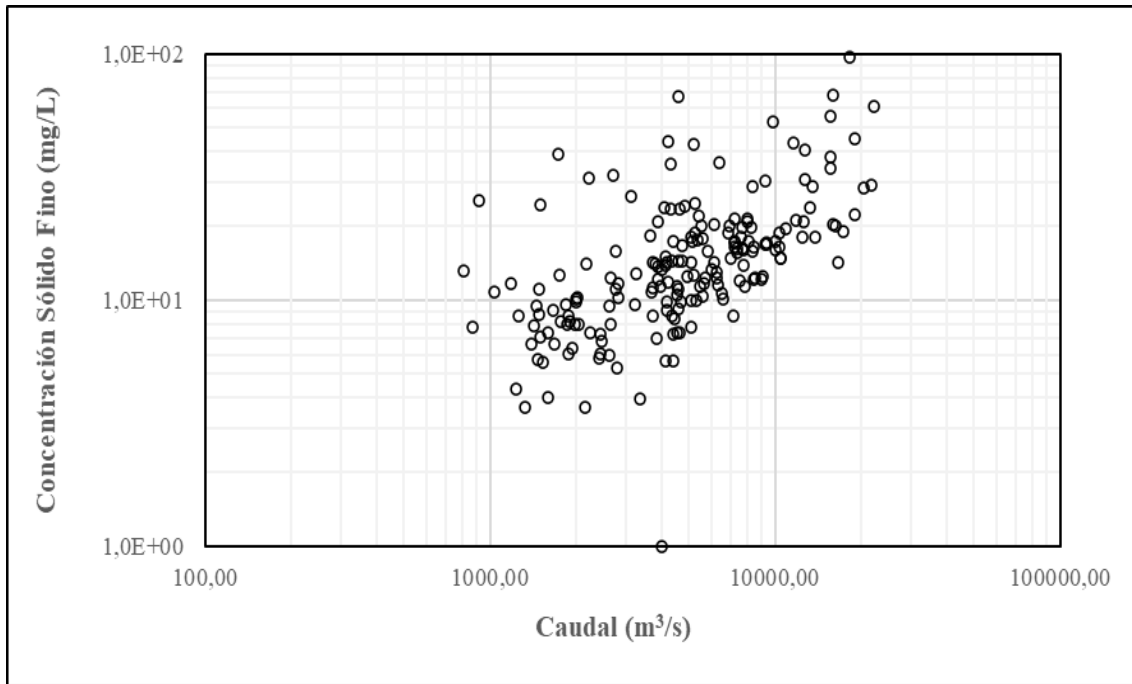


Figura 9.6.- Concentración de sólidos finos en función del caudal líquido – Sección Concepción del Uruguay.

9.3.2. Curvas de gasto líquido y sólido

Se presentan a continuación los resultados de los ajustes de las curvas de gasto líquido a los aforos disponibles (Tabla 9.1), y curvas de gasto sólido a las mediciones indirectas de G_{sf} y G_{ss} estimadas a partir de datos de ADCP (fórmulas y ASETSM9 respectivamente). Asimismo, se describe brevemente cada sección transversal para que el lector pueda contextualizar la discusión de lo logrado.

9.3.2.1. Nueva Palmira

Esta sección se ubica aproximadamente en el kilómetro 9 de la progresiva del río Uruguay (Figura 9.7), en el tramo final del RU que representa una amplia depresión heredada (Iriondo & Kröhling, 2008). En esta zona, el río Uruguay interactúa con las fluctuaciones del Río de la Plata, mostrando una dinámica compleja, que presenta fluctuaciones de marea astronómica para escenarios de caudales medios y bajos en el río Uruguay, y variaciones significativas dadas tanto por el viento sur como por el aumento del caudal fluvial.

En esta sección, el flujo se contrae y recibe un brazo del delta actual del Paraná (Paraná Guazú) sobre margen derecha. La sección tiene un ancho de aproximadamente 2.100 metros, y profundidades que alcanzan los 20 m. En la Figura 9.8 se observa un ejemplo de un relevamiento realizado para un caudal de 9.637 m³/s.



Figura 9.7.- Ubicación de la sección transversal Nueva Palmira.

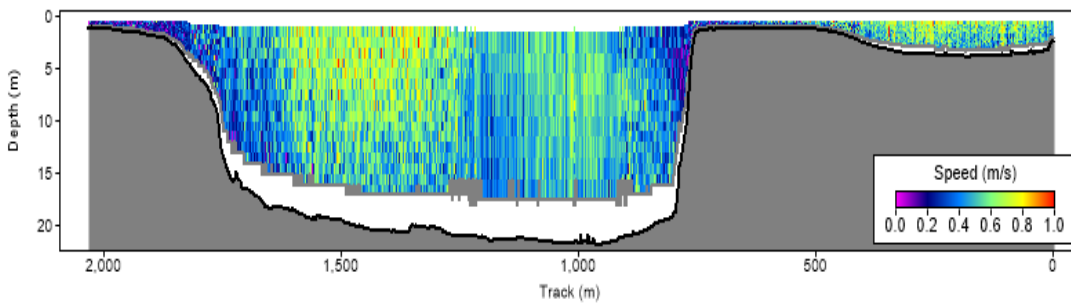


Figura 9.8.- Salida del Software RiverSurveyor® para un aforo realizado en la sección, el día 24/04/2019.
 $Q = 9.637 \text{ m}^3/\text{s}$.

Los efectos de la marea diurna mencionados pueden explicar diferencias de caudales importantes como función de la pendiente del pelo de agua (S_w) registrada entre Nueva Palmira y Fray Bentos. En la Figura 9.9, se muestra la relación observada en 12 mediciones consecutivas de caudal y S_w .

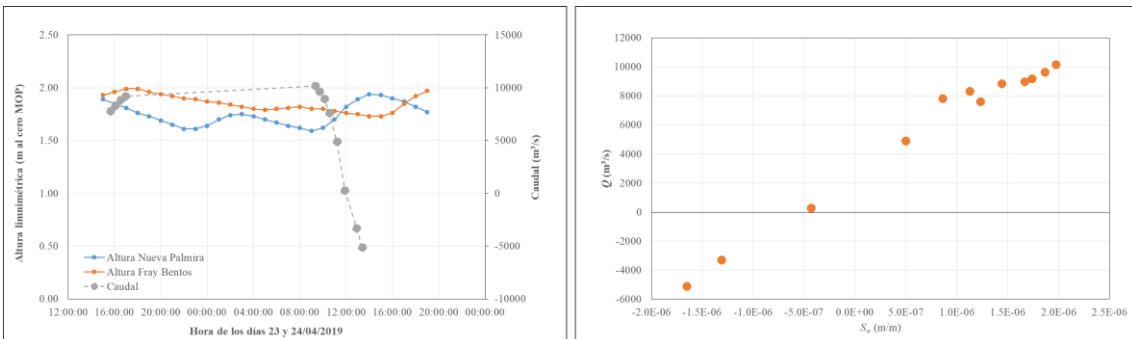


Figura 9.9.- Panel izquierdo: Caudal y alturas en Nueva Palmira y Fray Bentos, medidas el 23 y 24 de abril de 2019.
 Panel derecho: Caudal como función de la pendiente del pelo de agua (S_w) observada.

En la Figura 9.10 se observa que existe un cambio de más de 15.000 m³/s para una variación de 1.5 m en la altura de Nueva Palmira. Esta variación es similar a la observada para los cambios en la pendiente del pelo de agua exhibidos en la Figura 9.10. Por lo tanto, la curva $H-Q$ deja de ser una herramienta útil ya que la altura no es la variable principal que explica la variación de caudal. Es por este motivo principal, que los ábacos mencionados CARU-DNH-INA presentan a Nueva Palmira como variable de entrada.

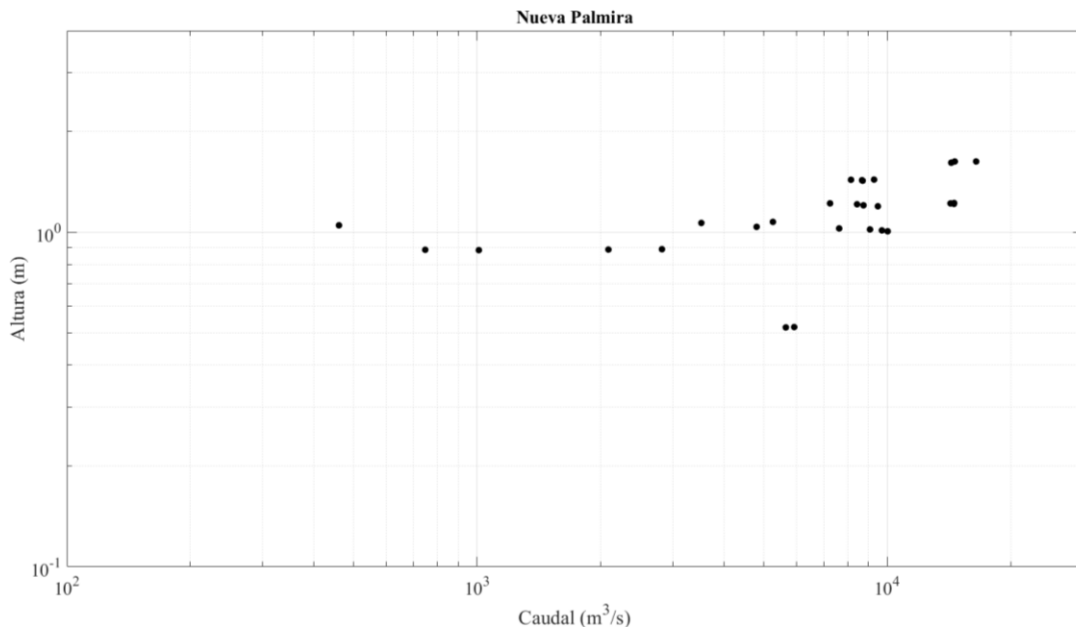


Figura 9.10.- Alturas y caudales medidos en la sección de Nueva Palmira.

La Figura 9.11 exhibe las relaciones entre el caudal líquido y el transporte por el fondo (G_{sf}), así como también del caudal líquido y el transporte de fondo en suspensión (G_{ss}), calculado con diferentes diámetros de la fracción gruesa (d_{50-2}), para cada una de las 9 combinaciones con d_{50-1} y M_{s1} .

Respecto del gasto de fondo en suspensión, puede señalarse que d_{50-2} , variado entre 100 y 200 micrones (arena muy fina a fina), explica un orden de magnitud en el valor de G_{ss} , mientras que los cambios simulados de d_{50-1} y M_{s1} explican menores variaciones dentro del mismo orden de magnitud. Independientemente de esta conclusión, no puede observarse una tendencia clara del caudal sólido de fondo en suspensión respecto del caudal líquido. Las respuestas obtenidas para distintos caudales fueron disímiles, lo cual es otra muestra de la gran complejidad de la sección producto de su interacción con el delta actual del río Paraná y el Río de la Plata.

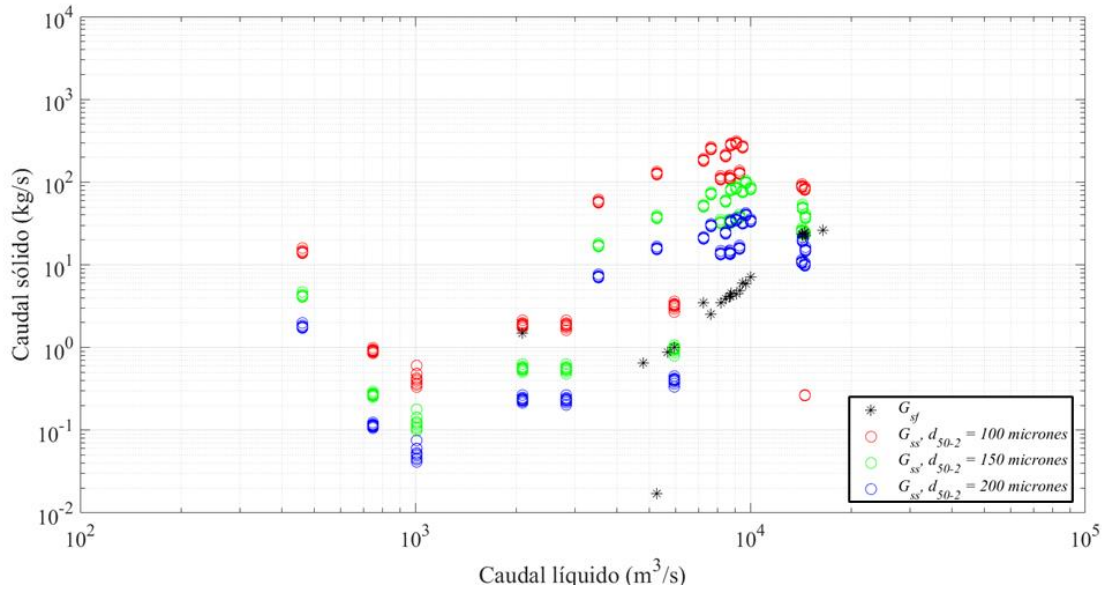


Figura 9.11.- Pares de datos de caudal líquido como función del caudal sólido – Sección Nueva Palmira.

En cuanto al transporte de sedimentos por el fondo, o carga de fondo (G_{sf}), el resultado de este ajuste se muestra en la Figura 9.12. Se observa allí una relación directa muy clara con el caudal líquido para valores mayores a 5.500 m³/s. Para valores menores, el cálculo resulta en un valor de transporte que puede asumirse nulo teniendo en cuenta que $G_{sf} \approx 1$ kg/s para dicho caudal líquido, lo que representa una concentración ínfima en la transversal.

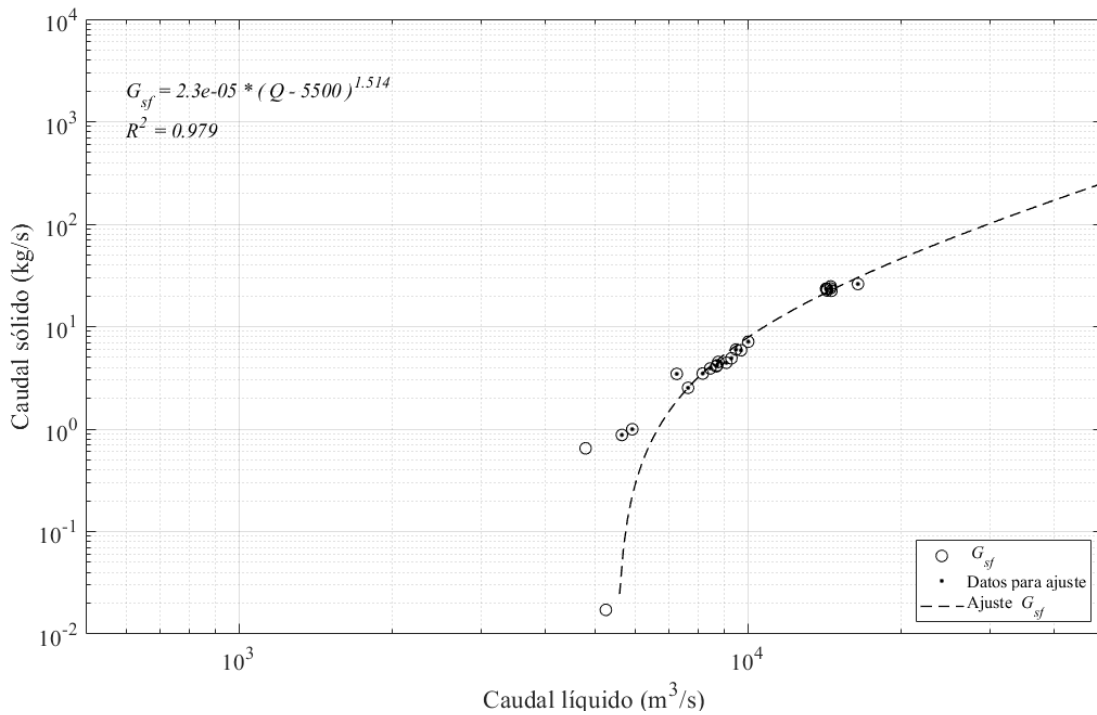


Figura 9.12.- Curva de caudal líquido vs. caudal sólido.

En resumen, para esta sección se logró establecer una relación biunívoca entre el gasto líquido y el gasto sólido de fondo. Esta función se resume en [9.7], que presentó un coeficiente de determinación en el ajuste por mínimos cuadrados de 0.98.

$$G_{sf} = 2,3 \times 10^{-05} (Q - 5500)^{1.514} \text{ [kg/s]} \quad \forall Q > 5.500 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$G_{sf} = 0 \text{ kg/s} \quad \forall Q \leq 5.500 \text{ m}^3/\text{s}$$
[9.7]

9.3.2.2. *Punta El Arenal, La Concordia, Punta Caballos y Punta Las Rosas*

Estas secciones se ubican en el tramo comprendido entre Nueva Palmira y Fray Bentos, y pertenecen al Programa de Monitoreo Integral del Río Uruguay (MIRU). Se ubican en los kilómetros 25, 40, 75 y 85 respectivamente. Tienen un ancho de entre 4 y 12 km. El sector occidental de las mismas es poco profundo, y actúa como zona de almacenamiento hidráulico, conectado con una depresión heredada (Iriondo & Kröhling, 2008) de entre 15 y 20 metros de profundidad, y 1000 m de ancho que se ubica sobre la margen izquierda preponderantemente.

Al igual que la sección Nueva Palmira, el caudal sólido y líquido en estas secciones presenta una fuerte dependencia de la pendiente del pelo de agua en el tramo, condicionada por el nivel del río de la Plata.

Debido a que se contó con pocas mediciones relevadas para cada sección, si bien se calculó para cada una de ellas el transporte de sedimentos en sus distintas modalidades, dichos resultados no fueron suficientes para la construcción de las curvas de gasto sólido y líquido.

No obstante, y a efectos de proveer una descripción visual de las secciones, se presenta una medición correcta obtenida para Punta El Arenal, y una para Punta Caballos (Figura 9.13 y Figura 9.14). Allí se evidencia lo mencionado por Iriondo & Kröhling (2008), donde se describe el tramo como "...una amplia depresión heredada, de 85 km de longitud por 5 a 12 km de ancho. Este tramo no se trata de un cauce fluvial propiamente dicho, sino que es una amplia depresión inundada, y por su cañón sumergido corre un canal correspondiente a la cuenca media y alta".

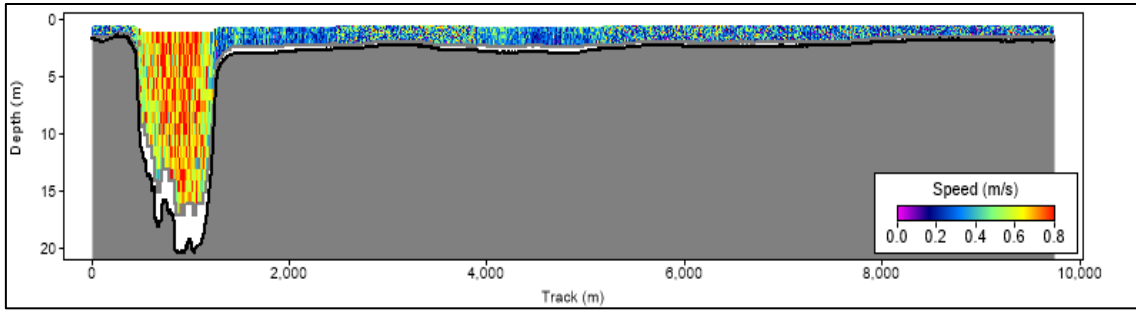


Figura 9.13.- Salida del Software RiverSurveyor® para un aforo realizado en la sección Punta el Arenal, el día 08/11/2017. $Q = 13.711 \text{ m}^3/\text{s}$.

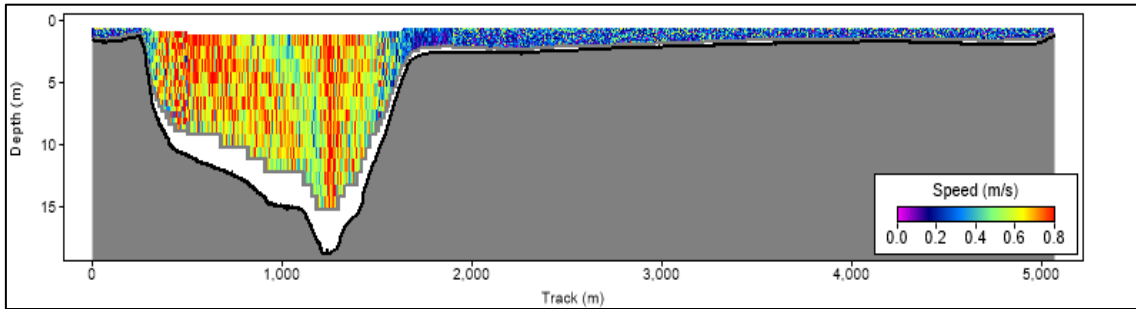


Figura 9.14.- Salida del Software RiverSurveyor® para un aforo realizado en la sección Punta Caballos, el día 08/11/2017. $Q = 10.057 \text{ m}^3/\text{s}$.

9.3.2.3. Fray Bentos

Esta sección se corresponde con la ubicación del Puente Internacional Libertador General San Martín. Se ubica en el km 105 de la vía navegable, tiene un ancho aproximado de 1500 m y una profundidad máxima de 20 m (Figura 9.15 y Figura 9.16).



Figura 9.15.- Ubicación de la sección transversal Fray Bentos.

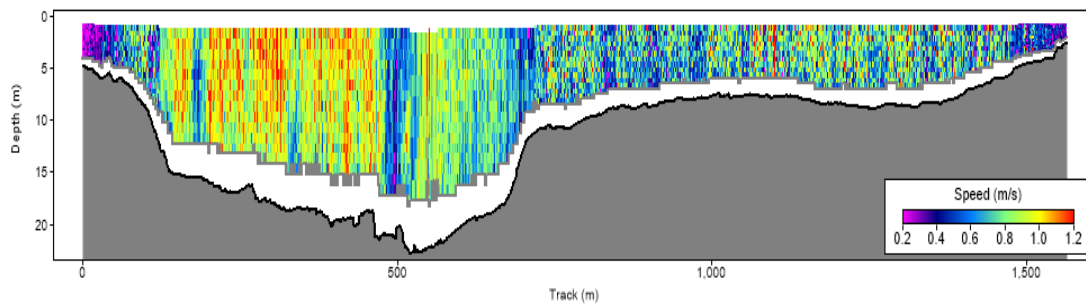


Figura 9.16.- Salida del Software RiverSurveyor® para un aforo realizado en la sección Fray Bentos, el día 15/05/2017. $Q = 13.130 \text{ m}^3/\text{s}$.

En esta sección, los efectos de remanso provocados por la variación de niveles en el Río de la Plata son notables, especialmente cuando los caudales de la represa de Salto Grande están por debajo del módulo. Esto se evidencia en el ábaco generado por el modelo MIKE para la sección (Figura 9.17).

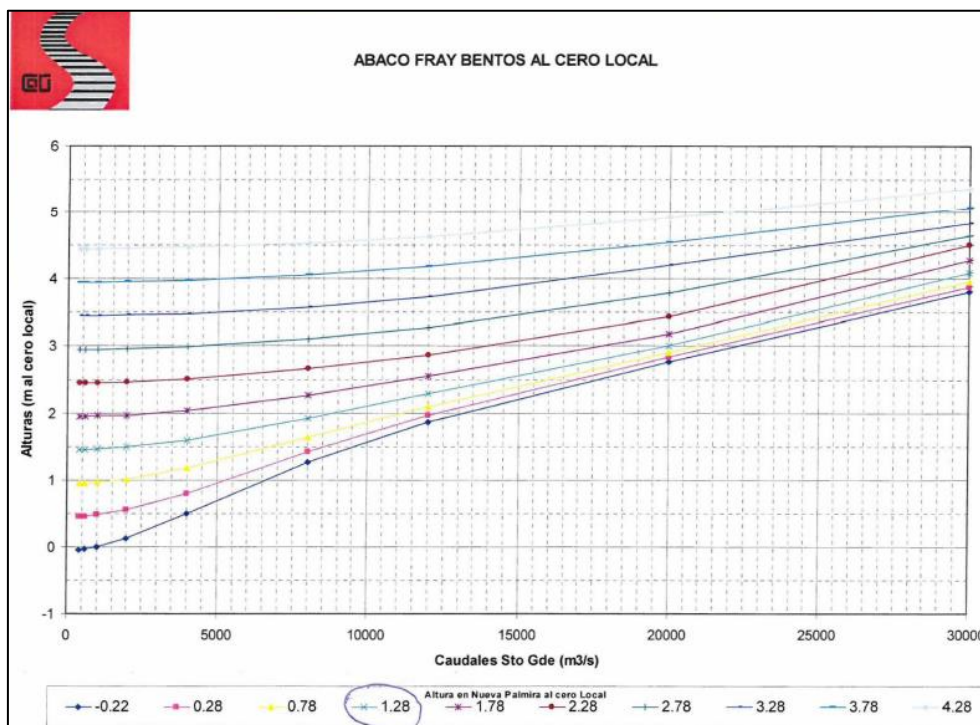


Figura 9.17.- Ábaco CARU – DNH – INA para Fray Bentos.

Debe señalarse que, si bien el ábaco es una herramienta útil para la comprensión de la relación altura-caudal, el comportamiento del tramo meridional del río es complejo y presenta fuertes características no estacionarias.

Los pares $H-Q$ graficados en la Figura 9.18, en conjunto con el ábaco, confirman que la altura en Fray Bentos no es variable suficiente para explicar el caudal en la sección.

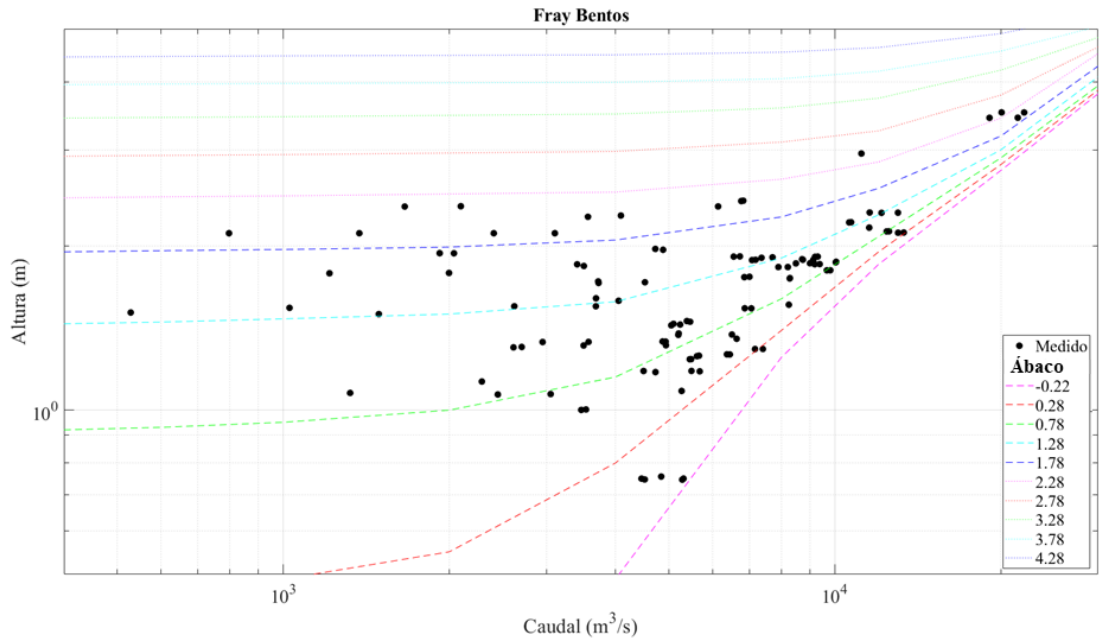


Figura 9.18.- Pares $H-Q$ junto con el ábaco de la Figura 9.17.

En contraposición a lo señalado para la relación $H-Q$, los pares $Q-G_{sf}$ presentan buena correspondencia con una relación del tipo de la ecuación [9.2], principalmente para caudales mayores al módulo del río ($5.500 \text{ m}^3/\text{s}$). Para dicho caudal, G_{sf} tiene valores por debajo de 1 kg/s . Por esto, la Figura 9.19 muestra el ajuste correcto de la expresión allí vertida, para los caudales mayores al módulo, realizando un desplazamiento de la variable independiente. Esta reducción en la dispersión de los datos se debe primariamente a que las velocidades necesarias para movilizar el lecho son más frecuentes para condiciones con caudales altos, que a su vez correlacionan mejor con la altura limnimétrica.

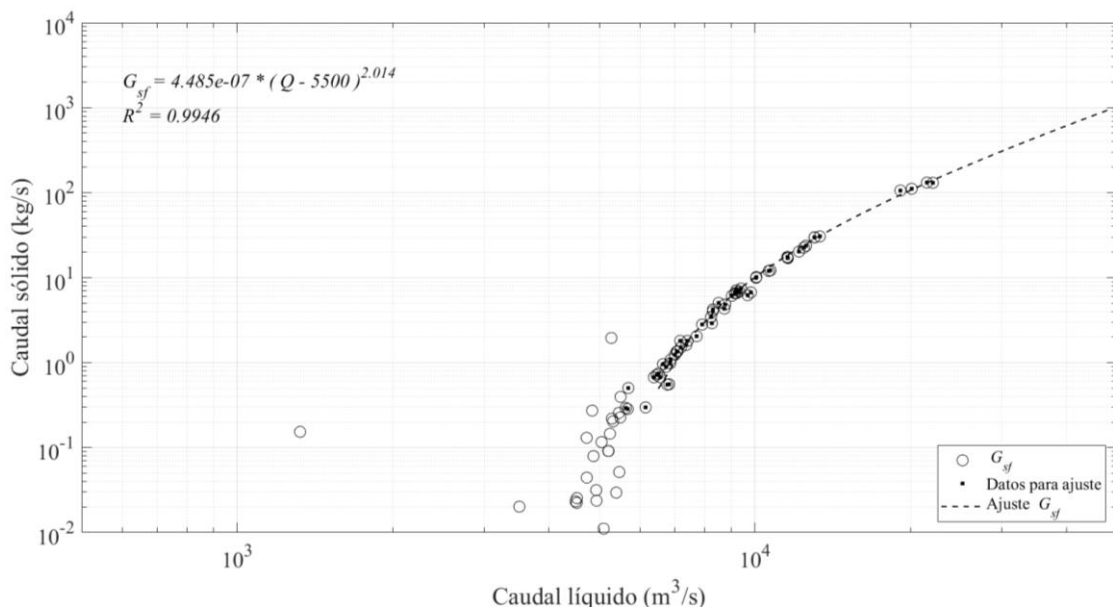


Figura 9.19.- Curva de gasto sólido por el fondo – Sección Fray Bentos.

De esta manera, G_{sf} queda definido según la expresión [9.8]:

$$G_{sf} = 4,485 \times 10^{-7} (Q - 5.500)^{2.0.14} \text{ [kg/s]} \quad \forall Q > 5.500 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$G_{sf} = 0 \text{ kg/s} \quad \forall Q \leq 5.500 \text{ m}^3/\text{s}$$
[9.8]

En el caso de G_{ss} , al igual que para G_{sf} , se observa en la Figura 9.20 una correspondencia entre caudal líquido y sólido a partir del valor de caudal líquido mencionado ($5.500 \text{ m}^3/\text{s}$).

Se observa allí también que las variaciones principales en el transporte en suspensión estimado están dadas por la variación en el diámetro de la fracción gruesa (d_{50-2}).

En esta sección transversal, el diámetro del sedimento en suspensión es más probable que sea el más fino (100 micrones), teniendo en cuenta la constitución del lecho en la sección y hacia aguas abajo.

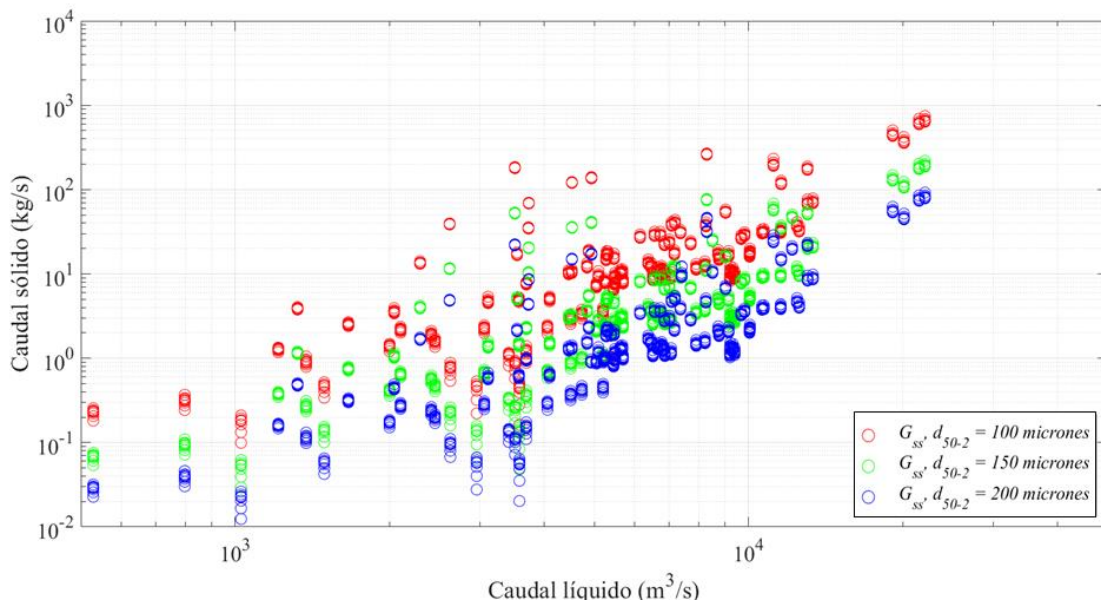


Figura 9.20.- Gasto sólido de fondo en suspensión – Sección Fray Bentos.

Observando el límite de caudal establecido para G_{sf} , y considerando la medición indirecta de G_{ss} con $d_{50-2} = 100$ micrones, $d_{50-1} = 15$ micrones y $M_{s1} = 30 \text{ mg/L}$, se construyó la Figura 9.21, y se ajustó la expresión teórica a los datos consignados. Esta expresión logró un ajuste satisfactorio para todos los datos graficados. Se observa en la gráfica que valores de caudal menores a $5.500 \text{ m}^3/\text{s}$ presentan dispersiones de hasta más de 3 órdenes de magnitud. Esto puede deberse a cambios significativos en el diámetro del sedimento transportado para estas instancias hidrológicas. También para este caudal, se observa una concentración de 10 kg/s , lo cual implica una concentración promedio de 1.8 mg/L . Lo cual, en campo resulta complejo de medir con los medios tradicionales, incluso con

equipos sofisticados. En consecuencia, se está en los límites de incertidumbre de la metodología.

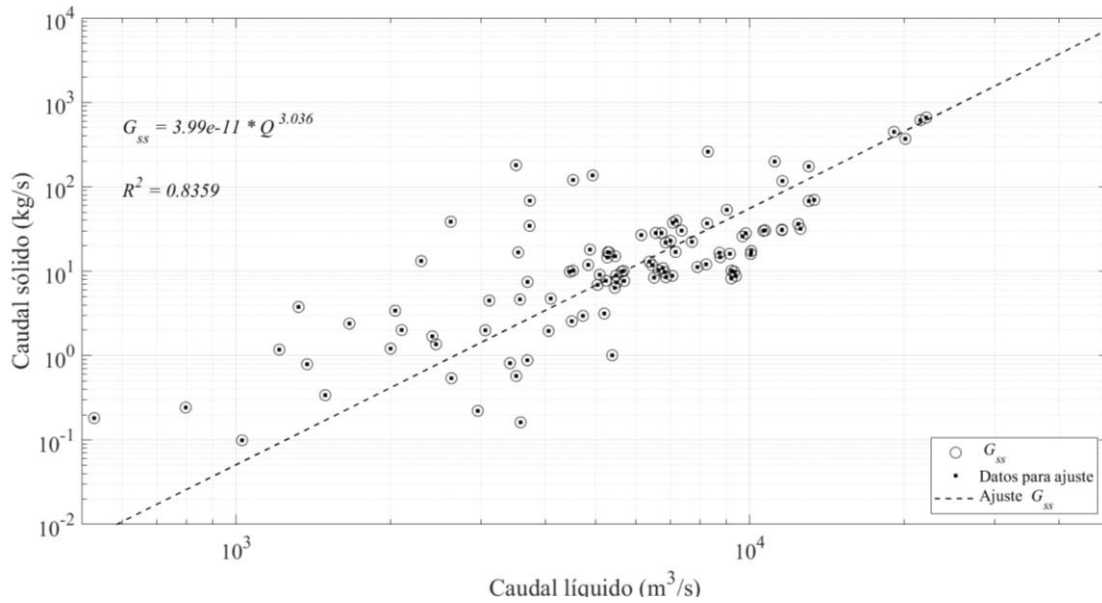


Figura 9.21.- Curva de gasto sólido de fondo en suspensión – Sección Fray Bentos.

De la Figura 9.22, para los valores de caudal líquido superiores al módulo del río, se puede observar que G_{sf} es entre un 10 y un 15% de G_{ss} . Este valor se encuentra en el rango esperable considerando los resultados presentados en diferentes sistemas fluviales como ser el Paraná (Alarcón, et al., 2003; López Weibel, 2023), y el río Salado (Santa Fe) (Szupiany, et al., 2005).

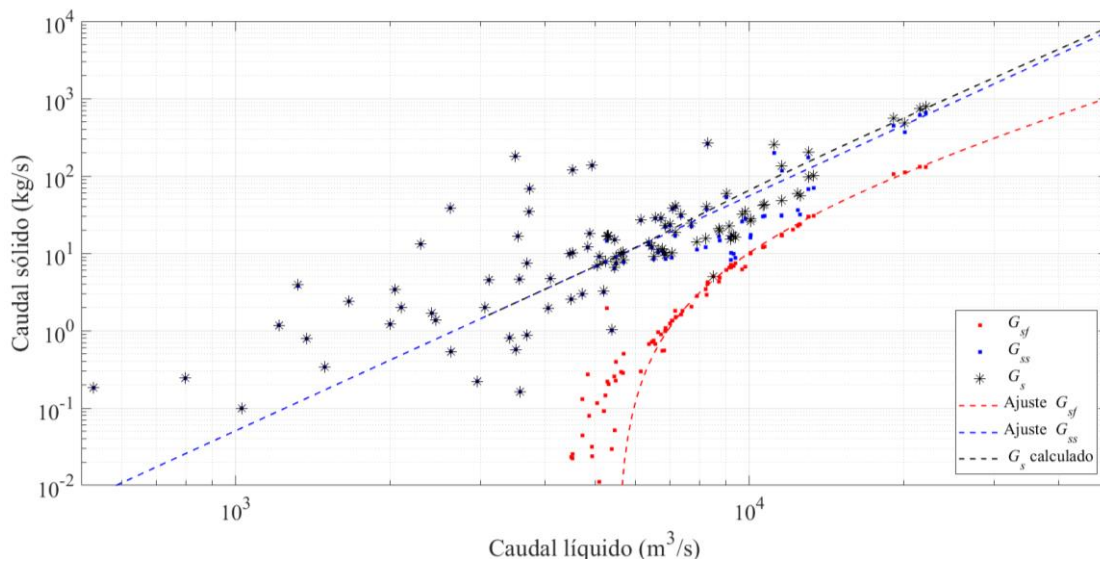


Figura 9.22.- Gasto sólido de fondo – Sección Fray Bentos.

Por otra parte, podría suponerse que, debido a los rápidos cambios en la condición de borde aguas abajo, el transporte en suspensión podría adaptarse más lentamente que el

transporte de fondo en situaciones de caudales bajos. Es decir, las partículas en suspensión podrían permanecer en la columna de agua aun cuando haya disminuido la tensión sobre el lecho, generándose así un desbalance entre los procesos de sedimentación y de resuspensión.

Pese a las limitantes metodológicas, el resultado obtenido constituye en sí mismo una primera aproximación respecto de los mecanismos dominantes de transporte en esta sección.

Por último, para esta sección, y a modo de síntesis, se presenta el transporte total de fondo (G_s) como la suma aritmética de las componentes del transporte de sedimentos de fondo en suspensión y por fondo. La expresión del transporte de fondo (G_s) para la sección Fray Bentos se escribe de la siguiente manera:

$$G_s = \underbrace{4,485 \cdot 10^{-7} (Q - 5500)^{2,014}}_{G_{sf}} + \underbrace{3,99 \cdot 10^{-11} Q^{3,036}}_{G_{ss}} \text{ [kg/s]} \quad \forall Q > 5.500 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$G_s = \underbrace{0}_{G_{sf}} + \underbrace{3,99 \cdot 10^{-11} Q^{3,036}}_{G_{ss}} \text{ [kg/s]} \quad \forall Q > 3.000 \text{ m}^3/\text{s} \wedge Q \leq 5.500 \text{ m}^3/\text{s} \quad [9.9]$$

$$G_s = 0 \text{ [kg/s]} \quad \forall Q \leq 3.000 \text{ m}^3/\text{s}$$

9.3.2.4. *Nuevo Berlín*

Esta sección se ubica en el kilómetro 140 de la vía navegable, próxima a la confluencia aguas abajo de la Isla Rica, y aguas arriba de los Esteros de Farrapos (Figura 9.23). Este último sitio es un área Natural Protegida donde es particularmente observable el cambio en la morfología en planta del río. Es destacable que, en un tramo de 40 km, la morfología pasa de tener un cañón sumergido en una amplia planicie inundada (Iriondo & Kröhling, 2008) hacia discurrir en un patrón en planta anastomosado - en los términos planteados por Kleinhans & van den Berg (2011).

Las mediciones de caudales con ADCP (Tabla 9.1) se realizaron en los dos brazos que rodean la Isla denominados Brazo Izquierdo, correspondiente al cauce principal, y Brazo Derecho, correspondiente al que circula próximo a la margen argentina (Figura 9.23). Tanto el caudal líquido como el sólido para la sección se obtuvieron por la suma aritmética de los valores correspondientes a cada brazo, para cada relevamiento. En la Figura 9.24 y Figura 9.25 puede verse un ejemplo de las dimensiones de ambos brazos de la sección, para un caudal total de 9.307 m³/s.



Figura 9.23.- Ubicación de la sección transversal Nuevo Berlín.

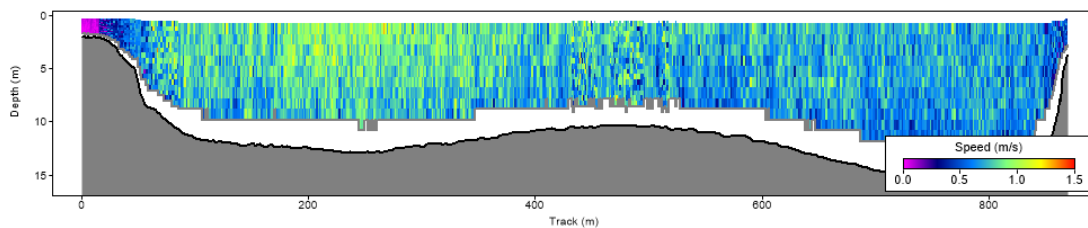


Figura 9.24.- Salida del Software RiverSurveyor® para un aforo realizado en la sección Nuevo Berlín – Brazo Izquierdo, el día 03/10/2018. $Q = 6.754 \text{ m}^3/\text{s}$.

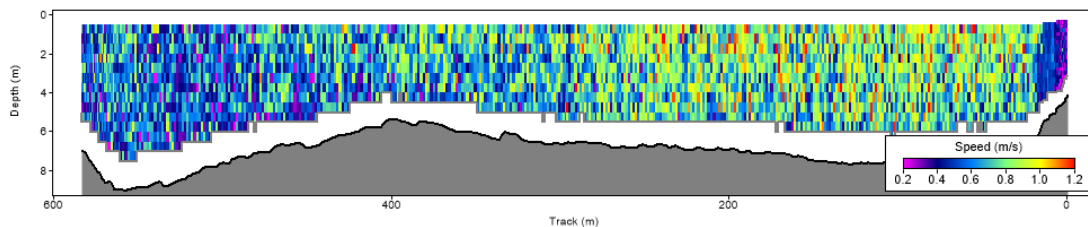


Figura 9.25.- Salida del Software RiverSurveyor® para un aforo realizado en la sección Nuevo Berlín – Brazo Derecho, el día 03/10/2018. $Q = 2.553 \text{ m}^3/\text{s}$.

Debido al cambio señalado en la morfología en planta, entre otros factores, a partir de esta progresiva y hacia aguas arriba comienza a mejorar la correspondencia entre altura y caudal. Para obtener la altura local correspondiente a cada caudal medido, se interpolaron linealmente los valores de altura entre Concepción del Uruguay y Fray Bentos.

En la Figura 9.26 se presenta la curva de gasto líquido obtenida, con un ajuste aceptable medido por el coeficiente de determinación (R^2), teniendo en cuenta la variabilidad del caudal respecto de la altura ya exhibida para las secciones aguas abajo.

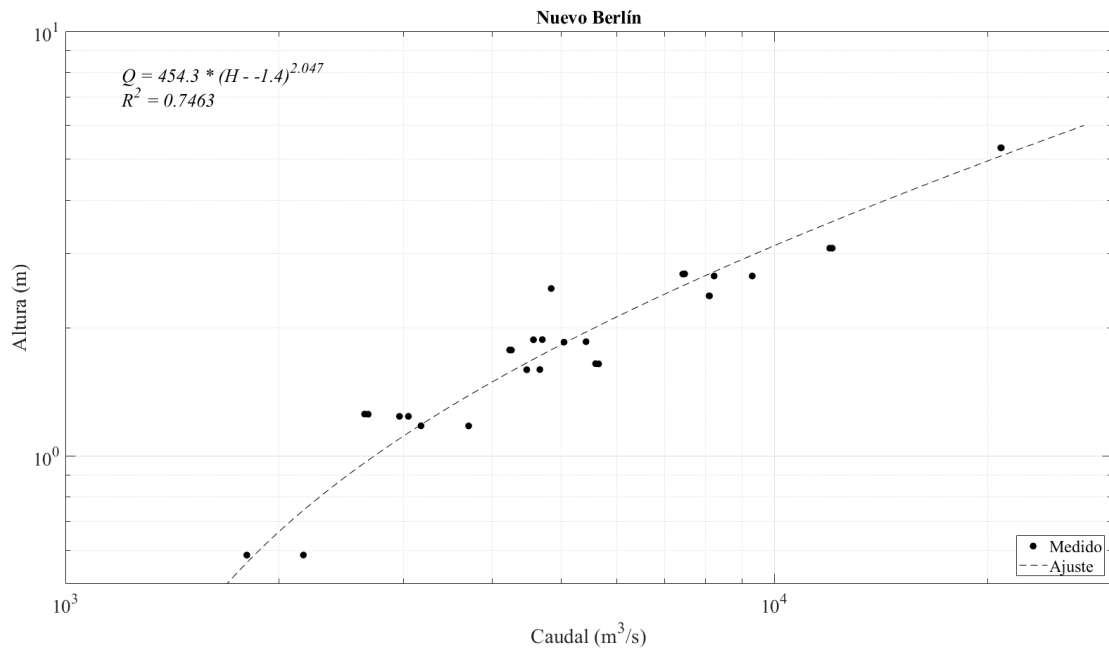


Figura 9.26.- Curva de gasto líquido – Sección Nuevo Berlín.

La curva de gasto sólido transportado por el fondo (Figura 9.27) presenta un buen ajuste considerando caudales mayores a 4.000 m³/s. Se entiende que este caudal obra como límite inferior del transporte de fondo.

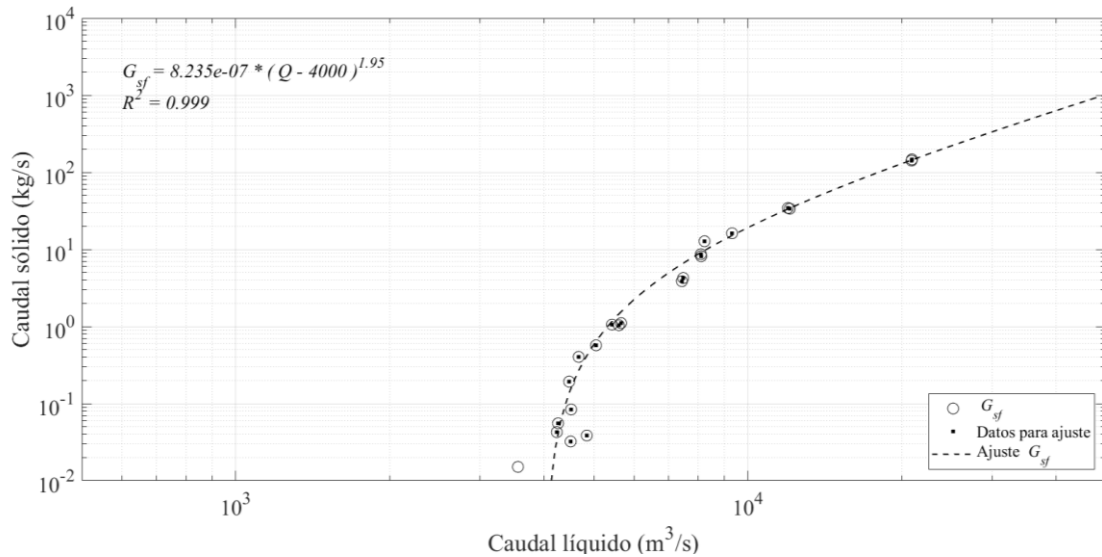


Figura 9.27.- Curva de gasto sólido por el fondo – Sección Nuevo Berlín.

Respecto del transporte de fondo en suspensión, en la Figura 9.28 se grafican los pares de datos $Q-G_{ss}$ para cada combinación de parámetros con los cuales se aplicó el ASETSM9. Allí puede verse nuevamente que el efecto preponderante de los parámetros es el diámetro de la fracción gruesa (d_{50-2}).

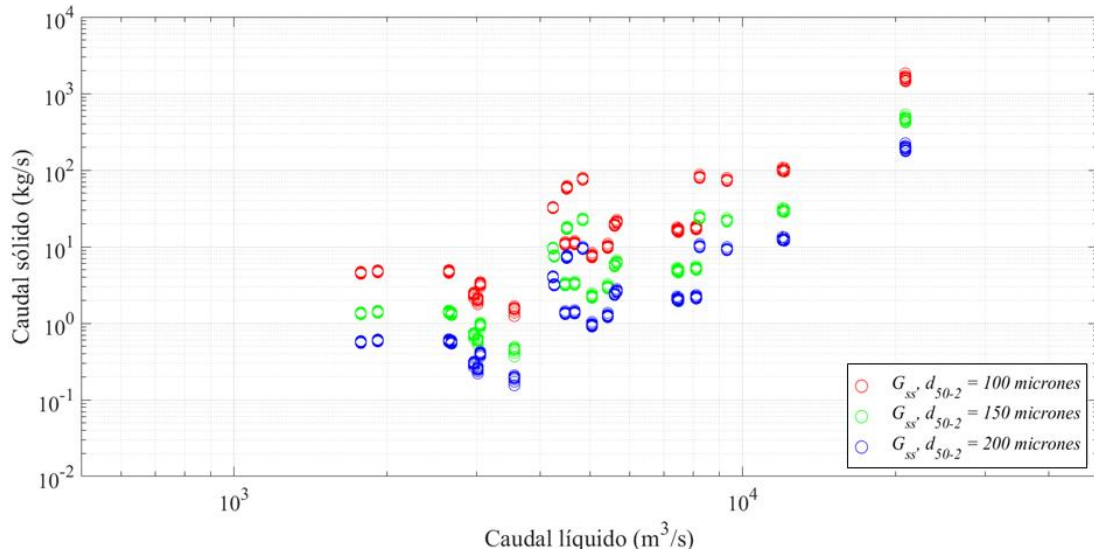


Figura 9.28.- Gasto sólido de fondo en suspensión– Sección Nuevo Berlín.

Si se observa la composición granulométrica del lecho, y los valores en suspensión medidos para la localidad de Colón (Figura 9.29), puede inferirse que las partículas que se transportan en suspensión comparten características con las observadas hacia aguas arriba. Por este motivo, y para esta sección, se entiende pertinente utilizar el diámetro $d_{50-2} = 150$ micrones, mientras que $d_{50-1} = 15$ micrones y $M_{s1} = 30$ mg/L se mantienen para evitar otro factor de diferenciación en las curvas. De esta manera se construyó la Figura 9.30, donde se exhibe una buena correspondencia del ajuste. En la Figura 9.31 se presentan los datos, los ajustes realizados, y el transporte total calculado por suma de las componentes [9.10]. Allí también se observa una relación G_{sf}/G_{ss} , similar a la computada para Fray Bentos, con las mismas consideraciones.

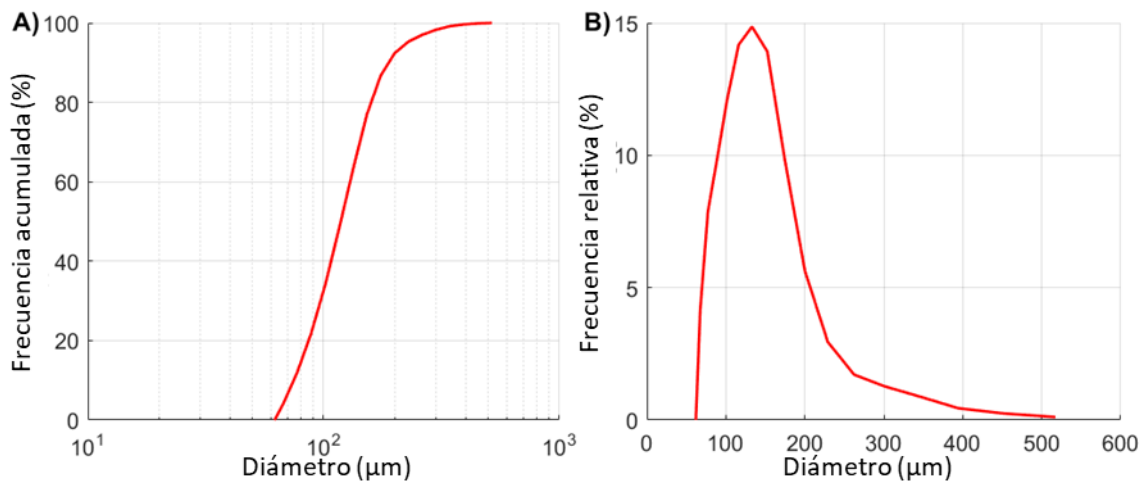


Figura 9.29.- Distribución granulométrica obtenida para las arenas presentes en suspensión en R3 – zona Colón. Modificado de López Weibel (2023).

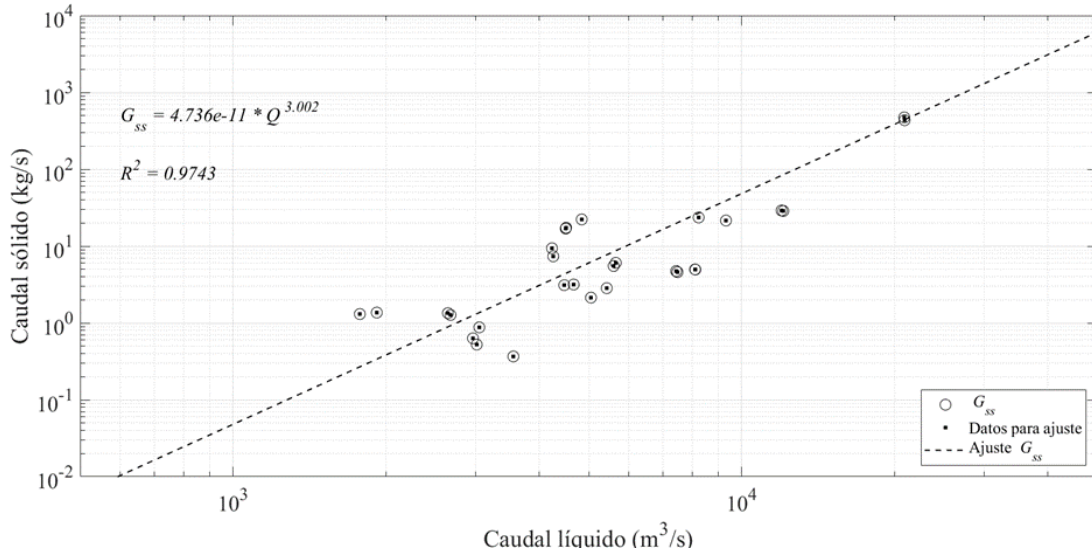


Figura 9.30.- Curva de gasto sólido de fondo en suspensión– Sección Nuevo Berlín.

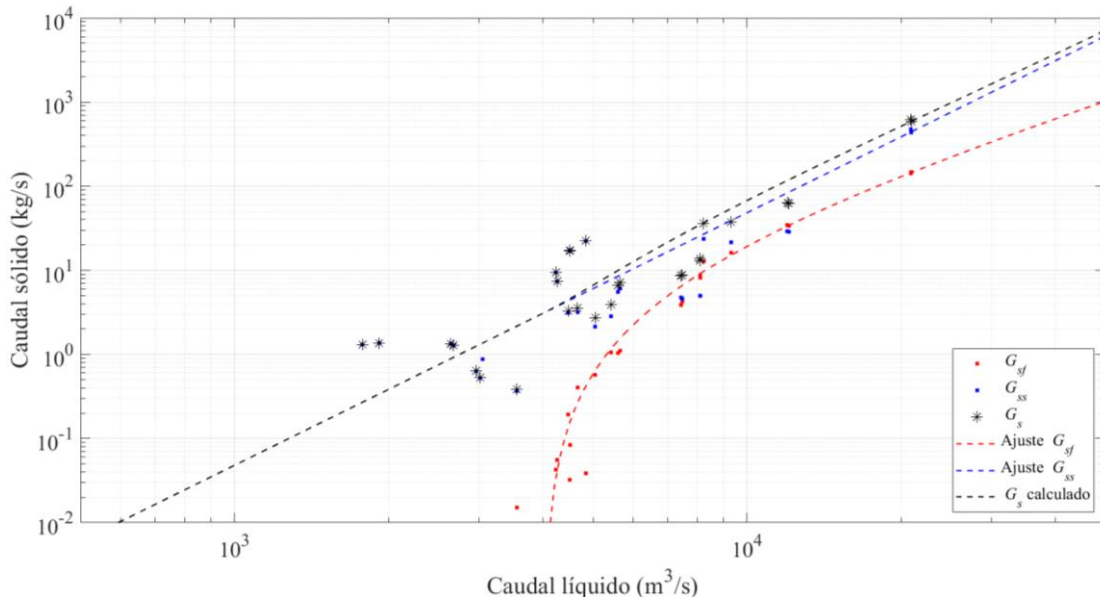


Figura 9.31.- Curva de gasto sólido de fondo– Sección Nuevo Berlín.

$$G_s = \underbrace{8,234 \cdot 10^{-7} (Q - 4000)^{1,950}}_{G_{sf}} + \underbrace{4,736 \cdot 10^{-11} Q^{3,002}}_{G_{ss}} \quad [\text{kg/s}] \quad \forall Q > 4.000 \text{ m}^3/\text{s} \quad [9.10]$$

$$G_s = \underbrace{0}_{G_{sf}} + \underbrace{4,736 \cdot 10^{-11} Q^{3,002}}_{G_{ss}} \quad [\text{kg/s}] \quad \forall Q \leq 4.000 \text{ m}^3/\text{s}$$

9.3.2.5. Concepción del Uruguay

Como ya se mencionó, esta sección corresponde a la Estación 3058 de la Red Hidrológica Nacional, relevada por la empresa EVARSA como contratista de la Subsecretaría de Infraestructura y Políticas Hídricas (Subsecretaría de Infraestructura y Política Hídrica de

Argentina, 2022). Se entiende, por la posición informada, que la sección corresponde con el kilómetro 187 de la vía navegable.

Esta sección cuenta con datos relevados de altura (H), caudal líquido (Q), caudal sólido fino (G_w) y caudal sólido grueso (G_s) para 209 campañas desde 1993. Este volumen de información y sistematicidad en el tiempo hacen que la estación sea muy valiosa. Pese a ello, debe señalarse que se carece de datos monográficos que expliquen detalles metodológicos de las mediciones, tales como los equipos utilizados, ubicación exacta y desagregación espacial de lo relevado.

En cuanto a la metodología, la principal duda radica en la medición de G_s . En una consulta informal realizada a los empleados de EVARSA que realizan los relevamientos, estos indicaron que la variable se mide con un muestreador US-P61, pero sin detallar metodologías de análisis en laboratorio para la determinación de concentraciones. Este muestreador, como ya se mencionó, se utiliza para medir sedimentos en suspensión, y consecuentemente G_{ss} .

Además de los valores provistos por la Subsecretaría de Infraestructura y Políticas Hídricas, en esta estación también se cuenta con información del ábaco correspondiente al modelo MIKE, donde las relaciones entre altura y caudal tienden a hacerse biunívocas para caudales muy altos (Figura 9.32).

En complementariedad con el ábaco presentado, la gráfica de los pares $H-Q$ en la Figura 9.33 permite verificar la existencia de una relación biunívoca para caudales mayores al módulo ($5.500 \text{ m}^3/\text{s}$). Allí también se observa un buen ajuste de la expresión potencial [9.1] para valores mayores al mencionado, y la dispersión causada por efectos de remanso para los caudales menores.

En cuanto al gasto sólido de fondo en suspensión, asumiendo que los datos corresponden a sedimento grueso en suspensión (G_{ss}), la curva ajustada se muestra en la Figura 9.34. Cabe señalar que, si bien el ajuste tiene diferencias en sus coeficientes respecto de las secciones ya presentadas, el orden de magnitud de la variable, en este caso medida, se mantiene respecto a las demás secciones transversales estimadas a partir de mediciones indirectas. Esto es un indicador positivo respecto de la metodología basada en el uso del ADCP Sontek M9 (Capítulo 6).

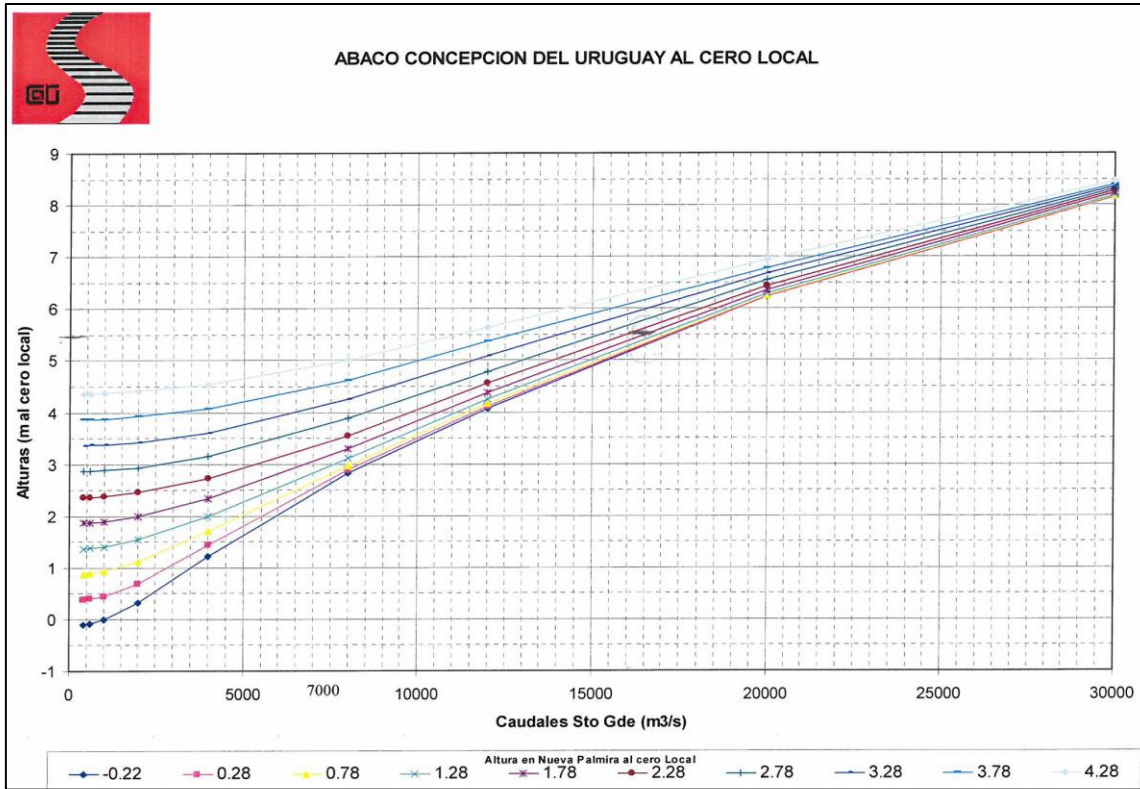


Figura 9.32.- Ábaco CARU – DNH – INA para Concepción del Uruguay.

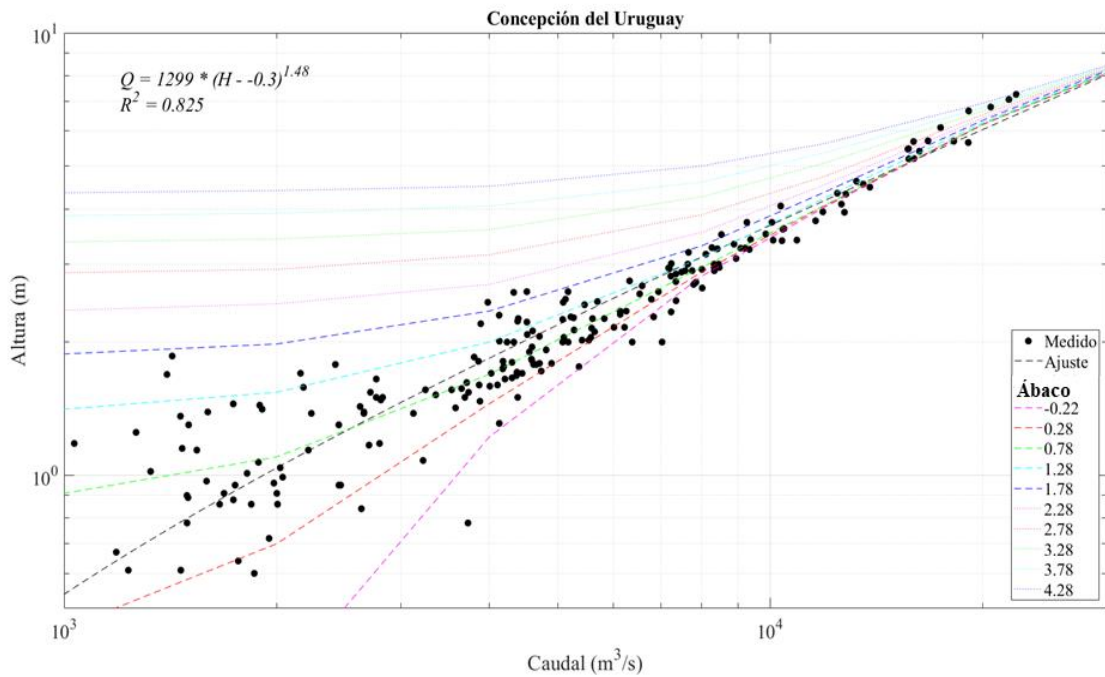


Figura 9.33.- Curva de gasto líquido – Sección Concepción del Uruguay.

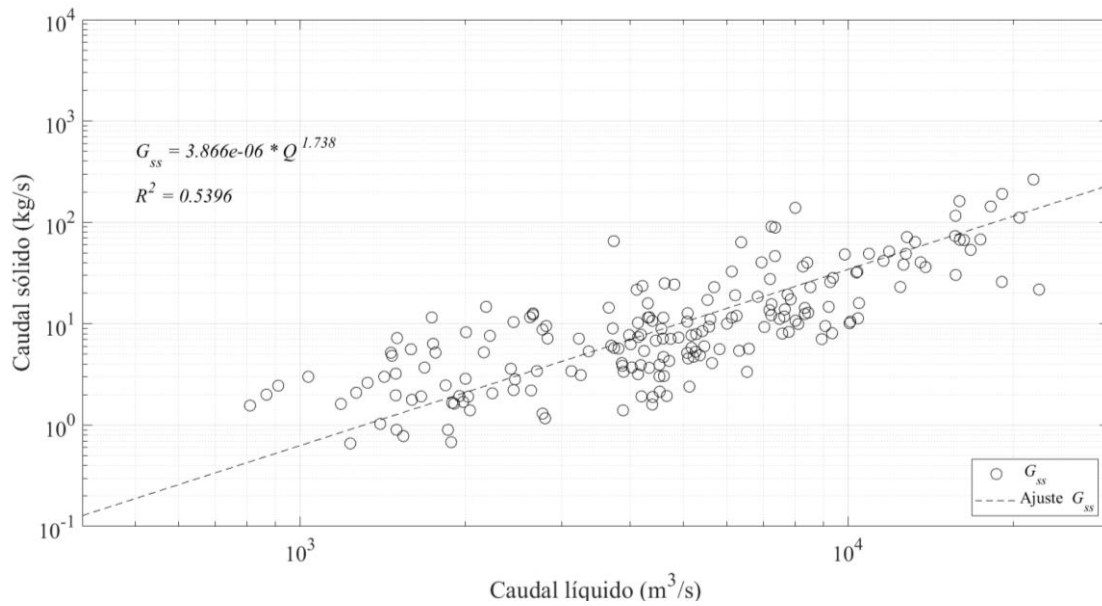


Figura 9.34.- Curva de gasto sólido de fondo en suspensión – Sección Concepción del Uruguay.

9.3.2.6. Casablanca

Sobre el kilómetro 192 de la vía navegable se encuentra esta sección transversal, que se releva cada dos meses en el contexto del Monitoreo Integral del Río Uruguay (Figura 9.35). Allí, el río tiene 1000 m de ancho y 14 m de profundidad máxima (Figura 9.36).



Figura 9.35.- Ubicación de la sección transversal Casablanca.

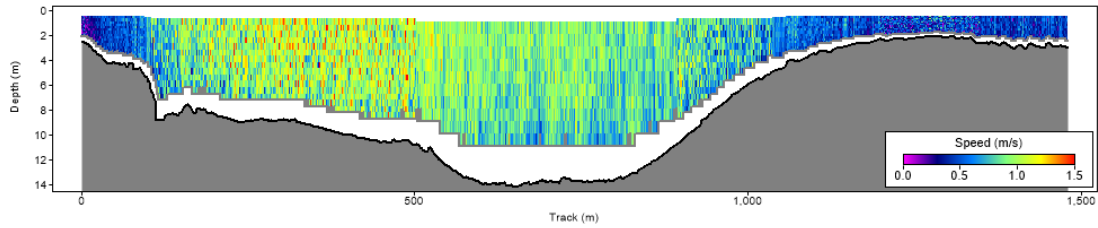


Figura 9.36.- Salida del Software RiverSurveyor® para un aforo realizado en la sección Casablanca, el día 03/10/2018. $Q = 8.226 \text{ m}^3/\text{s}$.

En la Figura 9.37 se muestra la curva de gasto líquido ajustada. Esta sección, ubicada aguas arriba de Concepción del Uruguay, presenta una dinámica fluvial más acentuada, y los efectos de remanso del Río de la Plata son menos relevantes.

Dentro de los relevamientos disponibles para esta sección, se contó con un aforo cuyo resultado fue negativo, debido al efecto del viento del Sur preponderante durante muchas horas en la sección. Al estar este valor por fuera de la regla ajustada para la relación $H-Q$, se decidió descartarlo y mencionar esta salvedad metodológica.

Respecto del gasto sólido por el fondo, G_{sf} , se presenta la Figura 9.38. Se observa allí un buen ajuste de éste, respecto del caudal líquido, con un valor límite de movilidad de sedimentos del orden de los $3.500 \text{ m}^3/\text{s}$.

La Figura 9.39 muestra los pares de sedimentos en suspensión (G_{ss}) calculados para las distintas configuraciones de diámetros y concentraciones. Esto se muestra, a modo comparativo, con los datos medidos correspondientes a la sección Concepción del Uruguay.

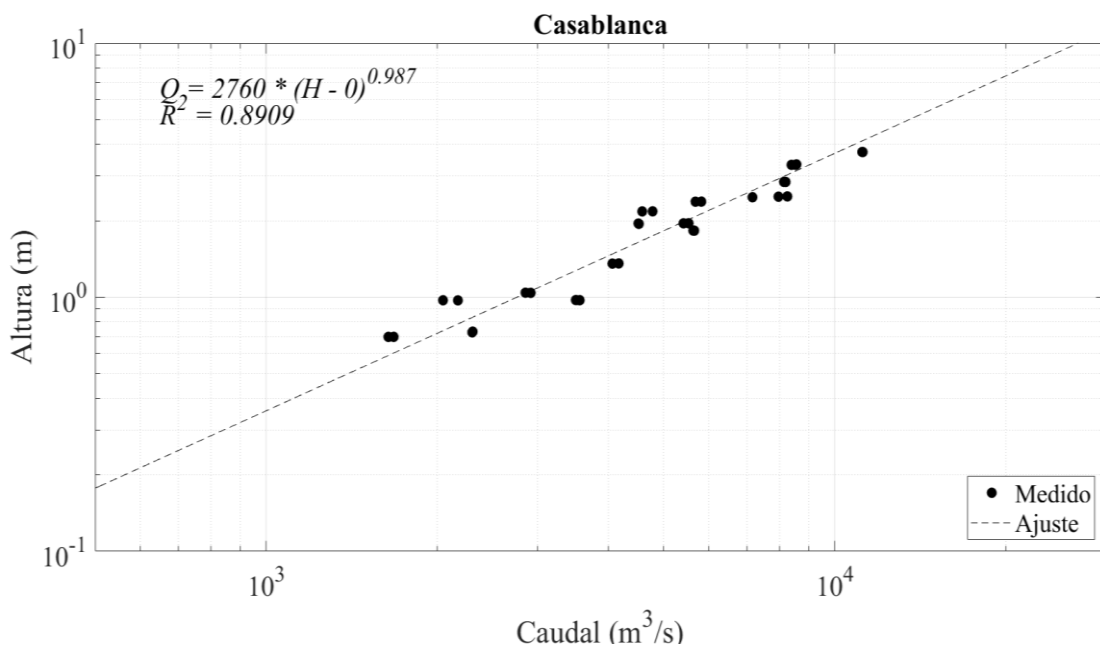


Figura 9.37.- Curva de gasto líquido – Sección Casablanca.

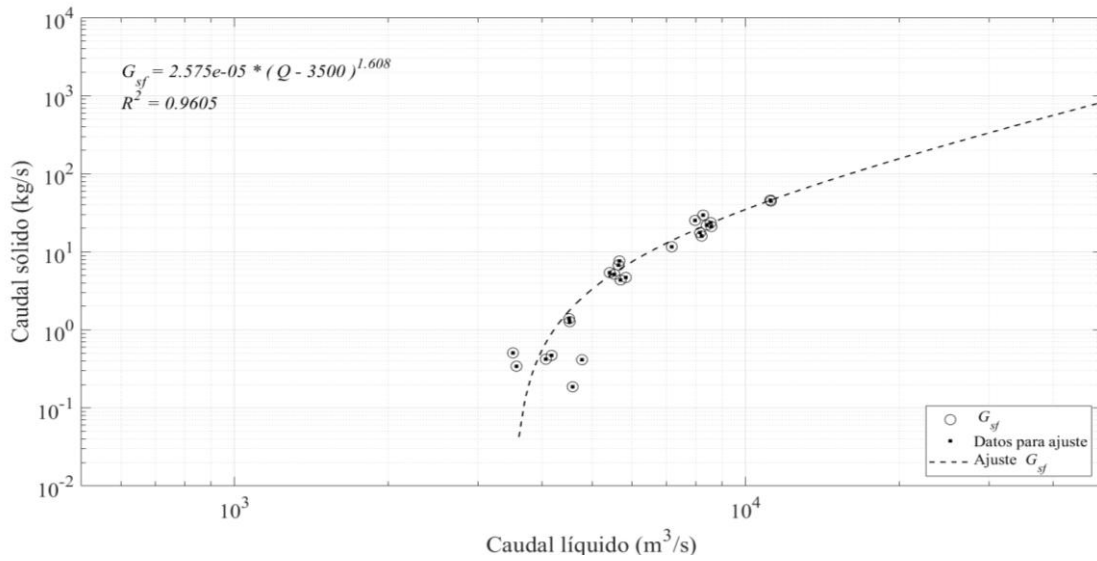


Figura 9.38.- Curva de gasto sólido por el fondo – Sección Casablanca.

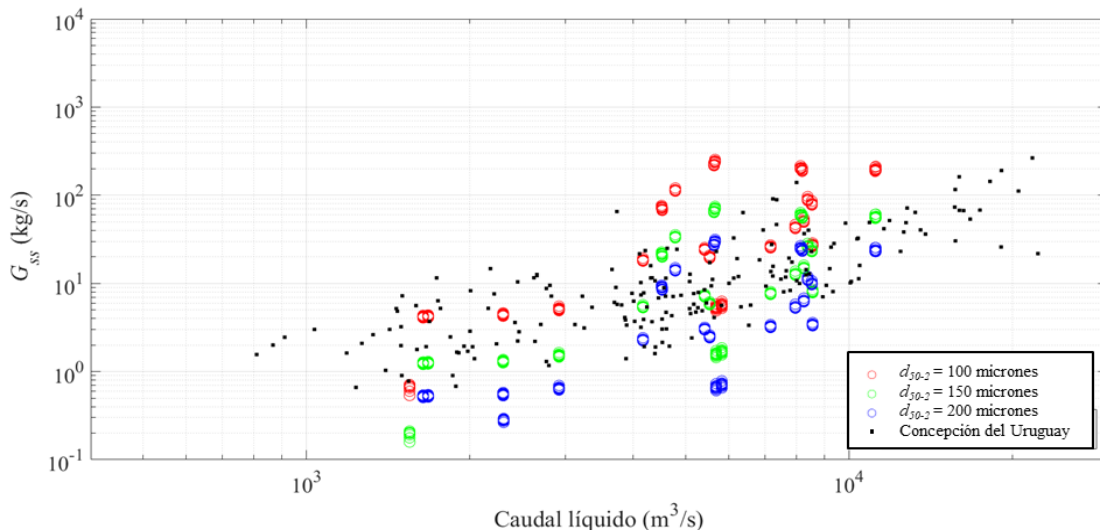


Figura 9.39.- Gasto sólido de fondo en suspensión – Sección Casablanca.

Se observa que los valores de G_{ss} calculados para $d_{50-2}=150$ micrones son los que mejor se ajustan al universo de valores observados para Concepción del Uruguay.

Sin embargo, en los datos calculados aparece un salto cuantitativo para caudales menores a $5.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Esto podría explicarse por dos factores: la menor capacidad del flujo para mantener partículas en suspensión, o una posible dependencia directa entre el diámetro de partículas suspendidas (d_{50-2}) y el caudal, aspecto no representado en los cálculos de concentración realizados con ASETSM9.

Existen así varios caminos para mejorar la predicción de G_{ss} como función del caudal. En esta instancia, considerando lo observado en la figura precedente y la proximidad a la sección Concepción del Uruguay, se considera adecuado definir G_{ss} en Casablanca como el correspondiente a la curva ajustada de la Figura 9.34.

De esta manera, el transporte total de sedimentos de fondo (G_s) en la sección Casablanca queda definido por la siguiente expresión, expuesta en la Figura 9.40.

$$G_s = \underbrace{2,575 \cdot 10^{-5} (Q - 3500)^{1,608}}_{G_{sf}} + \underbrace{3,866 \cdot 10^{-06} Q^{1,738}}_{G_{ss}} \quad [\text{kg/s}] \quad \forall Q > 3.500 \text{ m}^3/\text{s} \quad [9.11]$$

$$G_s = \underbrace{0}_{G_{sf}} + \underbrace{3,866 \cdot 10^{-06} Q^{1,738}}_{G_{ss}} \quad [\text{kg/s}] \quad \forall Q \leq 3.500 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para finalizar, en la misma Figura 9.40 se observa para caudales altos que tanto G_{sf} como G_{ss} tienen órdenes de magnitud similares. Además de ello también se observa que, para las expresiones teóricas, $G_{sf} > G_{ss}$, lo cual es consistente con lo reportado por López Weibel (2023) para la sección de Colón, en el caso de aguas medias.

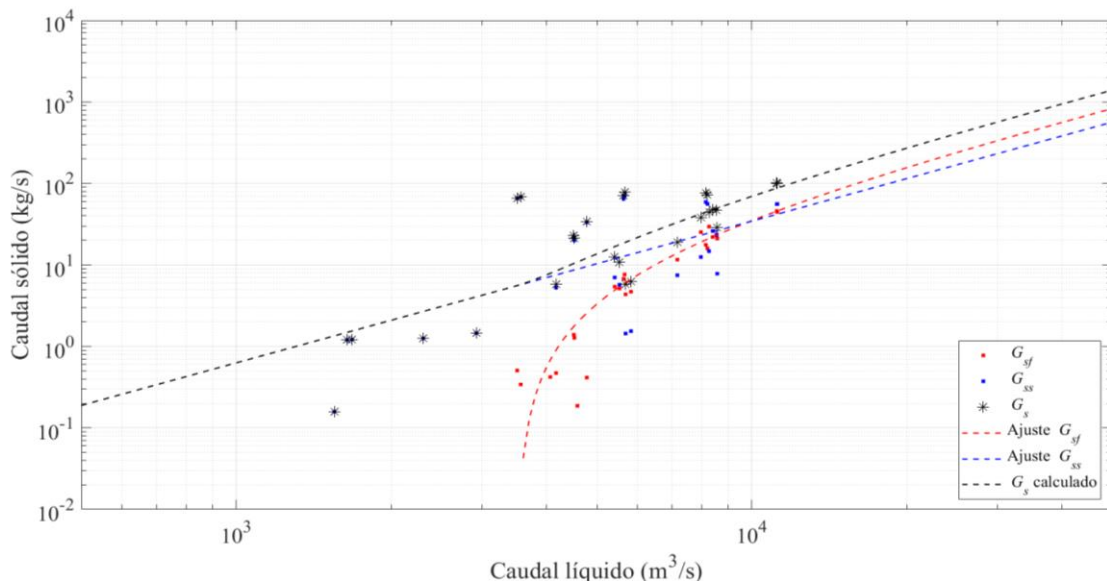


Figura 9.40.- Curva de gasto sólido de fondo – Sección Casablanca.

9.3.2.7. Colón y Puente General Artigas

En este caso, se constituyó una estación de muestreo con dos secciones transversales donde se realizaron los aforos. Ambas secciones se ubican a menos de 10 km de distancia: una de ellas a 500 m aguas arriba del Puente General Artigas (PGA - km 212), y la otra frente a la localidad de Colón (km 220), entre las Islas Queguay y San Francisco (Figura 9.41).

Ambas secciones funcionan en conjunto complementariamente. La sección PGA es más angosta (900 m) y profunda (Figura 9.42), pero para caudales mayores a 10.000 m³/s presenta un canal secundario por donde circula un caudal del orden del 10% de lo observado.



Figura 9.41.- Ubicación de las secciones de medición – Colón y PGA.

Con 1.500 m de ancho, la sección Colón permite relevar la totalidad del caudal circulante, pero tiene poca profundidad en el sector entre islas para caudales bajos. Por esto último se dificulta la navegación para en estos escenarios, y se utiliza para complementar los caudales altos de la sección PGA (Figura 9.43).

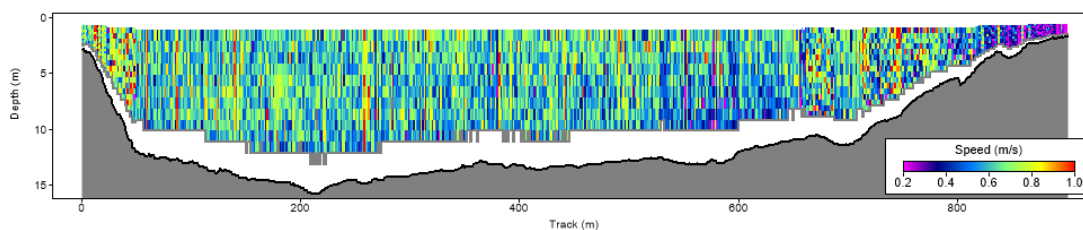


Figura 9.42.- Salida del Software RiverSurveyor® para un aforo realizado en la sección PGA, el día 18/12/2018.
 $Q = 5.481 \text{ m}^3/\text{s}$.

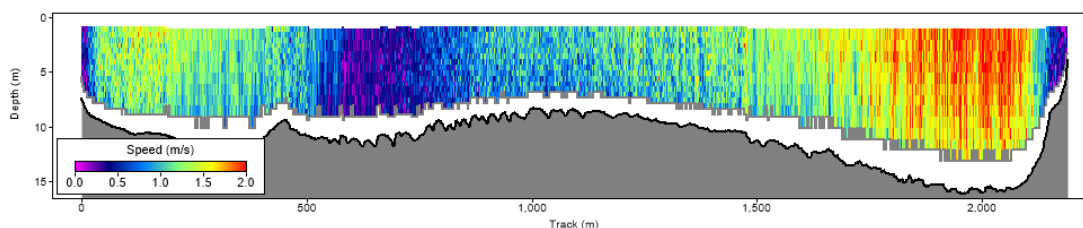


Figura 9.43.- Salida del Software RiverSurveyor® para un aforo realizado en la sección Colón, el día 25/01/2019.
 $Q = 24.979 \text{ m}^3/\text{s}$.

En la Figura 9.44 exhibida a continuación, se muestra el ábaco elaborado con el modelo MIKE, correspondiente a la sección de Colón. Se observa allí una mayor atenuación en el efecto de remanso del Río de la Plata. También se observa respecto de Concepción del Uruguay, un mayor rango de alturas.

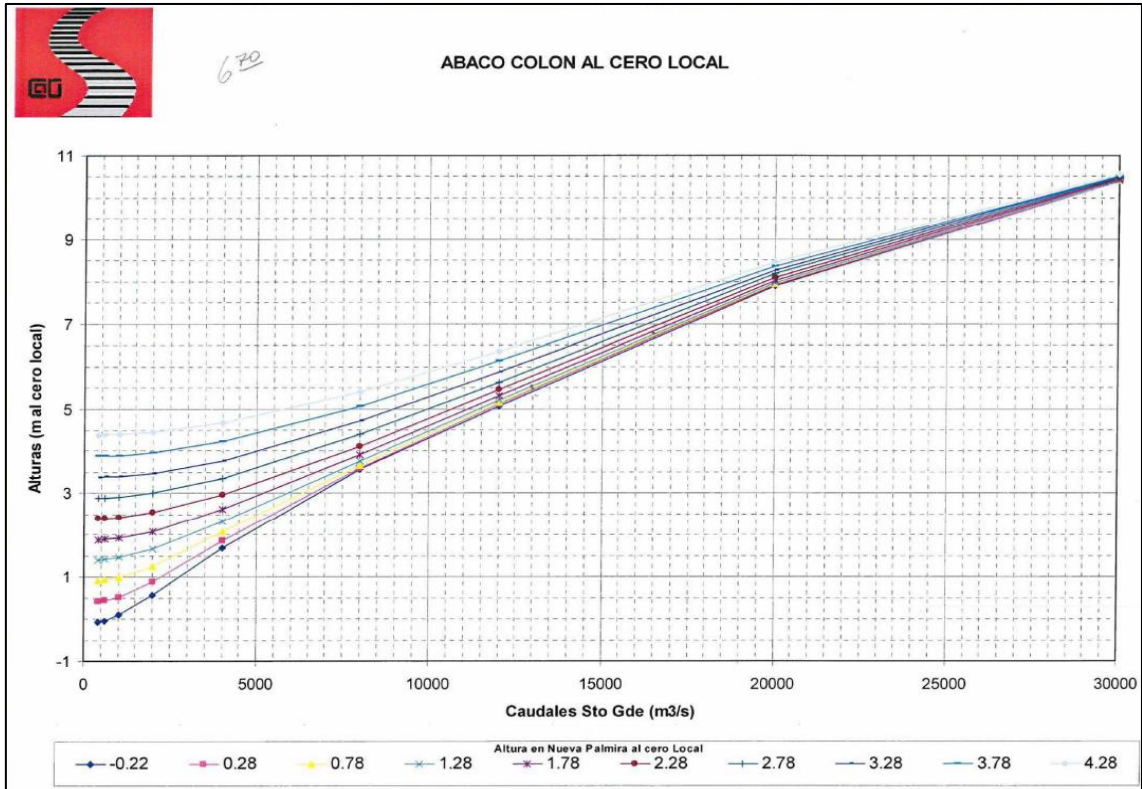


Figura 9.44.- Ábaco CARU – DNH – INA para Colón.

Con los pares $H-Q$ pudo establecerse una relación biunívoca razonable, válida para todo el rango de caudales. Esto se refuerza con la comparativa respecto del ábaco, donde se observa que la dispersión de los puntos graficados existe mayormente para valores de caudal menores al módulo (Figura 9.45).

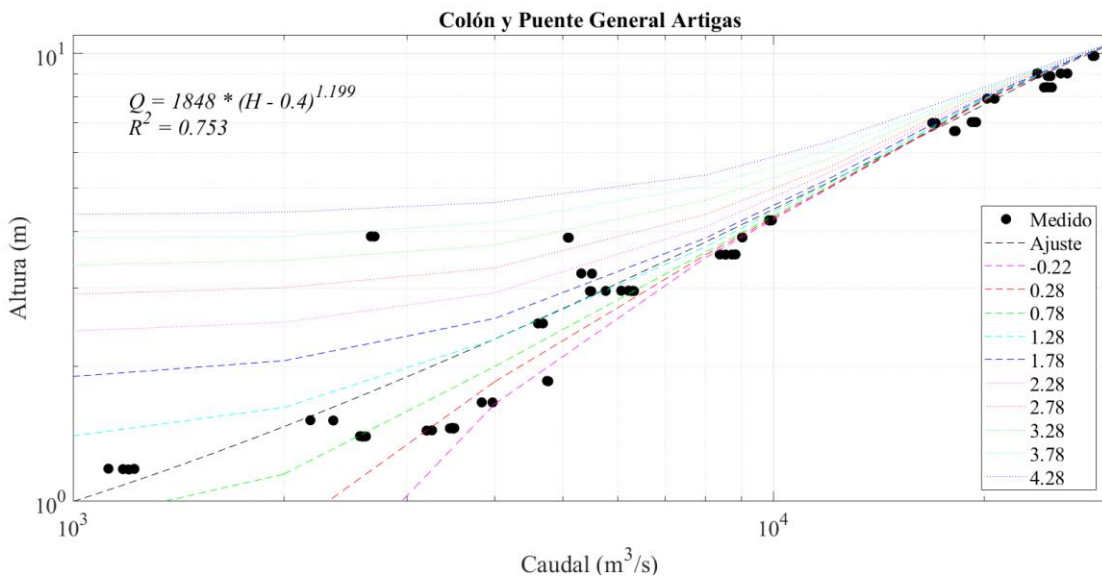


Figura 9.45.- Curva de gasto líquido –Secciones Colón y PGA.

En cuanto al transporte de sedimentos, tal como se expuso en el Capítulo 8, la sección cuenta con datos comparativos de caudal sólido por el fondo medidos. Esta información permitió oportunamente el establecimiento de las ecuaciones de transporte de fondo.

En la Figura 9.46 se presentan la curva de gasto sólido por el fondo generada a partir de los datos medidos con ADCP. También se señalan allí los aforos sólidos medidos, en ocasión de los trabajos de campo, por la metodología de desplazamiento de dunas.

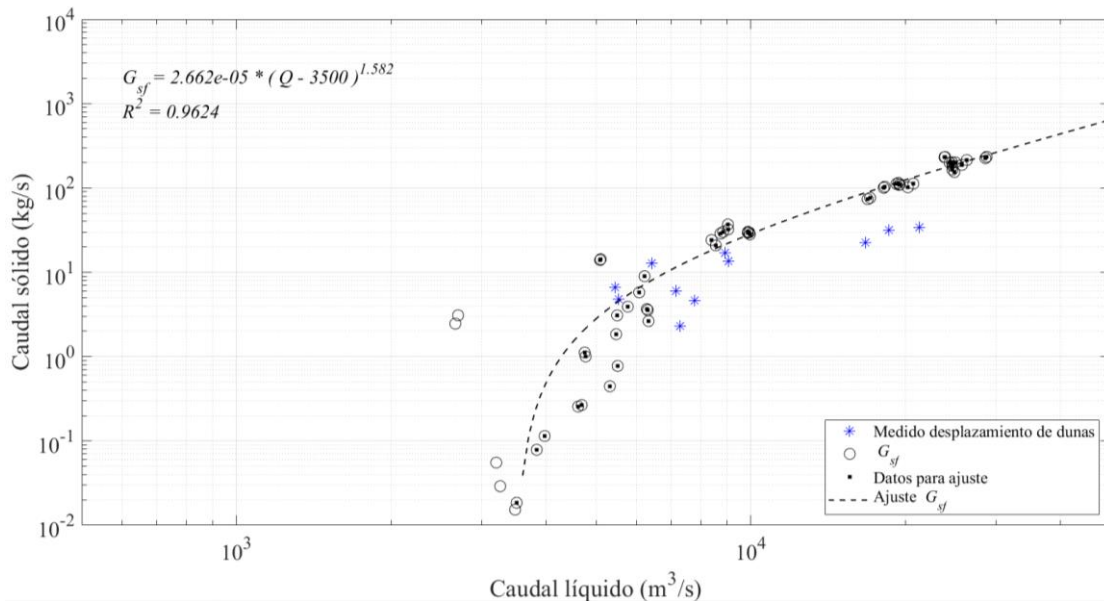


Figura 9.46.- Curva de gasto sólido por el fondo – Secciones Colón y PGA.

El ajuste a los datos obtenidos mediante mediciones con ADCP resulta adecuado para caudales medios. Sin embargo, para caudales altos se observa una discrepancia entre esta metodología y las estimaciones basadas en el desplazamiento de dunas. Este efecto puede explicarse considerando que los aforos sólidos realizados por desplazamiento de dunas se cuantificaron con 4 perfiles longitudinales integrados en la transversal. En este sentido, la integración de pequeños transportes en la transversal para condiciones de alta movilidad de sedimentos, podrían explicar esta diferencia.

Por otra parte, esta discrepancia podría interpretarse a la luz de lo expuesto en la sección 8.2.4.4. Para condiciones hidrológicas altas, la rugosidad por forma de fondo sería una componente más importante de la hidrodinámica, promocionando que el desplazamiento de partículas por saltación sobrepase el punto de reenganche de las dunas. Esto, en consecuencia, generaría un transporte de sedimentos mayor al que se puede contabilizar por desplazamiento de las formas.

Respecto del transporte en suspensión, se presenta en la Figura 9.47 los cálculos de G_{ss} realizados con el ASETSM9, para todas las concentraciones y diámetros ya mencionados. La cantidad de datos y el rango de caudales permiten visualizar una clara relación directa entre los caudales líquidos y sólidos en suspensión.

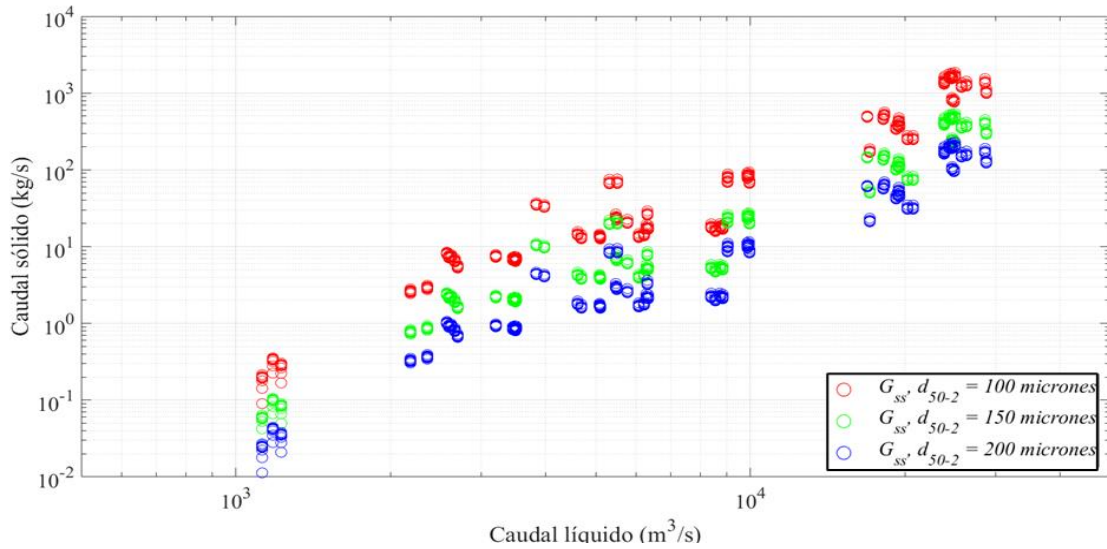


Figura 9.47.- Gasto sólido de fondo en suspensión –Secciones Colón y PGA.

Para el ajuste de G_{ss} se utilizó el diámetro $d_{50-2} = 150$ micrones, considerando tres cuestiones: 1) la curva granulométrica de sedimentos en suspensión medida en el Puente General Artigas (Figura 9.29) con un $d_{50-2} = 118$ micrones, 2) que dicha curva se obtuvo de las partículas medidas en un aforo sólido reportado en López Weibel (2023), cuyo resultado fue $G_{ss}=7,3$ kg/s para $Q=8.826$ m³/s, que coincide con la curva de $d_{50-2} = 150$ micrones en la Figura 9.47, 3) que las mediciones recientes realizadas por la CARU, con un equipo LISST-SL2 (Sequoia Scientific, Inc., 2024) en la sección del Puente General Artigas arrojaron un valor de diámetro medio de la fracción gruesa entre 100 y 150 micrones. En la Figura 9.48 se muestra la curva de ajuste lograda para el gasto sólido de fondo en suspensión.

A continuación, en la Figura 9.49, se presenta el conjunto de ambas curvas de ajuste obtenidas para la sección, que resultan en una estimación del gasto sólido de fondo total (G_s). Se observa allí que para el rango de caudal entre 5.000 – 12.000 m³/s, tanto G_{ss} como G_{sf} comparten orden de magnitud. Esto se valida con el resultado obtenido en campo presentado por López Weibel (2018) donde G_{ss}/G_{sf} se encontró en el entorno 0.81-0.93.

La gráfica de G_s se expresa matemáticamente en [9.12].

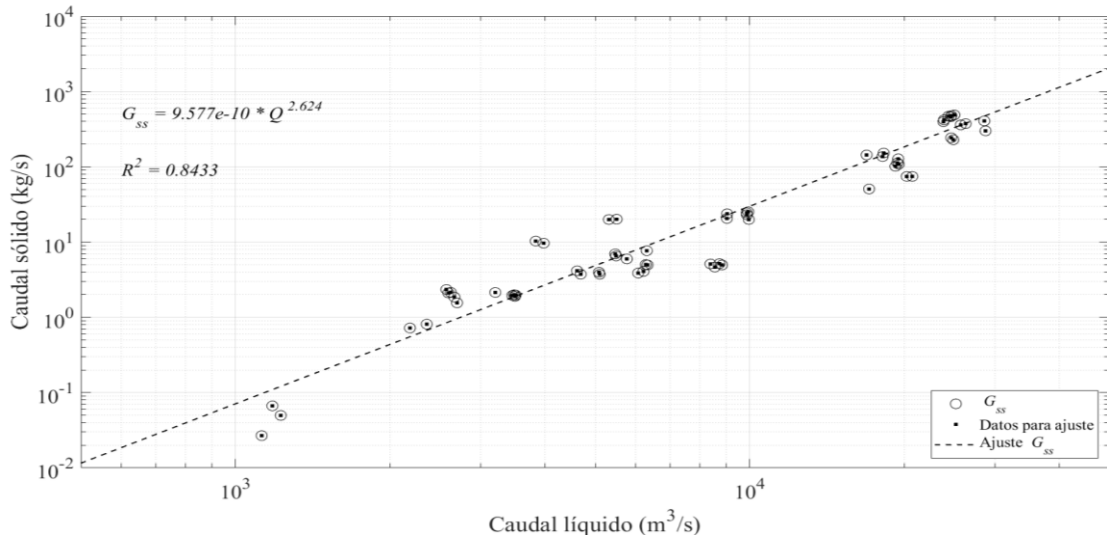


Figura 9.48.- Curva de gasto sólido de fondo en suspensión –Secciones Colón y PGA.

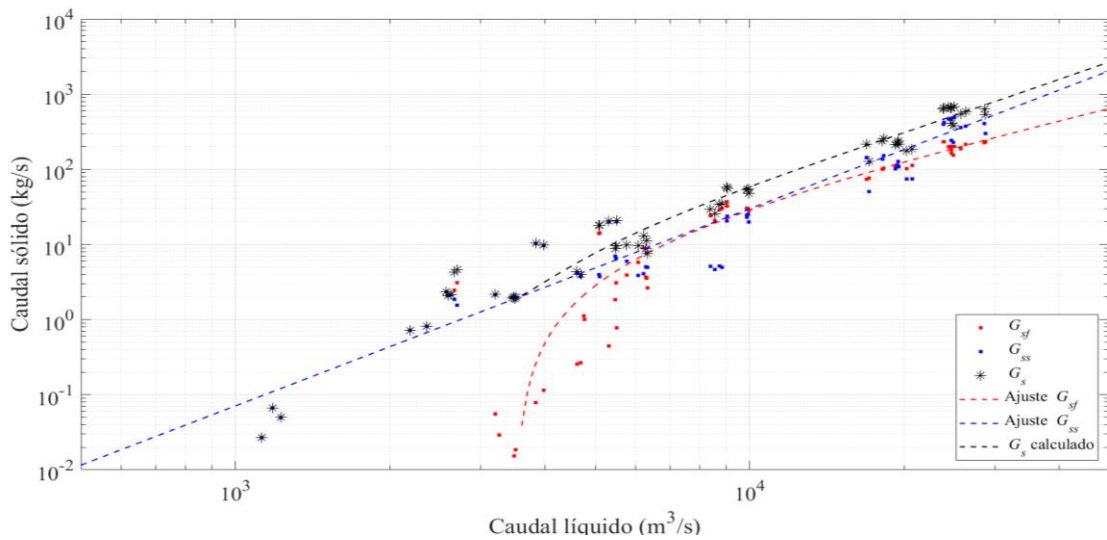


Figura 9.49.- Curva de gasto sólido de fondo –Secciones Colón y PGA.

$$G_s = \underbrace{2,662 \cdot 10^{-5} (Q - 3500)^{1,582}}_{G_{sf}} + \underbrace{9,577 \cdot 10^{-10} Q^{2,624}}_{G_{ss}} \quad [\text{kg/s}] \quad \forall Q > 3.500 \text{ m}^3/\text{s} \quad [9.12]$$

$$G_s = \underbrace{0}_{G_{sf}} + \underbrace{9,577 \cdot 10^{-10} Q^{2,624}}_{G_{ss}} \quad [\text{kg/s}] \quad \forall Q \leq 3.500 \text{ m}^3/\text{s}$$

9.3.2.8.Liebig

En el marco del Monitoreo Integral del Río Uruguay se realizan aforos bimestrales en la sección Liebig, ubicada 12 km aguas arriba de la sección Colón. Esta sección tiene la peculiaridad de que comprende solamente el brazo que circula por margen argentina. En la Figura 9.50 se muestra su ubicación relativa. Seguido de esto, se muestra un ejemplo de medición con ADCP Sontek M9 en la sección, en el que se aprecia la distribución de velocidades, profundidad y ancho típicos (Figura 9.51).



Figura 9.50.- Ubicación de la sección de medición – Liebig.

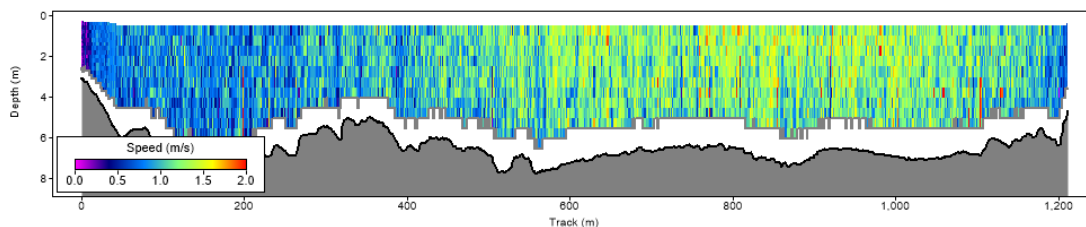


Figura 9.51.- Salida del Software RiverSurveyor® para un aforo realizado en la sección Liebig, el día 06/11/2018. $Q = 7.466 \text{ m}^3/\text{s}$.

Dada la cercanía a la sección Colón, y los casi 100 kilómetros hasta Concordia, se entiende válido utilizar para este caso directamente la curva $H-Q$ de Colón como estimación de caudal en la sección. Máxime teniendo en cuenta que los relevamientos no incluyen el caudal circulante por margen izquierda.

Vale entonces, enfocar esta presentación en lo correspondiente al gasto sólido. En este aspecto, se presenta en la figura siguiente los datos de caudal líquido vs. caudal sólido transportado por el fondo.

A continuación, se observa en la Figura 9.52 un ajuste satisfactorio para un caudal límite inferior de $2.100 \text{ m}^3/\text{s}$. El exponente de la ecuación de ajuste presenta un valor apenas por encima de la unidad. Pequeños cambios en los datos de ingreso generan una curva con un exponente cercano a 1.3, pero con menor coeficiente de determinación. Esto podría explicarse por una mala representación de los diámetros característicos basado en las pocas mediciones de esta variable en la sección. En términos físicos, la disminución a la unidad del exponente implicaría que la concentración del transporte de fondo se mantiene

aproximadamente constante para los diferentes caudales, lo cual parece *a priori* contra intuitivo. Sin embargo, considerando la ubicación de la sección y los procesos morfológicos involucrados, así como también la granulometría de fondo, podría indicar un proceso de extinción del suministro de sedimentos hacia aguas arriba. Para comprobar esta hipótesis, más información de campo es necesaria.

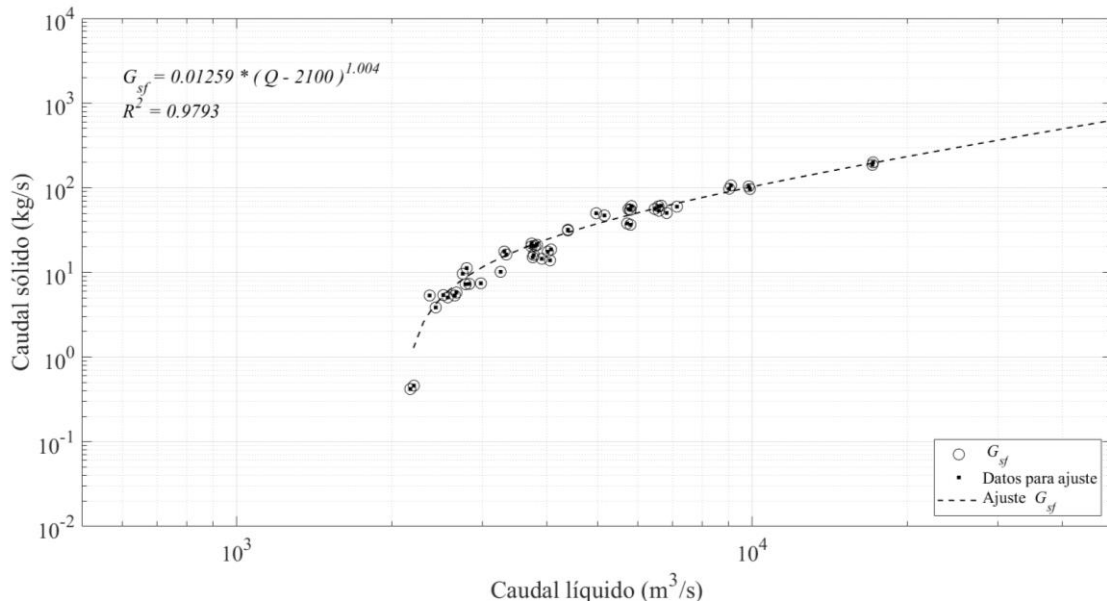


Figura 9.52.- Curva de gasto sólido por el fondo – Sección Liebig.

La ejecución del algoritmo para el cálculo de la concentración de sedimento de fondo en suspensión, G_{ss} , resultó en lo expuesto en la Figura 9.53. Se presenta allí, homológamente a lo realizado para las secciones anteriores, los pares Q - G_{ss} estimados utilizando la metodología basada en tecnología acústica.

Considerando la cercanía con la sección de Colón, y la ausencia de discontinuidad física en el tramo, se considera que la combinación de diámetros y concentraciones a utilizar debe ser la misma: $d_{50-2} = 150$ micrones, $d_{50-1} = 15$ micrones y $M_{s1} = 30$ mg/L. El ajuste de los datos seleccionados se presenta en la Figura 9.54, siendo este satisfactorio, principalmente para caudales medios-altos, y valores de G_{ss} mayores a 1 kg/s.

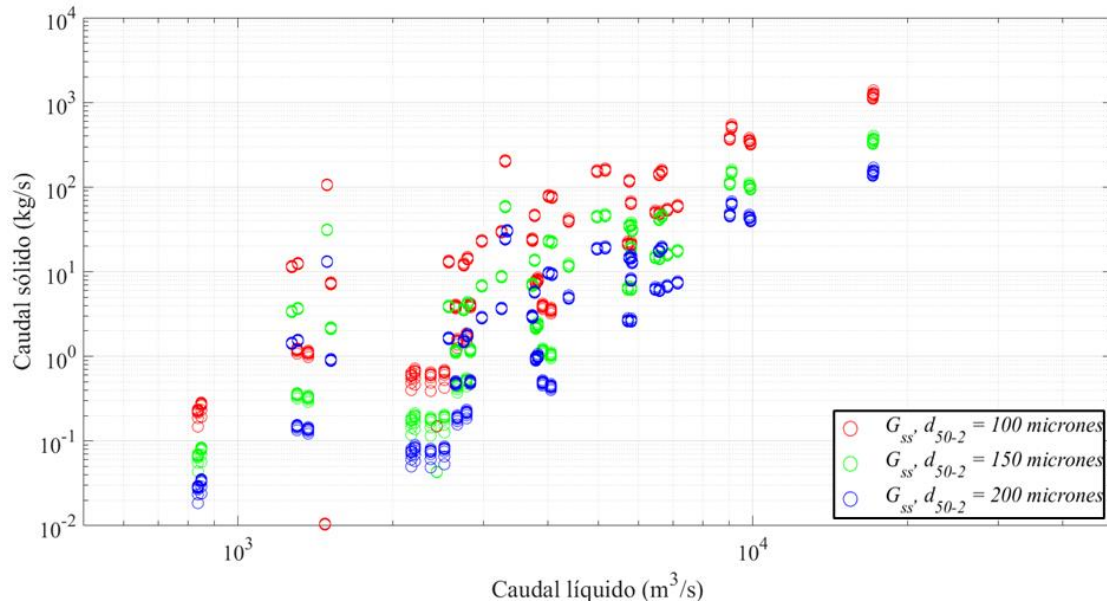


Figura 9.53.- Gasto sólido de fondo en suspensión – Sección Liebig.

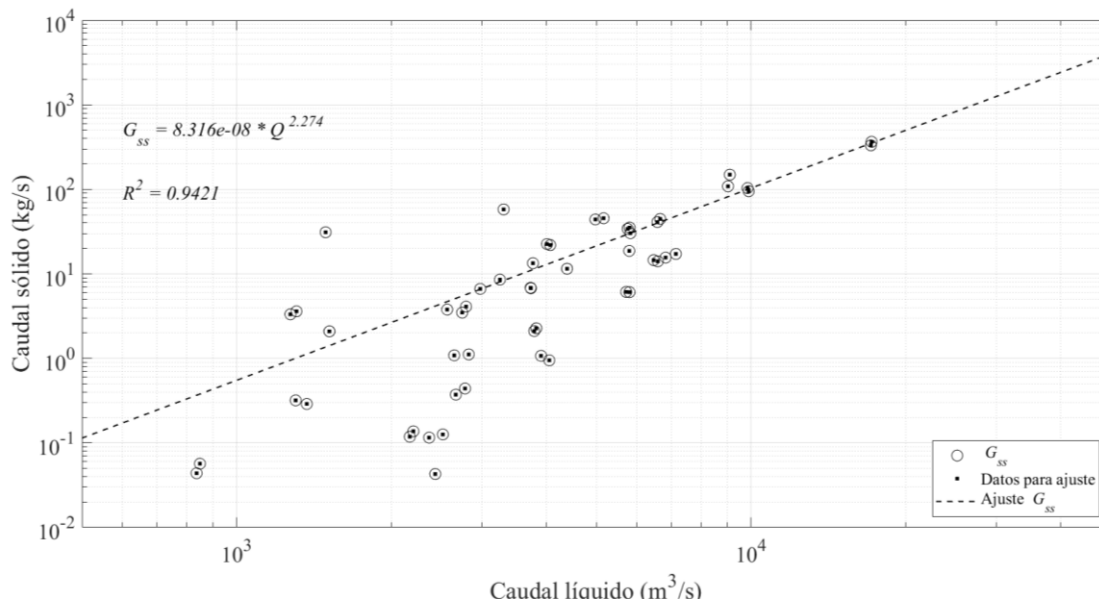


Figura 9.54.- Curva de gasto sólido de fondo en suspensión – Sección Liebig.

Por último, se presenta en la Figura 9.55 ambas curvas ajustadas para la sección Liebig. Al igual que Colón, lo primero que llama la atención resulta que $G_{sf} > G_{ss}$ para el rango medio de caudales. Estas expresiones graficadas se sintetizan en [9.13].

$$G_s = \underbrace{0,01259 (Q - 2100)^{1,004}}_{G_{sf}} + \underbrace{8,316 \cdot 10^{-08} Q^{2,274}}_{G_{ss}} \text{ [kg/s]} \forall Q > 2.100 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$G_s = \underbrace{0}_{G_{sf}} + \underbrace{8,316 \cdot 10^{-08} Q^{2,274}}_{G_{ss}} \text{ [kg/s]} \forall Q \leq 2.100 \text{ m}^3/\text{s}$$

[9.13]

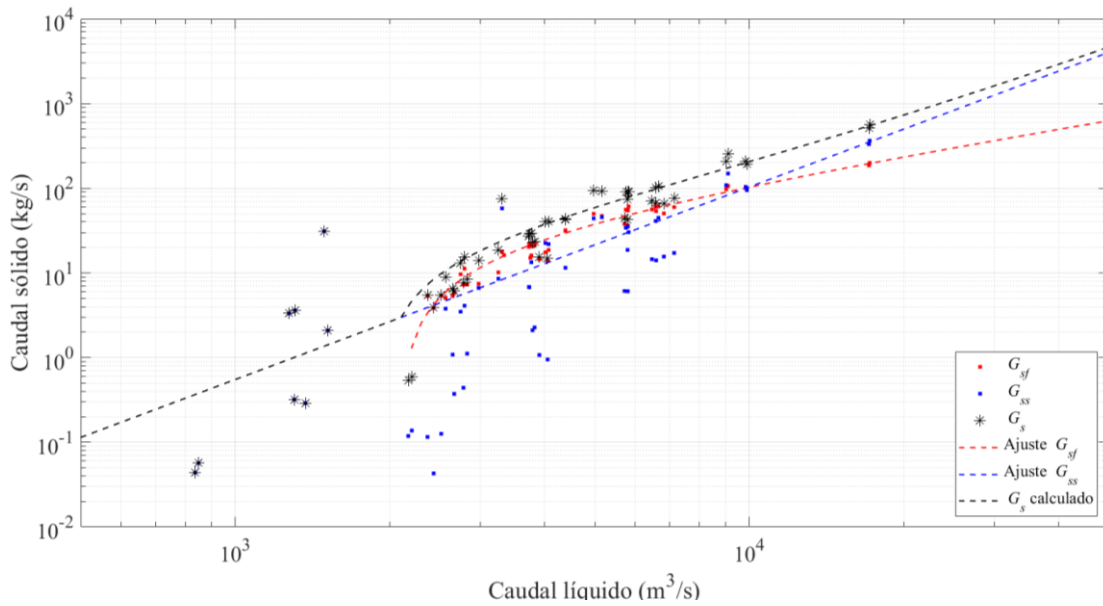


Figura 9.55.- Curva de gasto sólido de fondo – Sección Liebig.

9.3.2.9. Puerto Yerúa

Esta sección se ubica en el kilómetro 318 de la vía navegable (Figura 9.56). En esta zona no existen islas, la dinámica fluvial es erosiva, y existen afloramientos rocosos mayoritariamente, en particular sobre margen derecha (Figura 9.57). El lecho está constituido por gravas (Figura 5.16 y Figura 7.5), lo que indicaría la imposibilidad de transporte de fondo para caudales bajos y medios, tal como fuera relevado en el contexto de las campañas mencionadas en el apartado 5.3.2.



Figura 9.56.- Ubicación de la sección de medición Puerto Yerúa.

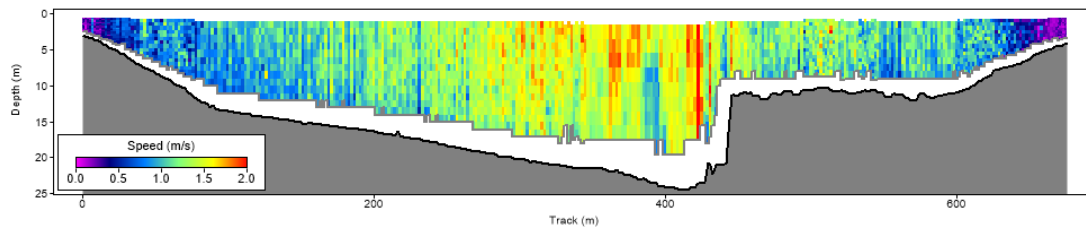


Figura 9.57.- Salida del Software RiverSurveyor® para un aforo realizado en la sección Puerto Yeruá, el día 07/11/2018. $Q = 10.533 \text{ m}^3/\text{s}$.

Las alturas hidrométricas se vinculan directamente con los caudales erogados de la represa de Salto Grande, salvo para caudales bajos, como puede apreciarse en el ábaco elaborado para Concordia (Figura 9.58). Tal es así que durante más de 5 años la Prefectura Naval Argentina reportó la altura de Puerto Yeruá como la altura en Concordia desfasada por un valor constante. Esto se corrigió a principios de 2023 con la instalación, por parte de CARU, de una nueva escala hidrométrica.

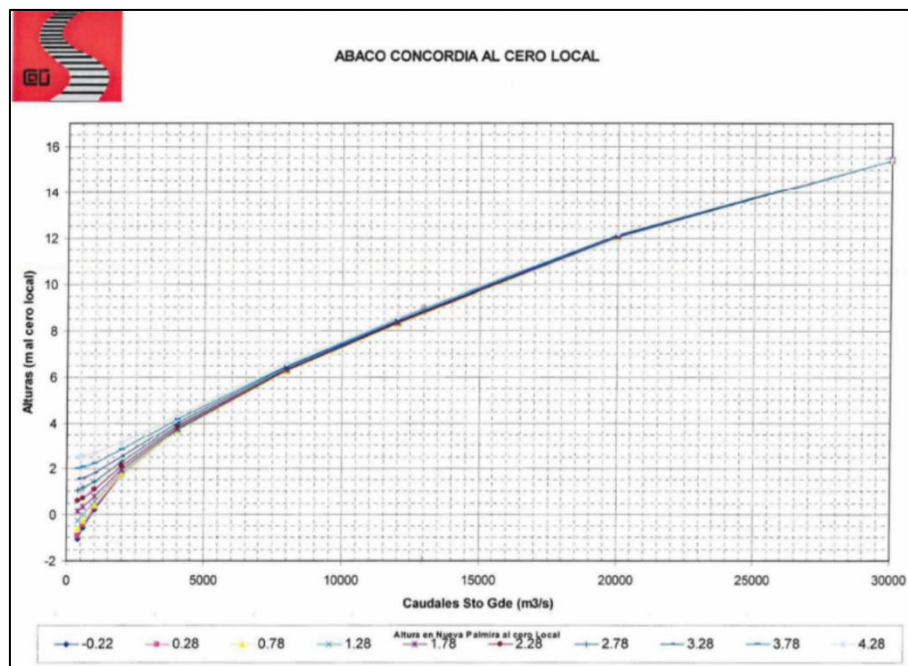


Figura 9.58.- Ábaco CARU – DNH – INA para Concordia.

Teniendo en cuenta los escasos 12 kilómetros por la vía navegable que separan esta sección con el puerto de Concordia, se toma dicho puerto para representar las alturas en Puerto Yeruá. En la Figura 9.59 se muestra el ajuste de la curva H-Q lograda, con resultados relativamente satisfactorios. Las diferencias y desajustes observables pueden deberse a que, en este tramo de 12 kilómetros, el traslado demora unas pocas horas, pero las variaciones de nivel causadas por operación de la represa son más rápidamente registradas en Concordia. Es decir, una variación brusca del nivel erogado se registrará en Concordia a una hora determinada, mientras que el caudal correspondiente circulará

en dicha sección un par de horas después. Este desfase no fue representado en la elaboración de la curva, por lo que metodológicamente puede explicar algunos desarreglos en los pares de datos para condiciones altamente no-estacionarias.

El transporte de sedimentos de fondo en la sección, por la composición del lecho, es esperable que sea tendiente a cero para condiciones medias o altas del río, privilegiándose el transporte en escenarios hidrodinámicos poco frecuentes. No obstante, y a los efectos de ser consistente con la metodología, se presentan los hallazgos obtenidos.

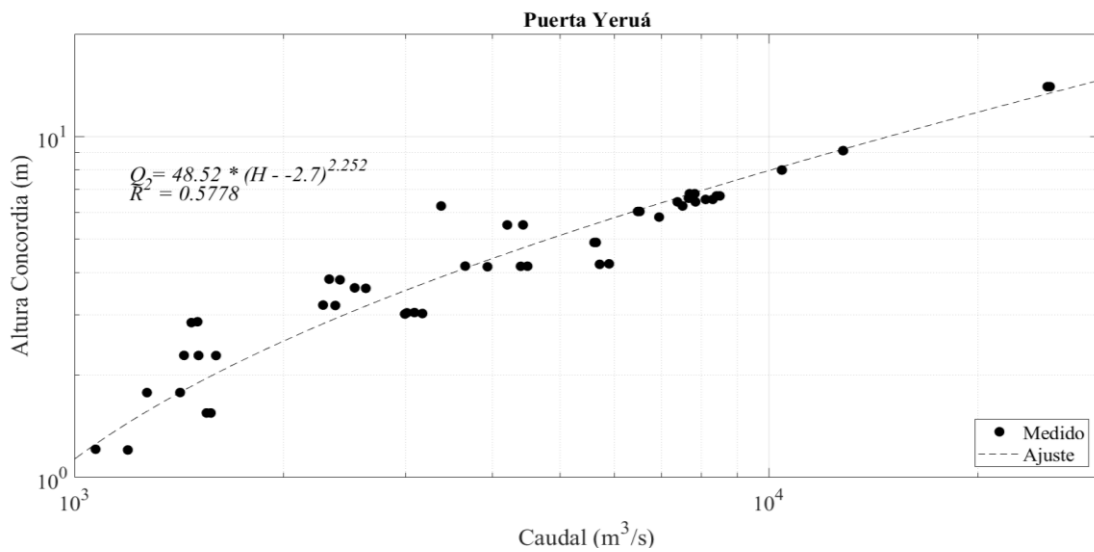


Figura 9.59.- Curva de gasto líquido – Sección Puerto Yeruá.

En la Figura 9.60 se presentan los valores de G_{sf} obtenidos, junto con el ajuste logrado. El caudal al cual se comenzaría a registrar movimiento de fondo para los datos ingresados es superior a los 10.400 m³/s.

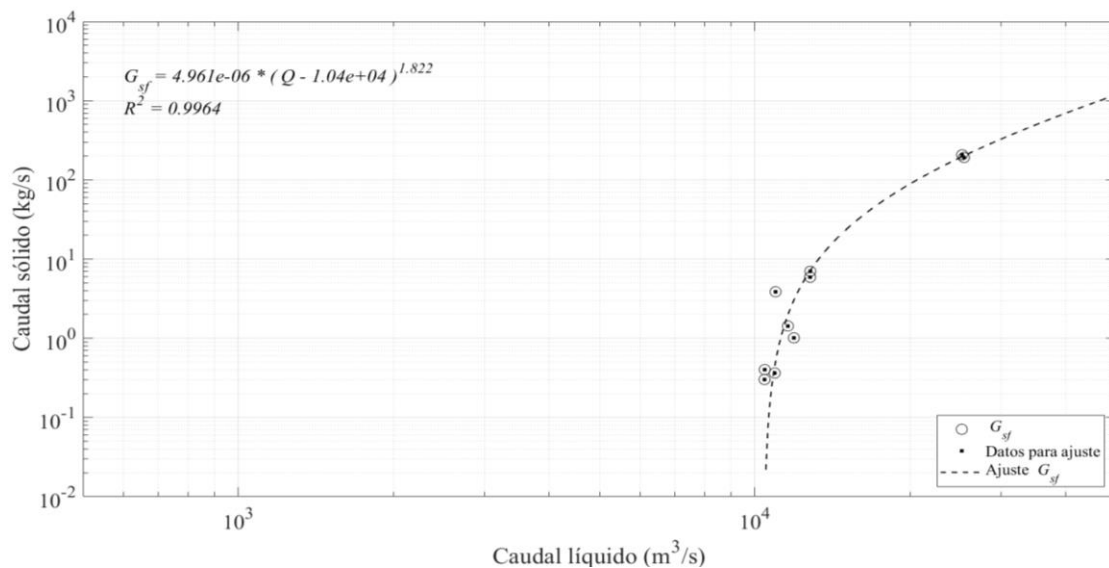


Figura 9.60.- Curva de gasto sólido por el fondo – Sección Puerto Yeruá.

Sin referencia de datos de arena en suspensión, ya que la campaña realizada en esta sección no produjo resultados (Tabla 5.3 y Tabla 5.4), se presentan en la Figura 9.61 todos los resultados obtenidos para G_{ss} . Siguiendo la tendencia de engrosamiento de los sedimentos de fondo presentados en el título 7.2.1, y ante la ausencia de evidencia empírica, se tomó el diámetro $d_{50-2}=200$ micrones para realizar el ajuste que allí se muestra. Este resultó satisfactorio en términos matemáticos como se aprecia en la Figura 9.62. Sin embargo, si se toma el máximo caudal sólido en suspensión calculado igual a 32,4 kg/, correspondiente a un caudal líquido de 25.191 m³/s, la concentración media en la sección sería de 1,28 mg/L. Esta concentración, como ya se mencionó, es dificultosa de medir en campo, más aún para partículas grandes. A modo de ejemplo, se señala que 1,28 mg/L es equivalente a captar alrededor de 50 partículas de 200 micrones en un muestreador US P-61. Esta cantidad es apenas suficiente para definir las estadísticas medias de la muestra.

Por último, en la Figura 9.63 se muestra el transporte total de fondo para la sección. Se aprecia allí, que el transporte sería dominado por el mecanismo en suspensión para la mayor parte de los caudales, a excepción de las situaciones de crecida donde la corriente podría movilizar las gravas presentes en el fondo en un orden de magnitud por encima al transporte en suspensión.

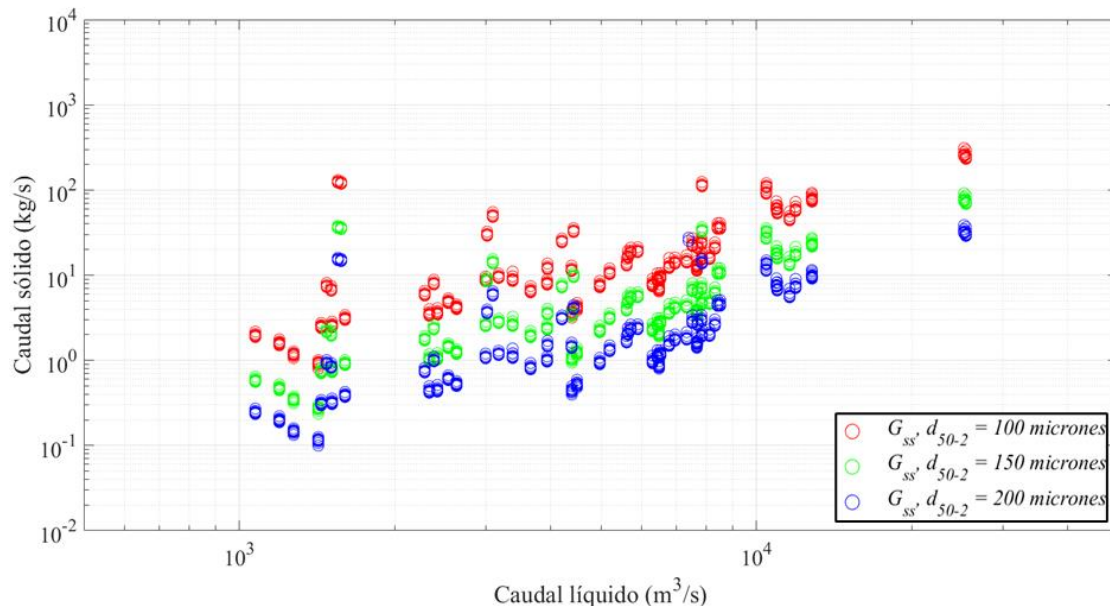


Figura 9.61.- Gasto sólido de fondo en suspensión – Sección Puerto Yerúa.

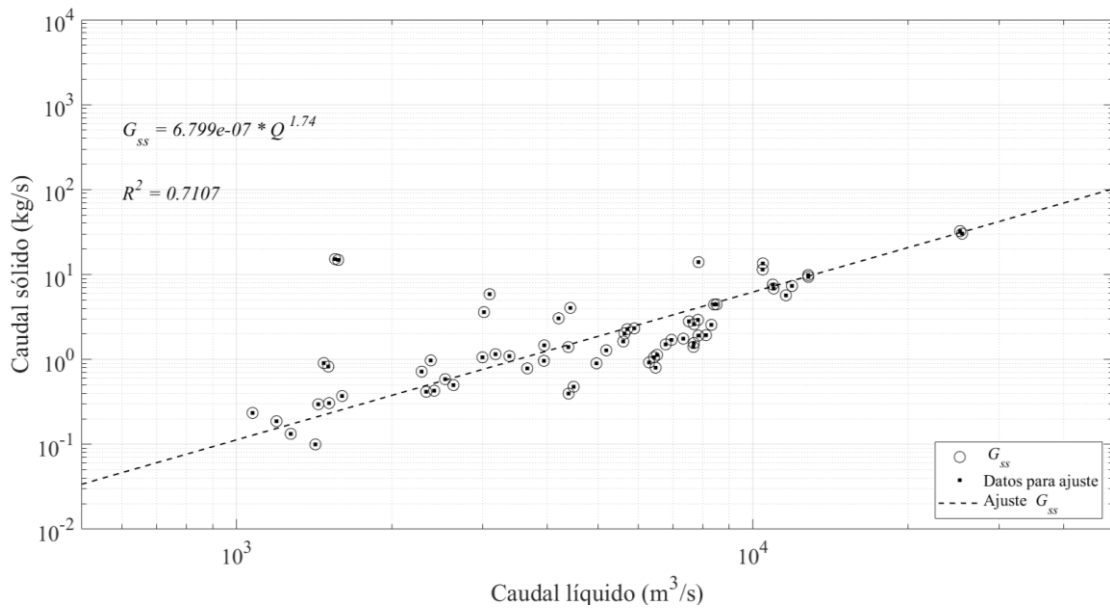


Figura 9.62.- Curva de gasto sólido de fondo en suspensión – Sección Puerto Yeruá.

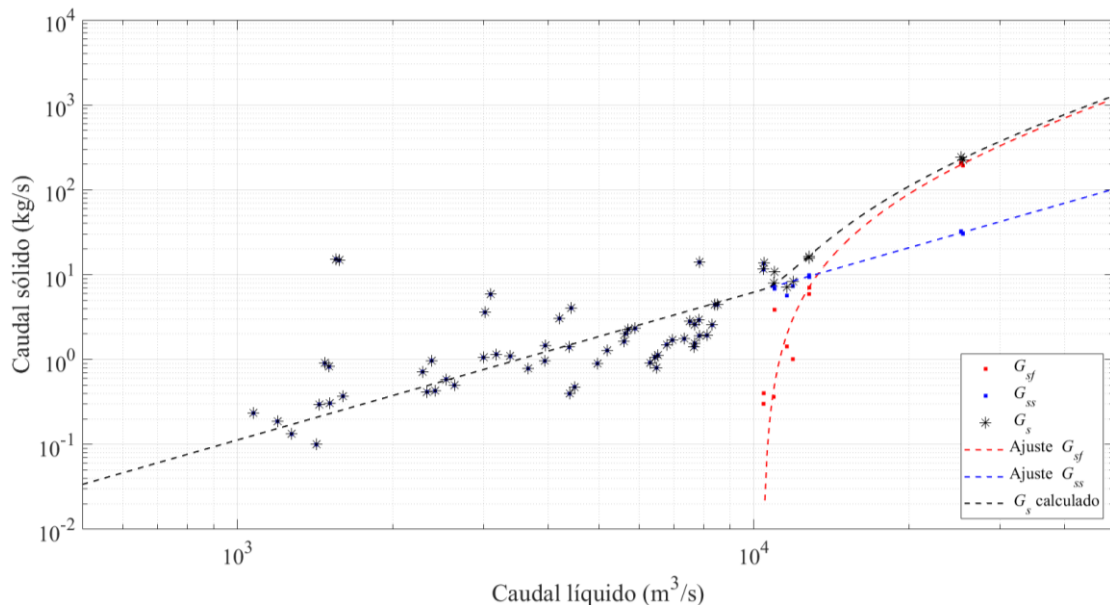


Figura 9.63.- Curva de gasto sólido de fondo – Sección Puerto Yeruá.

9.3.2.10. Vertedero

Esta sección se ubica 1600 m aguas abajo de la Represa de Salto Grande, de allí su denominación (Figura 9.64). El lecho está constituido principalmente por roca y grava gruesa, con algo de arena sobre la margen argentina, y una barranca rocosa sobre la margen uruguaya.

Debido a la cercanía con la represa, los caudales están directamente determinados por la maniobra de erogación de la represa. Las alturas se miden aguas abajo, en la estación Salto Grande Aguas Abajo, perteneciente a la Prefectura Naval Argentina.



Figura 9.64.- Ubicación de la sección de medición Vertedero.

Con estas alturas, y los aforos relevados en el contexto del Programa de Monitoreo Integral del Río Uruguay, se pudo graficar la Figura 9.65, sobre la cual se ajustó la curva $H-Q$ según la metodología establecida. Se observa allí un resultado aceptable dadas las características de la sección. Errores pueden derivarse de la baja frecuencia de medición de la altura en la estación de Prefectura Naval Argentina (12 hs para condición hidrométrica normal, 6 hs en alerta y 3hs en inundación), o bien errores puntuales en dichas lecturas manuales.

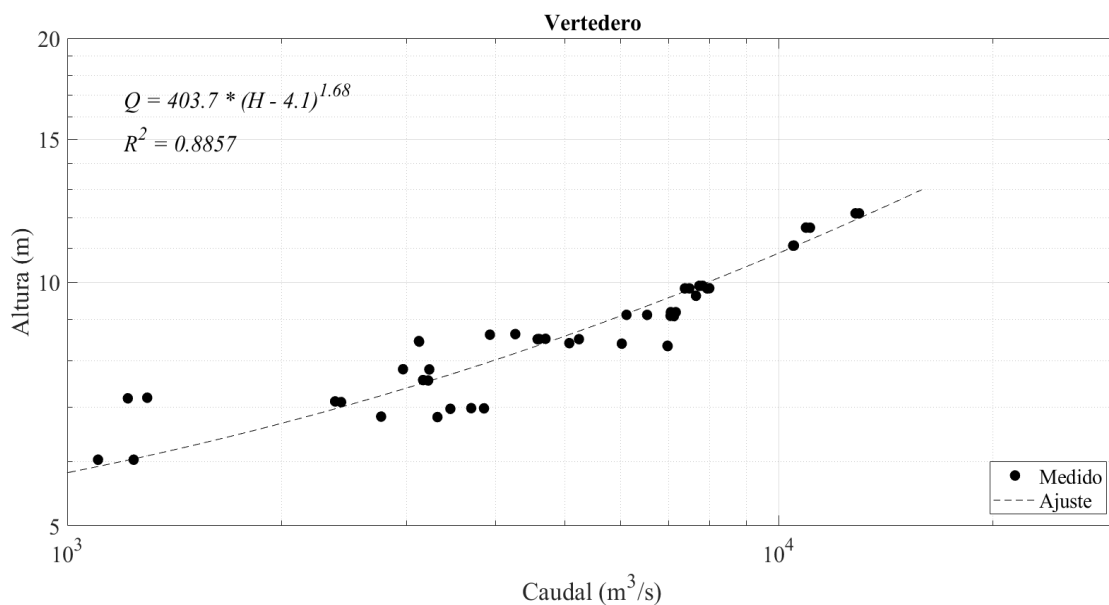


Figura 9.65.- Curva de gasto líquido – Sección Vertedero.

Al igual que para Puerto Yeruá, se entiende que el caudal sólido de fondo en la sección tenderá a cero considerando los antecedentes de mediciones realizadas por la represa (Comisión Técnica Mixta de Salto Grande, 1995). A pesar de lo mencionado, se aplicó la metodología para tener resultados al igual que para las demás secciones presentadas.

En la Figura 9.66 se presentan los datos de gasto sólido por el fondo (G_{sf}), mientras que en la Figura 9.67 se muestran los cálculos realizados para gasto sólido de fondo en suspensión (G_{ss}), para la misma configuración de diámetros y concentraciones tomados en Puerto Yeruá.

En ambas figuras se observan valores bajos de transporte de sedimentos de fondo, considerando los caudales asociados, y sin una clara tendencia de dependencia del caudal líquido.

Esto, en conjunto con la ausencia de datos de diámetros característicos, y mediciones distribuidas espacialmente de los mismos, hace suponer que los valores de diámetro utilizados en los cálculos no solo podrían estar equivocados, sino también que la variación espacial de estos podría jugar un rol fundamental en el cálculo del transporte.

Por estos motivos, y por los antecedentes relevados por la Comisión Técnica Mixta de Salto Grande, se entiende que esta sección tiene un transporte nulo de arenas de fondo por el fondo y en suspensión.

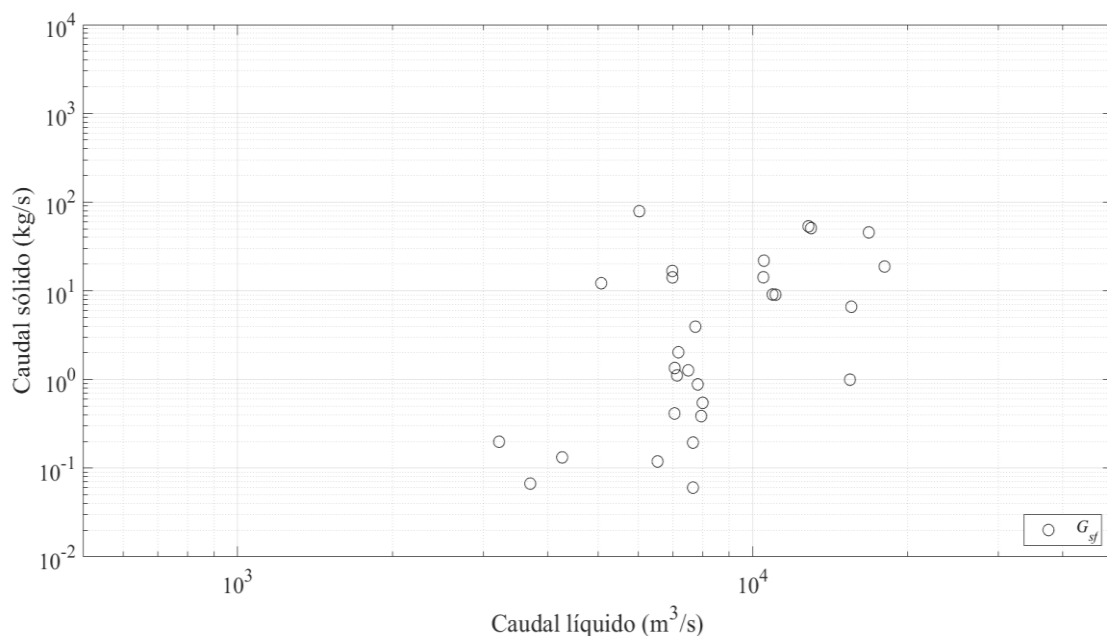


Figura 9.66.- Gasto sólido por el fondo – Sección Vertedero.

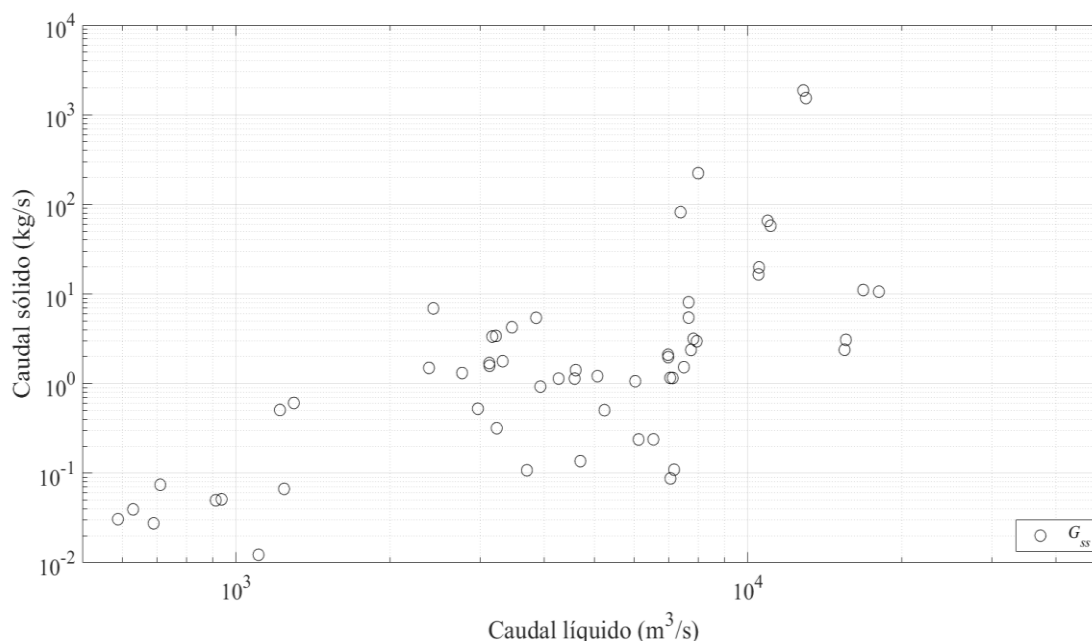


Figura 9.67.- Gasto sólido de fondo en suspensión – Sección Vertedero.

9.4. Conclusiones

Con la metodología expuesta se pudieron construir curvas de gasto líquido para 7 secciones transversales aguas arriba de Fray Bentos. También se pudieron construir curvas de gasto sólido, como función del caudal líquido, para 8 secciones distribuidas en toda la longitud del área de estudio. En todos los casos, los coeficientes de determinación son satisfactorios. Se resumen las expresiones en la Tabla 9.6.

De dicha tabla se infiere la existencia de un caudal de iniciación de movimiento del sedimento de fondo (G_{sf}). Este valor de caudal se vincula con una altura del río, según la curva $H-Q$.

Para el caso de Colón, el caudal de $3.500 \text{ m}^3/\text{s}$ se corresponde con una altura de 2.00 m. Haciendo uso de la curva de permanencia de niveles disponible para Colón, reportada en Junes & Llosa (2023) pero elaborada por el autor de la presente tesis, se logró transformar esta altura correspondiente a un caudal determinado, en una permanencia de dicho caudal. Este cálculo resulta en una permanencia de 55% para dicho caudal, que representa que durante el 45% del tiempo no habría desplazamiento del fondo. Lo obtenido es consistente con los escenarios de poca sedimentación observados para el período 2020-2023, cuando este umbral prácticamente no se superó.

Si bien la determinación del umbral en donde se produce transporte en suspensión es más complicado, tópico para futuros análisis, se desprende que sería aún menor el porcentaje del tiempo en el cual se produce este modo de transporte.

Como corolario del presente capítulo se señala que la sistematización de la información colectada hasta este punto en la tesis ha permitido generar una herramienta sin precedentes para el río Uruguay, con aplicaciones prácticas como las reportadas en Nardin et al. (2023) y Consultora ad hoc - Rodrigo Junes y Abelardo Llosa (2023).

Tabla 9.6.- Resumen de las curvas de descarga ajustadas.

Km	Sección		Curva			
	Denominación	H-Q	Q-G _w	Q-G _{ss}	Q-G _{sf}	
9	Nueva Palmira	--	--	--	$G_{sf} = 2,300 \times 10^{-05} (Q - 5,500)^{1,514} \text{ [kg/s]} \forall Q > 5,500 \text{ m}^3/\text{s}$ $G_{sf} = 0 \text{ kg/s} \forall Q \leq 5,500 \text{ m}^3/\text{s}$	
105	Fray Bentos	--	--	$G_{ss} = 3,990 \times 10^{-11} Q^{3,036} \text{ [kg/s]} \forall Q > 3,000 \text{ m}^3/\text{s}$	$G_{sf} = 4,485 \times 10^{-07} (Q - 5,500)^{2,014} \text{ [kg/s]} \forall Q > 5,500 \text{ m}^3/\text{s}$ $G_{sf} = 0 \text{ kg/s} \forall Q \leq 5,500 \text{ m}^3/\text{s}$	
140	Nuevo Berlín	$Q = 454,3 [H - (-1,4)]^{2,047}$	--	$G_{ss} = 4,736 \times 10^{-11} Q^{3,002} \text{ [kg/s]} \forall Q$	$G_{sf} = 8,234 \times 10^{-07} (Q - 4,000)^{1,950} \text{ [kg/s]} \forall Q > 4,000 \text{ m}^3/\text{s}$ $G_{sf} = 0 \text{ kg/s} \forall Q \leq 4,000 \text{ m}^3/\text{s}$	
187	Concepción del Uruguay	$Q = 1,299 [H - (-0,30)]^{1,480}$	$G_w = 2,283 \times 10^{-4} Q^{1,486} \text{ [kg/s]} \forall Q$	$G_{ss} = 3,866 \times 10^{-06} Q^{1,738} \text{ [kg/s]} \forall Q$	--	
192	Casablanca	$Q = 2,760 [H - 0,00]^{0,987}$	--	$G_{ss} = 3,866 \times 10^{-06} Q^{1,738} \text{ [kg/s]} \forall Q$	$G_{sf} = 2,575 \times 10^{-5} (Q - 3,500)^{1,608} \text{ [kg/s]} \forall Q > 3,500 \text{ m}^3/\text{s}$ $G_{sf} = 0 \text{ kg/s} \forall Q \leq 3,500 \text{ m}^3/\text{s}$	
214	Colón y PGA	$Q = 1,848 [H - 0,40]^{1,199}$	--	$G_{ss} = 9,577 \times 10^{-10} Q^{2,624} \text{ [kg/s]} \forall Q$	$G_{sf} = 2,662 \times 10^{-5} (Q - 3,500)^{1,582} \text{ [kg/s]} \forall Q > 3,500 \text{ m}^3/\text{s}$ $G_{sf} = 0 \text{ kg/s} \forall Q \leq 3,500 \text{ m}^3/\text{s}$	
230	Liebig	$Q = 1,848 [H - 0,40]^{1,199}$	--	$G_{ss} = 8,316 \times 10^{-08} Q^{2,274} \text{ [kg/s]} \forall Q$	$G_{sf} = 1,259 \times 10^{-2} (Q - 2,100)^{1,004} \text{ [kg/s]} \forall Q > 2,100 \text{ m}^3/\text{s}$ $G_{sf} = 0 \text{ kg/s} \forall Q \leq 2,100 \text{ m}^3/\text{s}$	
320	Puerto Yeriá	$Q = 48,52 [H - (-2,70)]^{2,252}$	--	$G_{ss} = 6,799 \times 10^{-07} Q^{1,740} \text{ [kg/s]} \forall Q$	$G_{sf} = 4,961 \times 10^{-6} (Q - 10,000)^{1,822} \text{ [kg/s]} \forall Q > 10,000 \text{ m}^3/\text{s}$ $G_{sf} = 0 \text{ kg/s} \forall Q \leq 10,000 \text{ m}^3/\text{s}$	
350	Vertedero	$Q = 403,7 [H - 4,10]^{1,680}$	--	--	--	

Capítulo 10

Caracterización y variaciones espacio-temporales del transporte de sedimentos

10.1. Introducción

10.1.1. Importancia del tema

Se ha mencionado en esta tesis el rezago científico asociado al río Uruguay, particularmente en temas de transporte de sedimentos y morfología fluvial. Ante esta situación, la Comisión Administradora del Río Uruguay ha tomado las siguientes acciones para contrarrestar dicha tendencia:

- 2017-2018 la CARU otorgó financiamiento de 3 becas de investigación en la materia,
- 2018-2025 financiamiento de un proyecto de monitoreo del transporte de sedimentos en el tramo administrado, llevado adelante por la Secretaría Técnica de la CARU,
- 2019-2025 colaboración con el INA para la modelación hidrodinámica del tramo aguas abajo de la represa de Salto Grande,
- 2023 adquisición de un Difractómetro Laser de campo, LISST-SL2, que es un equipo de última tecnología que mide concentración y tamaño de partículas en suspensión, con una inversión de más de 80.000 USD.

También, desde el Departamento de Hidrología de la CARU se ha trabajado en generar instancias de Colaboración con investigadores de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral y el Instituto Nacional del Agua en Argentina, y el Departamento del Agua (Salto) e IMFIA (Montevideo) de la Universidad de la República en Uruguay.

El propósito de estas investigaciones, cuyos resultados se compaginan y analizan en la presente tesis, fue caracterizar el transporte de sedimentos del tramo de río que administra CARU, para contribuir al conocimiento del río, y utilizar este conocimiento en políticas de gestión. Un ejemplo de esta aplicación se manifestó a partir de las Resoluciones CARU N° 75/22 y 76/22. En dichas resoluciones la CARU encomendó la realización de dos proyectos asociados al dragado y profundización de la vía navegable del río Uruguay. El primero contempló el estudio de ingeniería y el análisis ambiental previo de la profundización de la vía navegable a 34 pies de profundidad entre Nueva Palmira y Concepción del Uruguay; mientras que el segundo abarcó la mejora inmediata de la vía navegable, a 8 pies de navegación, para el tramo Paysandú - Salto. En estos proyectos, lo hasta aquí reportado en esta tesis, así como también el contenido de este capítulo, fue utilizado tanto para la ingeniería correspondiente (cálculo de volúmenes de dragado de apertura y mantenimiento, alturas de dunas, etc.), como para las evaluaciones ambientales correspondientes.

En estas instancias se ha manifestado una mejora significativa respecto de los proyectos realizados anteriormente (Comisión Técnica Mixta de Salto Grande, 2004; EIH-INCOIV, 2012), principalmente en las estimaciones de transporte de sedimentos. Estos proyectos anteriores se basaban en apenas unas mediciones de campo, mientras que en la actualidad se cuenta con una base de datos sistematizada y curvas de descarga obtenidas para distintas secciones transversales del río.

10.1.2. Antecedentes técnicos

Los estudios científico-técnicos realizados en el área de estudio, que incluyen la cuantificación del transporte de sedimentos en el río Uruguay, están vinculados con la estimación de la variable para alimentar un modelo conceptual o numérico del Río de la Plata (Urien, 1972; Menéndez & Re, 2009; Re et al., 2009; Re et al., 2010). Todos coinciden en que el aporte del Uruguay consiste principalmente en material en suspensión, ya que el transporte de fondo – escasamente cuantificado – es retenido en los primeros kilómetros del Río de la Plata Interior.

Urien (1972) estimó un aporte total de sedimentos del río Uruguay al Río de la Plata de 7 millones de ton/año, frente a 72,8 millones de ton/año del Paraná, lo que representaba un 9% de la carga sólida anual, con un caudal líquido del 20% del total.

Recientemente, Moreira & Simionato (2019) procesaron datos de la Base Hidrológica de la Subsecretaría de Infraestructura en Concepción del Uruguay, obteniendo un aporte de 5 millones de ton/año sobre 75 millones totales. Esto representa un 6% del aporte sólido, con un caudal líquido del 23%. Esta disminución relativa podría explicarse por errores metodológicos, cambios en el manejo del suelo en la cuenca, el efecto de la represa de Salto Grande o una combinación de dichos factores.

Estos escasos antecedentes ponen de manifiesto la necesidad de conocimiento de la variación temporal del transporte de sedimentos. Así también, la concentración de la información asociada a la sección de Concepción del Uruguay, hace necesario disponer de herramientas para conocer la variabilidad espacial en el tramo que, como se ha visto hasta el momento, es significativa.

Para atender esta necesidad se cuenta con los ajustes de curva de gasto líquido y sólido, para cada una de las secciones estudiadas, presentados en el Capítulo 9. Con esta información, en aquellas secciones con buenos ajustes de las curvas $H-Q$, se construyeron los sedimentogramas (transporte de sedimentos en función del tiempo) y se estimaron las cargas anuales de cada componente.

10.1.3. Objetivo

A partir de lo expuesto, es objetivo de este capítulo atender los **Objetivos Específicos 6 y 7** de esta tesis, a través de la evaluación de los cambios en el transporte de sedimentos a lo largo del área de estudio, y de las variaciones en el transporte de sedimentos que se han registrado en los últimos 40 años. Vale resaltar que este período, que es en el cual se cuenta con datos validados (Junes, 2020), coincide con el período de operación de la Represa de Salto Grande.

10.2. Metodología

10.2.1. Análisis espacial y temporal

Para comprender las variaciones espaciales y temporales del transporte de sedimentos se contó con las curvas de gasto sólido, en diferentes secciones, obtenidas en el Capítulo 9.

Una evaluación comparativa de dichas curvas provee indicios de los procesos que ocurren en las distintas secciones. Por esto, se graficaron las curvas de gasto sólido construidas en una misma figura, y se evaluaron a la luz de la información geomorfológica disponible y la composición del lecho presentada (Capítulos 3 y 7)

En las secciones con curvas de descarga bien ajustadas, y con disponibilidad de series de tiempo de alturas limnimétricas, éstas se transformaron en caudal líquido, y posteriormente en caudal sólido, a partir de la aplicación de las expresiones disponibles. De esta manera se lograron calcular los hidrogramas y sedimentogramas para Nuevo Berlín, Casablanca, Colón y PGA y Puerto Yeruá. Nueva Palmira y Fray Bentos fueron descartadas por la dificultad en establecer una relación única entre altura y caudal; Liebig fue descartada por no abarcar 100% del caudal de la sección y Vertedero se descartó bajo la premisa de que el transporte allí es prácticamente nulo por la presencia de la represa.

Por otra parte, y con el objeto de conocer la carga media anual, se estimó para cada sección el caudal sólido de la fracción fina (G_w) a través de multiplicar el valor medio de concentración en la sección de Concepción del Uruguay (16.9 mg/L, ver apartado 9.3.1) por el caudal en cada sección.

Con la información de caudal líquido y sólido en estas secciones, se estimó la carga anual para cada sección. Este procedimiento consiste en la integración, a lo largo del año calendario, de los sedimentogramas disponibles, para cada una de las modalidades de transporte (G_s , G_{ss} , G_{sf} y G_w).

10.2.2. Análisis de frecuencia y caudal efectivo

Para contribuir a la comprensión de la dinámica del transporte de sedimentos en el río Uruguay, se utilizó la curva de frecuencia de niveles disponible para Colón, elaborada a partir de la serie de datos de alturas en el puerto (1980-2023). Esta curva fue convertida, mediante la curva $H-Q$ de Colón, en una curva de frecuencia de caudales. Con esta información, se aplicó el método de Schaffernak para estimar el caudal efectivo (Q_{ef}), explicado en Basile (2018) y Vilaseca (2019).

El caudal efectivo (Q_{ef}), es aquel que transporta la mayor parte del volumen anual de sedimentos, a través de un determinado tramo del río, durante un determinado número de años (*ídem*). El método de Schaffernak consiste en definir intervalos de caudal, y asociar a éstos una frecuencia relativa del incremental $f_r(Q)$. Luego, se calcula la curva de frecuencia de transporte de sedimentos como el producto entre $f_r(Q)$ y $G_s(Q)$, siendo el segundo factor la curva de gasto de sedimentos de fondo en la sección.

En la Figura 10.1, tomada del libro de Basile (2018), se muestran los factores que generan la curva de frecuencia de transporte de sedimentos $f_r(Q) * G_s(Q)$, como función del caudal líquido. Allí, el caudal efectivo es aquel caudal líquido que se corresponde con el

máximo valor de dicha curva. Esto implica que dicho caudal es el que produciría mayor movimiento de sedimentos en el año.

Con este mismo criterio, resulta de interés conocer los rangos de caudales que generan mayor movimiento de sedimentos. Para visualizar esta información se construyó la curva de frecuencia acumulada de transporte de sedimentos, dividiendo cada valor por el valor máximo acumulado; esto último a los efectos de contar con una frecuencia acumulada de transporte de sedimentos ponderada por la frecuencia de caudales. Finalmente, se graficó esta última frecuencia acumulada como función de la frecuencia acumulada de caudal.

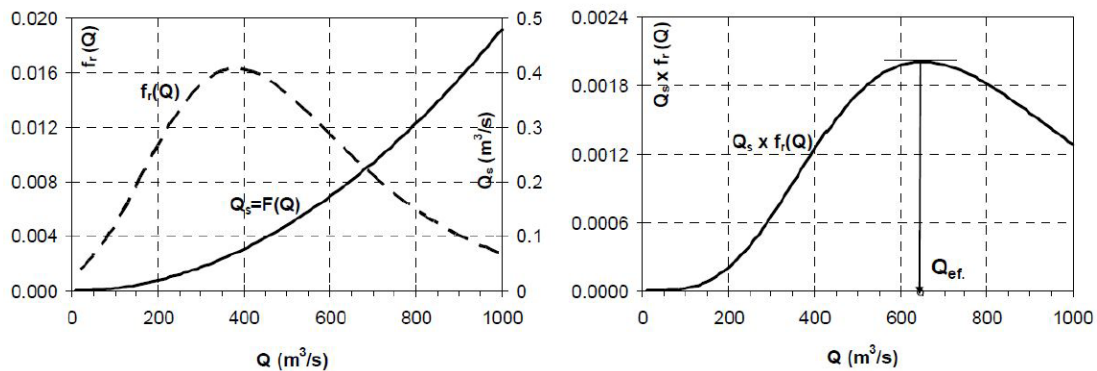


Figura 10.1.- Representación de la metodología para determinar el caudal efectivo, tomado de Basile (2018). $f_r(Q)$ representa la frecuencia de ocurrencia de los valores de la serie de caudales líquidos, $Q_s(Q)$ la relación entre caudal sólido y caudal líquido ($G_s - Q$).

10.3. Resultados y discusión

10.3.1. Análisis espacial de la situación actual

El tramo analizado comprende los 350 kilómetros desde el Hito de Punta Gorda, que separa el río Uruguay del Río de la Plata, y la Represa de Salto Grande.

En el recorrido de este tramo, desde aguas arriba hacia aguas abajo, se comienza en la represa. Allí, el transporte de sedimentos de fondo (G_s) es prácticamente nulo como lo indican los antecedentes publicados por la Comisión Técnica Mixta de Salto Grande (1995). Desde allí hacia aguas abajo se construyeron en el capítulo anterior las curvas de gasto sólido del sedimento mayor a 62 micrones (arenas). Estas curvas se obtuvieron para la porción de sedimentos que se desplaza por el fondo (G_{sf}) y la parte que se transporta en suspensión (G_{ss}), así como también la suma de ambos mecanismos (G_s). En la Figura 10.2, Figura 10.3 y Figura 10.4 se muestran todas las curvas obtenidas a lo largo del área de estudio para G_s , G_{sf} y G_{ss} respectivamente.

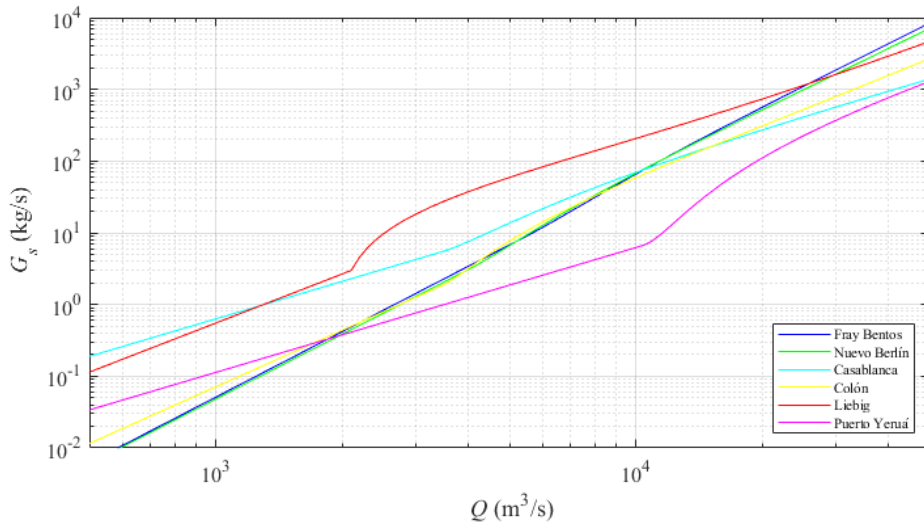


Figura 10.2.- Curvas de gasto sólido de fondo total (G_s).

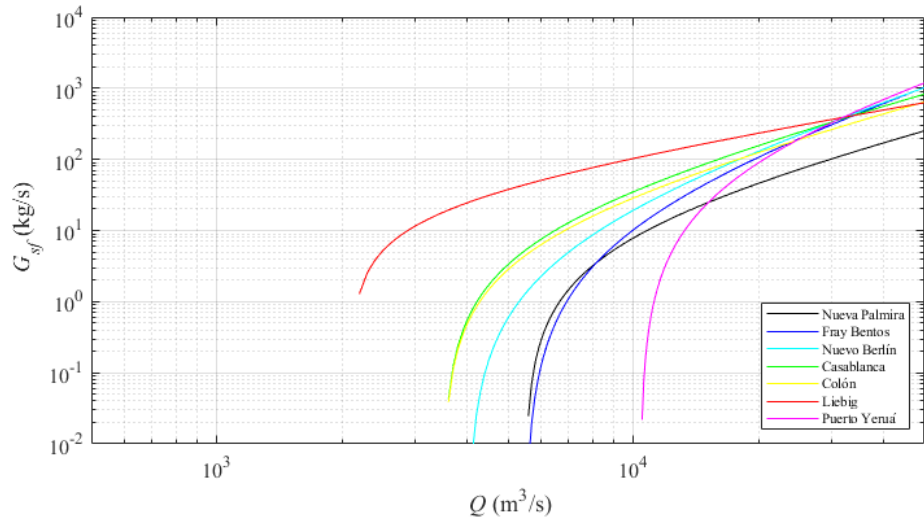


Figura 10.3.- Curvas de gasto sólido por el fondo (G_{sf}).

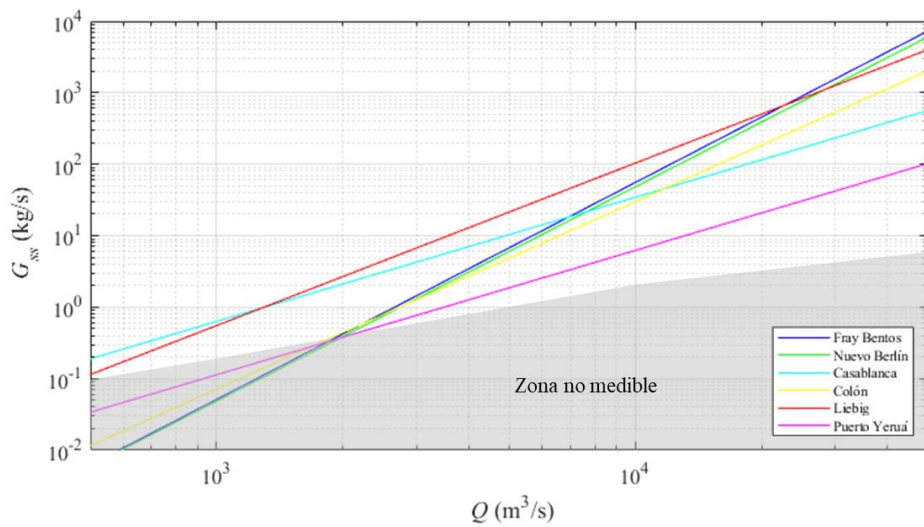


Figura 10.4.- Curvas de gasto sólido de fondo en suspensión (G_{ss}).

Si bien se podrían realizar complejas lecturas respecto de las figuras, sus valores absolutos, los cruces de las curvas en los diversos tramos de caudal, entre otras interpretaciones, la dispersión de los resultados individuales y la incertidumbre de los ajustes pueden resultar en conclusiones erróneas. Por este motivo, se puede señalar inequívocamente para las tres figuras precedentes:

- 1) Desde aguas arriba hacia aguas abajo se registra un aumento progresivo del transporte de fondo (G_{sf}) desde Vertedero, con un valor supuesto de 0 kg/s, hasta la sección Colón, desde allí el transporte desciende.
- 2) Para el transporte por el fondo (G_{sf}), existe un valor límite de caudal que no generaría las suficientes tensiones de corte en el fondo para movilizar el lecho. En la Tabla 10.1 se muestra el caudal líquido ($Q_{G_{sf}=0}$) que, para cada sección, no produce una movilización generalizada de sedimentos. Este concepto sería homólogo a la iniciación de movimiento de Shields, pero integrado en la sección transversal. Lo exhibido en la tabla denota que existe un área entre Colón y Nuevo Berlín, donde los sedimentos de fondo se movilizan con mayor facilidad, y para caudales menores al módulo. Esta zona coincide con la zona donde se calculó la mayor capacidad de transporte (ver Figura 8.22 y Figura 8.23). Estos caudales, del orden de 3.500 m³/s, tendrían asociada una permanencia del 55% del tiempo según se concluyó en el capítulo anterior.

Tabla 10.1.- Caudal líquido para el cual el transporte de fondo (G_{sf}) es nulo.

Sección	$Q_{G_{sf}=0}$ (m³/s)
Nueva Palmira	5.500
Fray Bentos	5.500
Nuevo Berlín	4.000
Casablanca	3.500
Colón y Puente General	3.500
Artigas	3.500
Liebig	2.100
Puerto Yeruá	10.400

- 3) La situación descrita en el punto 2 debería replicarse, en términos teóricos, para el transporte en suspensión. Es decir que no se espera resuspensión de sedimentos para valores de caudal menores a los necesarios para movilizar las partículas del fondo. Nótese que, a través de mediciones en campo con métodos tradicionales, se han medido valores de G_{ss} nulos para caudales mayores a los 2.000 m³/s (López Weibel,

2023). Esto refuerza la existencia de un valor de caudal líquido límite (mayor al límite para generar G_{sf}) que produciría un caudal sólido en suspensión.

Vale aclarar además que, dada la presencia de partículas en suspensión que no son sedimentos clásticos, la técnica acústica siempre detecta una señal de retorno que la metodología descrita en Capítulo 6 interpreta como sedimento. Por esta razón, para caudales bajos con escaso o nulo material de sedimentos gruesos en suspensión, se estimaron caudales sólidos por debajo de los límites de movilidad planteados para G_{sf} .

Complementariamente a las figuras anteriores, se muestra a continuación la relación entre el transporte que circula por el fondo (G_{sf}) con el transporte de arenas total (G_s). Esta figura va desde 0 a 1 en el eje de ordenadas. Un valor de 0 indica que el transporte de fondo se da completamente en suspensión, un valor de 1 indica que todo el material se transporta por el fondo, y 0,5 indica la paridad entre los dos mecanismos de transporte de arenas.

En la siguiente figura se observa que las relaciones se estabilizan en valores que rondan los 0.15 a 0.3. Lo que implica que el transporte de sedimentos de fondo, correspondiente a la fracción de arenas, se moviliza preponderantemente en suspensión. Son excepción a esta regla Puerto Yeruá, dada la presencia de la presa y el sedimento gravoso del lecho, el transporte predominante se da por el fondo. También escapa a esta regla la sección Casablanca; esto se podría explicar por la diferencia metodológica del dato adoptado para el transporte en suspensión. En este caso, el ajuste para el transporte en suspensión se hizo sobre los datos medidos por la Subsecretaría de Infraestructura y Política Hídrica de Argentina (2022), y no sobre los estimados con ASETSM9.

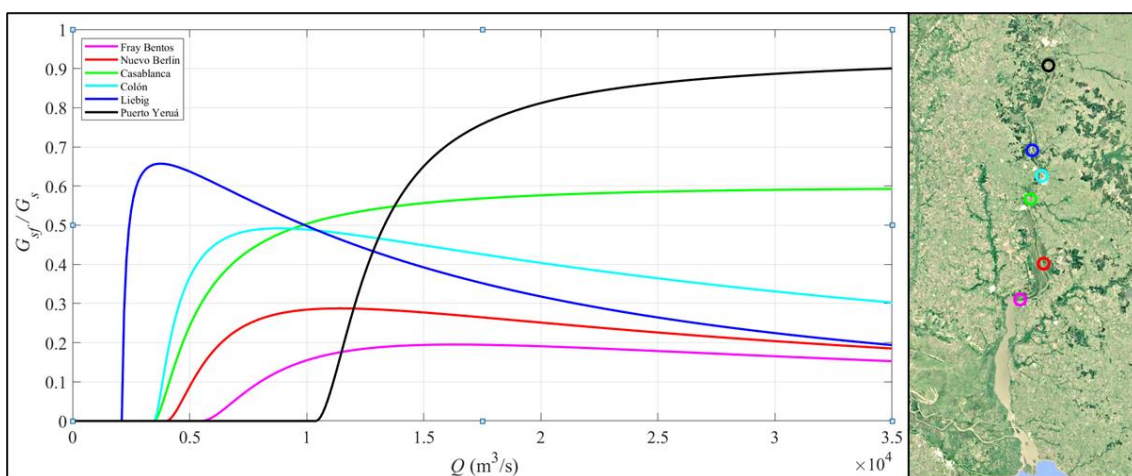


Figura 10.5.- Relación de transporte de fondo por el fondo y el transporte de fondo total (G_{sf}/G_s).

10.3.2. Series de tiempo

Se presentan las series de tiempo de alturas limnimétricas (H), caudales (Q), transporte de fondo (G_{sf}), transporte de material de fondo en suspensión (G_{ss}) en la Figura 10.6, Figura 10.7, Figura 10.8 y Figura 10.9. Estas series corresponden a Nuevo Berlín, Casablanca, Colón y PGA, y Puerto Yeruá, respectivamente. En contraposición al apartado anterior, Fray Bentos no fue considerado, al no haberse logrado un buen ajuste de la curva $H-Q$.

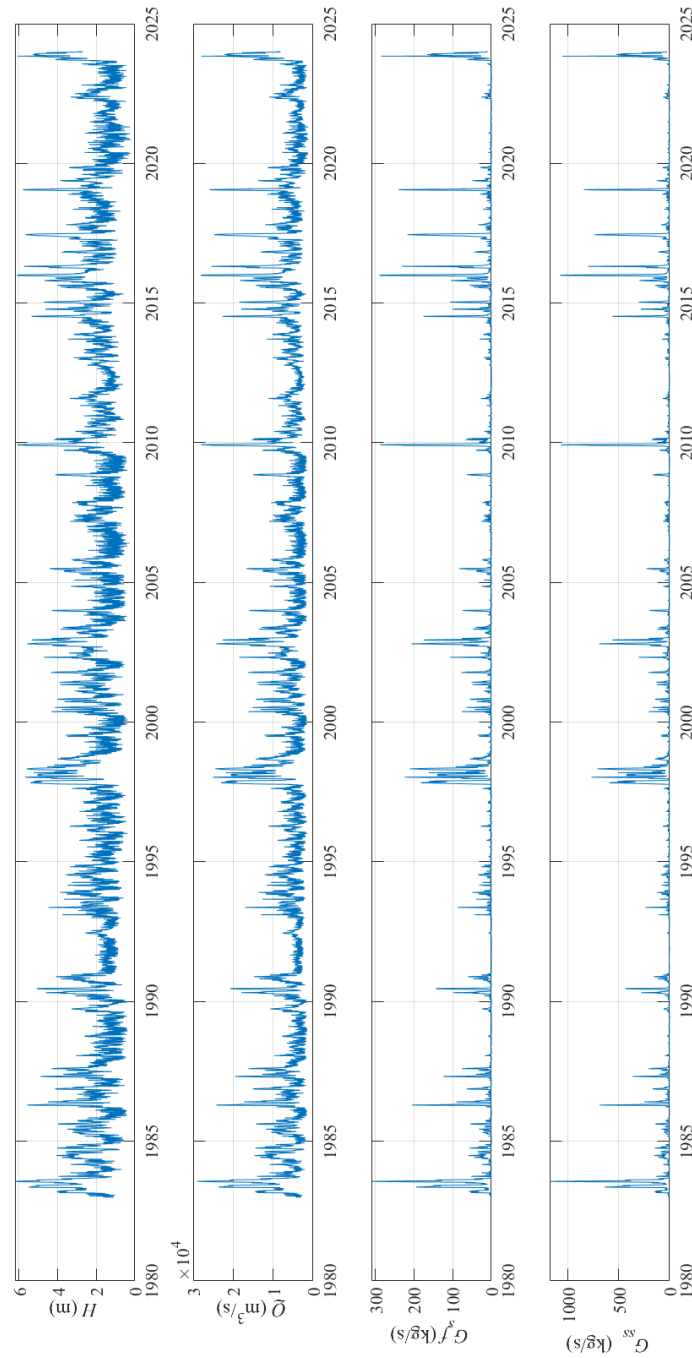


Figura 10.6.- Series de tiempo para Nuevo Berlín.

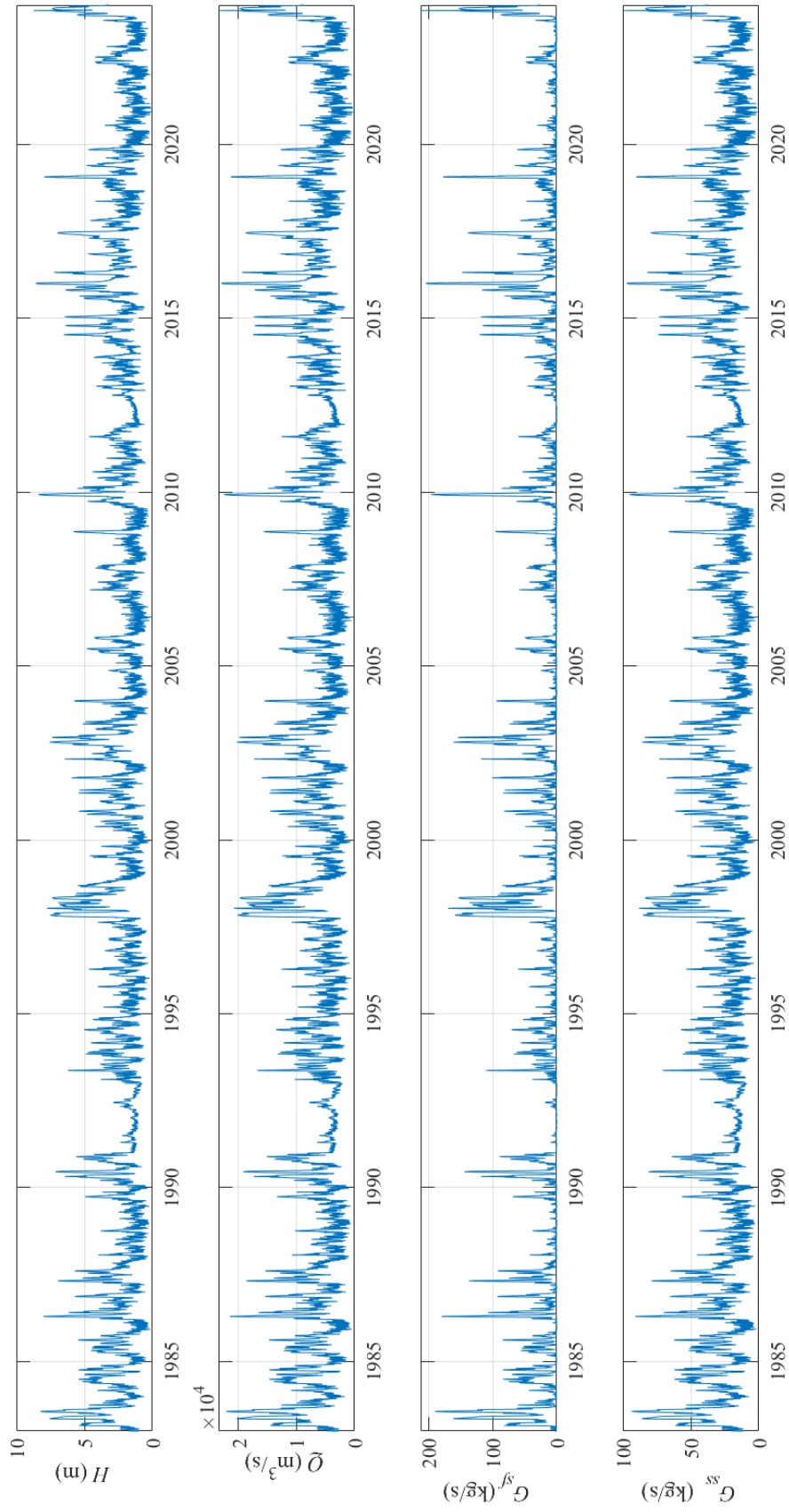


Figura 10.7.- Series de tiempo para Casablanca.

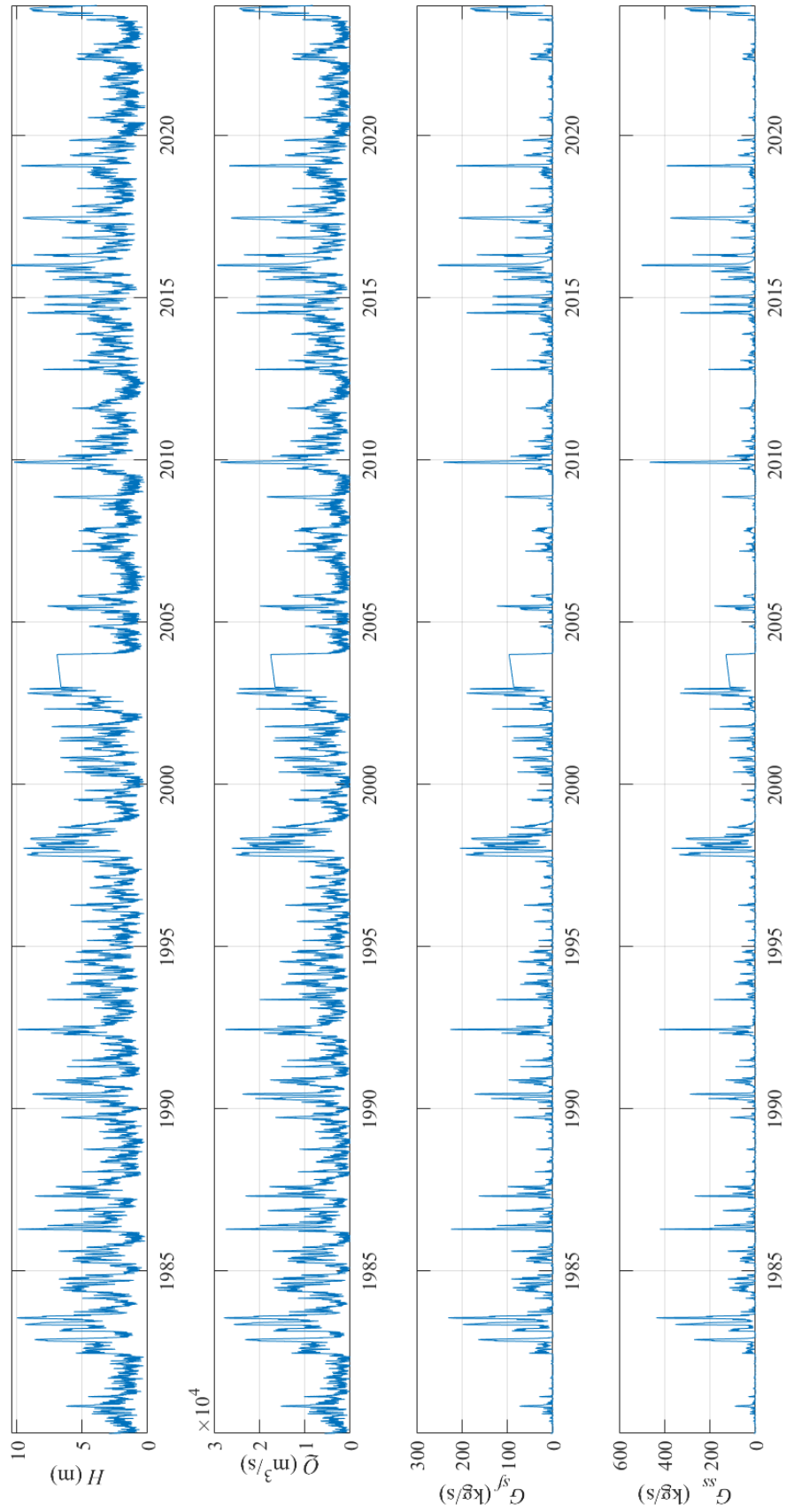


Figura 10.8.- Series de tiempo para Colón y PGA.

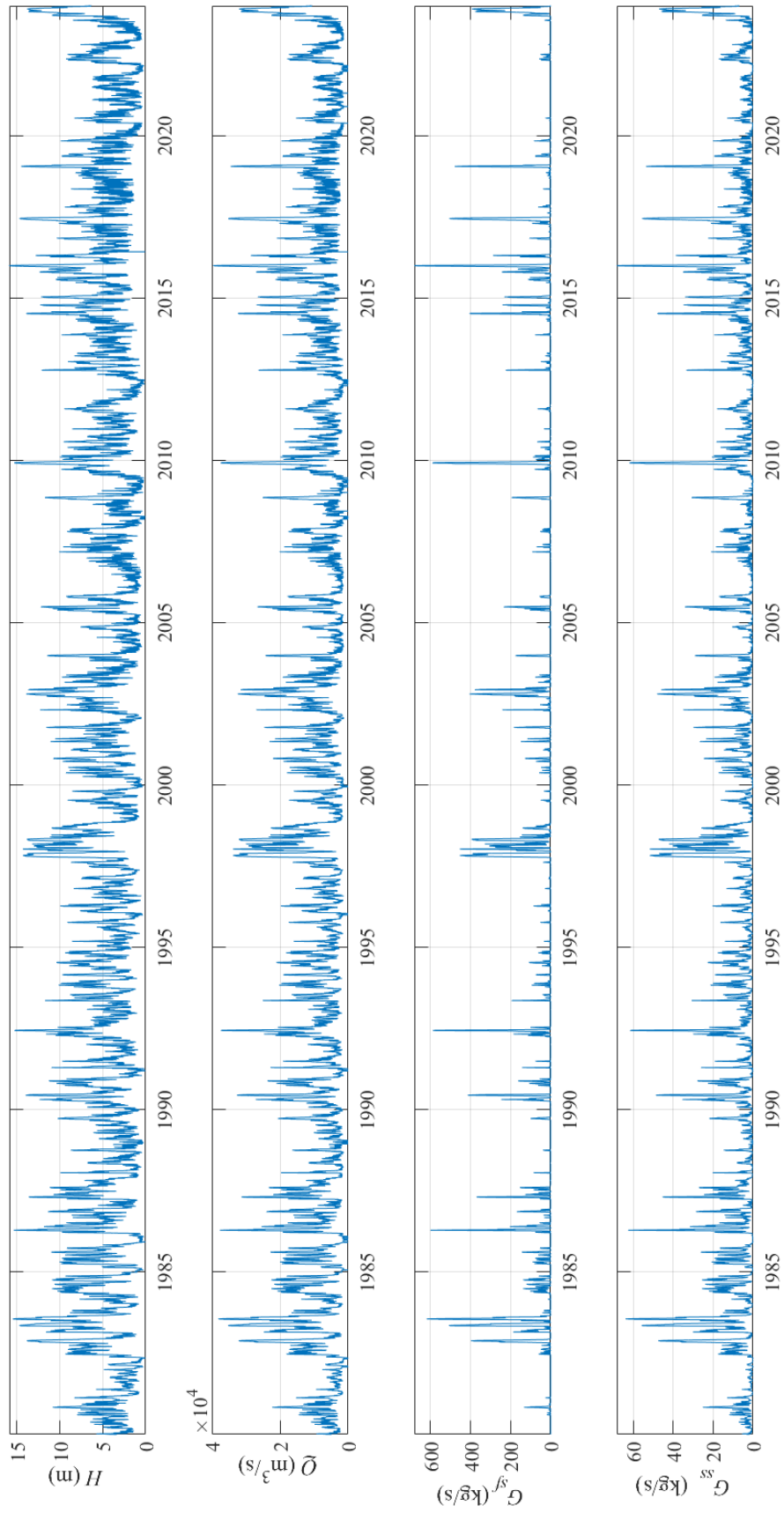


Figura 10.9.- Series de tiempo para Puerto Yeruá.

Se observa de las figuras la respuesta del transporte de sedimentos a los distintos escenarios hidrológicos observados en la cuenca. La clara dinámica de pulsos para todas las secciones, como respuesta a los picos de crecida y operación de la presa, muestra la necesidad de prestar atención a los fenómenos climáticos tropicales. Estos tienen un impacto significativo en los patrones climáticos, afectando a corto y mediano plazo los caudales de los principales afluentes de la Cuenca del Plata, como por ejemplo como el ENSO y la Oscilación Madden-Julien. Este comportamiento de exageración de los procesos de transporte con los valores hidrológicos máximos puede explicarse en la naturaleza potencial del transporte de sedimentos, manifestada a través de las expresiones matemáticas de las curvas de transporte.

Sin menoscabo de lo expresado, vale aclarar que no existen tendencias sistemáticas visibles en las series medidas de altura, ni construidas de caudales líquidos y sólidos.

En la Tabla 10.2 se muestran los valores medios para las series graficadas en las figuras precedentes. En dicha tabla, la línea superior sobre la denominación de la variable exhibida denota valor medio a lo largo de la serie de datos disponibles.

Tabla 10.2.- Valores medios de transporte para las distintas secciones, de la serie 1980-2023.

Sección	$\overline{G_{sf}}$ (kg/s)	$\overline{G_{ss}}$ (kg/s)	$\overline{G_s}$ (kg/s)	\overline{Q} (m³/s)
Nuevo Berlín	9,1	28,4	37,5	5.747
Casablanca	15,8	26,1	42,0	6.188
Colón y PGA	16,6	22,6	39,2	5.853
Puerto Yerúa	18,0	5,8	23,7	7.864

10.3.3. Carga anual

La integral de la serie de transporte de sedimentos, independientemente del tipo de transporte, a lo largo del tiempo se denomina carga. Este valor, asociado al período de tiempo de un año se denomina carga anual. A continuación se presentan tabulados los cálculos de la carga anual y sus relaciones, para cada sección del apartado anterior, para cada año de la serie, junto con sus valores estadísticos representativos.

Tabla 10.3.- Carga anual en la sección Nuevo Berlín.

AÑO	Q (m ³ /s)	G_{sf} (Mton/año)	G_{ss} (Mton/año)	G_s (Mton/año)	G_{sf}/G_{ss}	G_{sf}/G_s	G_w	G_T (Mton/año)	G_w/G_T
1980									
1981									
1982									
1983	10270	1,30	4,01	5,31	0,32	0,24	5,47	10,78	0,51
1984	7026	0,32	0,88	1,20	0,36	0,27	3,74	4,94	0,76
1985	5539	0,16	0,49	0,65	0,33	0,25	2,95	3,60	0,82
1986	6802	0,44	1,32	1,76	0,34	0,25	3,62	5,39	0,67
1987	6120	0,28	0,81	1,09	0,34	0,25	3,26	4,35	0,75
1988	3647	0,02	0,12	0,14	0,17	0,14	1,94	2,08	0,93
1989	3824	0,04	0,16	0,20	0,24	0,20	2,04	2,24	0,91
1990	7314	0,44	1,26	1,71	0,35	0,26	3,90	5,60	0,70
1991	3506	0,00	0,07	0,07	0,01	0,01	1,87	1,94	0,96
1992	3841	0,01	0,11	0,12	0,10	0,09	2,05	2,17	0,95
1993	5946	0,18	0,56	0,74	0,33	0,25	3,17	3,91	0,81
1994	5538	0,13	0,41	0,54	0,31	0,24	2,95	3,50	0,84
1995	4040	0,02	0,14	0,16	0,15	0,13	2,15	2,31	0,93
1996	4419	0,05	0,20	0,25	0,22	0,18	2,36	2,60	0,91
1997	6750	0,60	1,86	2,46	0,32	0,25	3,60	6,06	0,59
1998	11249	1,38	4,04	5,42	0,34	0,25	6,00	11,42	0,53
1999	4173	0,05	0,19	0,24	0,24	0,19	2,22	2,47	0,90
2000	5346	0,19	0,55	0,74	0,35	0,26	2,85	3,59	0,79
2001	6262	0,22	0,64	0,86	0,33	0,25	3,34	4,20	0,80
2002	8891	0,84	2,44	3,27	0,34	0,26	4,74	8,01	0,59
2003	5807	0,20	0,58	0,77	0,34	0,25	3,09	3,87	0,80
2004	3783	0,04	0,17	0,22	0,25	0,20	2,02	2,23	0,90
2005	5605	0,23	0,65	0,88	0,35	0,26	2,99	3,86	0,77
2006	3232	0,01	0,07	0,08	0,08	0,07	1,72	1,80	0,96
2007	5568	0,11	0,37	0,48	0,29	0,23	2,97	3,45	0,86
2008	4090	0,09	0,30	0,39	0,31	0,24	2,18	2,57	0,85
2009	5845	0,55	1,82	2,37	0,30	0,23	3,12	5,48	0,57
2010	5685	0,15	0,48	0,63	0,32	0,24	3,03	3,66	0,83
2011	4996	0,06	0,26	0,32	0,24	0,19	2,66	2,98	0,89
2012	3888	0,02	0,12	0,14	0,14	0,12	2,07	2,21	0,94
2013	5263	0,08	0,30	0,38	0,26	0,20	2,81	3,18	0,88
2014	7027	0,38	1,14	1,52	0,33	0,25	3,74	5,27	0,71
2015	8170	0,70	2,08	2,78	0,34	0,25	4,35	7,13	0,61
2016	7615	0,61	1,92	2,53	0,32	0,24	4,06	6,59	0,62
2017	7724	0,60	1,86	2,46	0,32	0,24	4,12	6,57	0,63
2018	5239	0,08	0,30	0,37	0,26	0,20	2,79	3,17	0,88
2019	6940	0,44	1,41	1,85	0,31	0,24	3,70	5,55	0,67
2020	3448	0,01	0,09	0,10	0,10	0,09	1,84	1,94	0,95
2021	3637	0,01	0,09	0,10	0,08	0,08	1,94	2,04	0,95
2022	4606	0,06	0,24	0,31	0,26	0,21	2,45	2,76	0,89
2023	7113	0,74	2,19	2,93	0,34	0,25	3,79	6,72	0,56
PROMEDIO	5751	0,29	0,90	1,18	0,27	0,21	3,06	4,25	0,79
DESVIÓ	1859	0,34	1,00	1,33	0,09	0,06	0,99	2,29	0,14
MÁXIMO	11249	1,38	4,04	5,42	0,36	0,27	6,00	11,42	0,96
MÍNIMO	3232	0,00	0,07	0,07	0,01	0,01	1,72	1,80	0,51

En la sección Nuevo Berlín, 1,18 Mton/año fue el promedio de carga de fondo total (G_s). 21% de este último valor fue transportado por el lecho como G_{sf} . El rango para G_s se encontró entre 0,07 Mton/año registrado en 1991, y 5,42 Mton/año para 1998. La carga de lavado (G_w) alcanzó los 3,06 Mton/año, siendo este valor el 79% del transporte total de sedimentos promedio (G_T).

Tabla 10.4.- Carga anual en la sección Casablanca.

AÑO	Q (m ³ /s)	G_{sf} (Mton/año)	G_{ss} (Mton/año)	G_s (Mton/año)	G_{sf}/G_{ss}	G_{sf}/G_s	G_w	G_T (Mton/año)	G_w/G_T
1980									
1981									
1982									
1983	9748	1,38	1,30	2,68	1,07	0,52	5,20	7,88	0,66
1984	7764	0,74	1,03	1,78	0,72	0,42	4,14	5,91	0,70
1985	6157	0,45	0,82	1,27	0,55	0,36	3,28	4,56	0,72
1986	7356	0,77	0,98	1,75	0,79	0,44	3,92	5,67	0,69
1987	6875	0,61	0,92	1,52	0,66	0,40	3,66	5,19	0,71
1988	3965	0,12	0,53	0,64	0,22	0,18	2,11	2,76	0,77
1989	4350	0,17	0,58	0,75	0,30	0,23	2,32	3,07	0,75
1990	8138	0,87	1,08	1,95	0,80	0,45	4,34	6,29	0,69
1991	3862	0,02	0,51	0,54	0,05	0,04	2,06	2,60	0,79
1992	3958	0,05	0,53	0,58	0,10	0,09	2,11	2,69	0,78
1993	6562	0,48	0,87	1,35	0,55	0,35	3,50	4,85	0,72
1994	6402	0,45	0,85	1,30	0,52	0,34	3,41	4,71	0,72
1995	4408	0,12	0,59	0,71	0,21	0,17	2,35	3,06	0,77
1996	4995	0,21	0,67	0,88	0,32	0,24	2,66	3,54	0,75
1997	6997	0,79	0,93	1,72	0,85	0,46	3,73	5,45	0,68
1998	11029	1,67	1,47	3,14	1,14	0,53	5,88	9,02	0,65
1999	4494	0,17	0,60	0,77	0,28	0,22	2,40	3,16	0,76
2000	5443	0,34	0,72	1,07	0,47	0,32	2,90	3,97	0,73
2001	7100	0,56	0,95	1,51	0,59	0,37	3,78	5,29	0,72
2002	9255	1,22	1,23	2,45	0,99	0,50	4,93	7,38	0,67
2003	6434	0,48	0,86	1,34	0,56	0,36	3,43	4,77	0,72
2004	3970	0,11	0,53	0,63	0,20	0,17	2,12	2,75	0,77
2005	5626	0,35	0,75	1,10	0,47	0,32	3,00	4,10	0,73
2006	3306	0,03	0,44	0,47	0,08	0,07	1,76	2,24	0,79
2007	6301	0,39	0,84	1,23	0,47	0,32	3,36	4,59	0,73
2008	4560	0,21	0,61	0,82	0,35	0,26	2,43	3,25	0,75
2009	5944	0,64	0,79	1,43	0,81	0,45	3,17	4,60	0,69
2010	6625	0,47	0,88	1,35	0,53	0,35	3,53	4,88	0,72
2011	5808	0,30	0,77	1,07	0,38	0,28	3,10	4,17	0,74
2012	4243	0,08	0,56	0,65	0,14	0,13	2,26	2,91	0,78
2013	6214	0,36	0,83	1,19	0,43	0,30	3,31	4,50	0,74
2014	7619	0,69	1,01	1,70	0,68	0,40	4,06	5,76	0,70
2015	8667	1,06	1,15	2,22	0,92	0,48	4,62	6,84	0,68
2016	8176	0,83	1,09	1,92	0,76	0,43	4,36	6,27	0,69
2017	8435	0,89	1,12	2,01	0,79	0,44	4,50	6,51	0,69
2018	5702	0,28	0,76	1,04	0,37	0,27	3,04	4,08	0,74
2019	7226	0,67	0,96	1,63	0,70	0,41	3,85	5,48	0,70
2020	3702	0,08	0,49	0,57	0,16	0,14	1,97	2,54	0,78
2021	3842	0,07	0,51	0,58	0,14	0,12	2,05	2,63	0,78
2022	5300	0,29	0,71	1,00	0,41	0,29	2,82	3,82	0,74
2023	7318	0,99	0,97	1,96	1,01	0,50	3,90	5,86	0,67
PROMEDIO	6192	0,50	0,82	1,32	0,53	0,32	3,30	4,62	0,73
DESvíO	1835	0,39	0,24	0,63	0,29	0,13	0,98	1,61	0,04
MÁXIMO	11029	1,67	1,47	3,14	1,14	0,53	5,88	9,02	0,79
MÍNIMO	3306	0,02	0,44	0,47	0,05	0,04	1,76	2,24	0,65

En Casablanca se registró una carga de fondo promedio (G_s) de 1,32 Mton/año, de los cuales el 32% se transportó como carga de fondo (G_{sf}). Los máximos coinciden con las demás secciones, siendo el valor mayor el del año 1998 con 3,14 Mton/año. El mínimo observado tiene un valor de 470.000 toneladas al año, y corresponde al año 2006.

La carga de lavado promedio fue de 3,3 Mton/año, siendo este valor el 73% de la carga total media anual.

Tabla 10.5.- Carga anual en la sección Colón y Puente General Artigas.

AÑO	Q (m ³ /s)	G_{sf} (Mton/año)	G_{ss} (Mton/año)	G_s (Mton/año)	G_{sf} / G_{ss}	G_{sf} / G_s	G_w	G_T (Mton/año)	G_w / G_T
1980	4214	0,17	0,22	0,39	0,78	0,44	2,25	2,63	0,85
1981	2545	0,03	0,05	0,08	0,53	0,35	1,36	1,44	0,94
1982	6279	0,62	0,82	1,44	0,75	0,43	3,35	4,78	0,70
1983	9958	1,40	2,08	3,48	0,67	0,40	5,31	8,79	0,60
1984	7440	0,67	0,79	1,46	0,84	0,46	3,96	5,43	0,73
1985	5446	0,38	0,44	0,82	0,86	0,46	2,90	3,72	0,78
1986	7091	0,74	1,02	1,76	0,72	0,42	3,78	5,54	0,68
1987	6471	0,55	0,72	1,27	0,78	0,44	3,45	4,72	0,73
1988	2881	0,08	0,10	0,18	0,77	0,44	1,54	1,71	0,90
1989	3747	0,17	0,22	0,38	0,78	0,44	2,00	2,38	0,84
1990	8045	0,83	1,08	1,90	0,77	0,43	4,29	6,19	0,69
1991	3197	0,11	0,14	0,24	0,78	0,44	1,70	1,95	0,88
1992	7149	0,71	0,99	1,70	0,71	0,42	3,81	5,51	0,69
1993	5853	0,38	0,45	0,83	0,83	0,45	3,12	3,95	0,79
1994	5752	0,37	0,43	0,80	0,86	0,46	3,07	3,87	0,79
1995	3243	0,07	0,10	0,17	0,68	0,40	1,73	1,90	0,91
1996	4117	0,15	0,19	0,34	0,79	0,44	2,19	2,53	0,87
1997	6753	0,83	1,28	2,10	0,65	0,39	3,60	5,70	0,63
1998	11686	1,69	2,38	4,07	0,71	0,42	6,23	10,30	0,60
1999	3463	0,12	0,15	0,27	0,78	0,44	1,85	2,11	0,87
2000	5036	0,35	0,42	0,77	0,85	0,46	2,68	3,46	0,78
2001	6612	0,46	0,55	1,01	0,82	0,45	3,52	4,54	0,78
2002	9470	1,21	1,66	2,87	0,73	0,42	5,05	7,92	0,64
2003	17025	2,88	3,81	6,69	0,75	0,43	9,07	15,76	0,58
2004	2847	0,09	0,12	0,21	0,75	0,43	1,52	1,72	0,88
2005	5397	0,45	0,56	1,01	0,80	0,44	2,88	3,88	0,74
2006	2031	0,01	0,03	0,04	0,40	0,29	1,08	1,13	0,96
2007	5503	0,28	0,32	0,60	0,87	0,47	2,93	3,53	0,83
2008	3599	0,19	0,26	0,45	0,72	0,42	1,92	2,36	0,81
2009	5479	0,66	1,03	1,69	0,64	0,39	2,92	4,61	0,63
2010	5873	0,35	0,41	0,77	0,86	0,46	3,13	3,90	0,80
2011	4821	0,19	0,23	0,41	0,82	0,45	2,57	2,98	0,86
2012	3179	0,17	0,23	0,40	0,75	0,43	1,69	2,09	0,81
2013	5370	0,24	0,29	0,53	0,85	0,46	2,86	3,39	0,84
2014	7445	0,66	0,88	1,54	0,75	0,43	3,97	5,51	0,72
2015	8789	1,08	1,53	2,61	0,71	0,41	4,68	7,30	0,64
2016	7352	0,72	1,02	1,74	0,71	0,41	3,92	5,65	0,69
2017	8009	0,86	1,24	2,10	0,69	0,41	4,27	6,37	0,67
2018	4711	0,18	0,22	0,39	0,82	0,45	2,51	2,90	0,86
2019	6703	0,60	0,86	1,46	0,70	0,41	3,57	5,04	0,71
2020	2556	0,04	0,06	0,11	0,64	0,39	1,36	1,47	0,93
2021	2802	0,04	0,07	0,11	0,59	0,37	1,49	1,60	0,93
2022	4502	0,24	0,27	0,51	0,87	0,46	2,40	2,91	0,83
2023	7269	1,08	1,62	2,70	0,67	0,40	3,87	6,57	0,59
PROMEDIO	5968	0,54	0,74	1,28	0,75	0,43	3,18	4,46	0,77
DESVIÓ	2824	0,55	0,76	1,31	0,09	0,03	1,50	2,79	0,11
MÁXIMO	17025	2,88	3,81	6,69	0,87	0,47	9,07	15,76	0,96
MÍNIMO	2031	0,01	0,03	0,04	0,40	0,29	1,08	1,13	0,58

En Colón, el transporte promedio de material de fondo (G_s) fue de 1,15 Mton/año, siendo el 43% transportado por el fondo (G_{sf}). También los máximos se corresponden con los años 1983 y 1998, siendo el segundo el mayor con 4,07 Mton/año. Los mínimos se dieron en 2020-2021, con 110.000 ton/año.

La carga de lavado (G_w) promedio fue de 3,03 Mton/año, siendo este valor el 77% de la carga total (G_T) promedio.

Tabla 10.6.- Carga anual en la sección Puerto Yeruá.

AÑO	Q (m ³ /s)	G_{sf} (Mton/año)	G_{ss} (Mton/año)	G_s (Mton/año)	G_{sf}/G_{ss}	G_{sf}/G_s	G_w	G_T (Mton/año)	G_w/G_T
1980	7153	0,13	0,13	0,26	0,99	0,50	3,81	4,07	0,94
1981	3993	0,01	0,05	0,06	0,19	0,16	2,13	2,18	0,97
1982	8970	0,87	0,24	1,11	3,68	0,79	4,78	5,89	0,81
1983	13302	2,49	0,44	2,92	5,70	0,85	7,09	10,01	0,71
1984	10100	0,67	0,25	0,92	2,69	0,73	5,38	6,30	0,85
1985	8010	0,43	0,18	0,62	2,36	0,70	4,27	4,89	0,87
1986	9948	1,10	0,27	1,37	4,07	0,80	5,30	6,67	0,79
1987	9360	0,68	0,23	0,91	3,00	0,75	4,99	5,90	0,85
1988	4358	0,03	0,06	0,09	0,48	0,33	2,32	2,42	0,96
1989	5475	0,11	0,09	0,20	1,20	0,55	2,92	3,12	0,94
1990	11185	1,02	0,29	1,32	3,47	0,78	5,96	7,28	0,82
1991	4781	0,06	0,07	0,13	0,80	0,45	2,55	2,68	0,95
1992	9981	0,97	0,26	1,23	3,79	0,79	5,32	6,55	0,81
1993	8066	0,23	0,16	0,40	1,43	0,59	4,30	4,70	0,92
1994	8412	0,26	0,18	0,43	1,47	0,60	4,48	4,92	0,91
1995	5057	0,03	0,07	0,10	0,40	0,29	2,70	2,80	0,96
1996	6434	0,06	0,11	0,18	0,59	0,37	3,43	3,60	0,95
1997	9609	1,50	0,28	1,78	5,36	0,84	5,12	6,90	0,74
1998	15492	2,53	0,50	3,03	5,03	0,83	8,26	11,29	0,73
1999	5049	0,04	0,08	0,12	0,54	0,35	2,69	2,81	0,96
2000	6858	0,23	0,14	0,37	1,64	0,62	3,66	4,02	0,91
2001	8922	0,32	0,19	0,51	1,67	0,63	4,75	5,26	0,90
2002	12317	1,57	0,36	1,93	4,32	0,81	6,56	8,49	0,77
2003	7766	0,28	0,16	0,43	1,74	0,64	4,14	4,57	0,90
2004	4146	0,04	0,06	0,09	0,62	0,38	2,21	2,30	0,96
2005	7109	0,47	0,16	0,64	2,94	0,75	3,79	4,43	0,86
2006	3034	0,00	0,03	0,03	0,02	0,02	1,62	1,65	0,98
2007	7416	0,12	0,14	0,26	0,84	0,46	3,95	4,21	0,94
2008	5062	0,24	0,09	0,34	2,60	0,72	2,70	3,04	0,89
2009	7656	1,09	0,22	1,30	5,02	0,83	4,08	5,38	0,76
2010	7908	0,19	0,16	0,34	1,17	0,54	4,21	4,56	0,92
2011	6840	0,06	0,12	0,17	0,47	0,32	3,65	3,82	0,95
2012	4225	0,15	0,07	0,23	2,09	0,68	2,25	2,48	0,91
2013	7464	0,08	0,14	0,21	0,56	0,36	3,98	4,19	0,95
2014	10590	0,73	0,26	0,99	2,81	0,74	5,64	6,64	0,85
2015	11968	1,54	0,35	1,89	4,45	0,82	6,38	8,26	0,77
2016	9126	0,73	0,22	0,95	3,37	0,77	4,86	5,81	0,84
2017	11123	1,21	0,30	1,51	4,05	0,80	5,93	7,44	0,80
2018	7069	0,04	0,12	0,16	0,29	0,22	3,77	3,93	0,96
2019	9454	0,73	0,23	0,96	3,22	0,76	5,04	6,00	0,84
2020	4201	0,01	0,06	0,06	0,13	0,11	2,24	2,30	0,97
2021	4497	0,00	0,06	0,06	0,00	0,00	2,40	2,46	0,98
2022	6703	0,12	0,13	0,25	0,90	0,47	3,57	3,82	0,93
2023	10036	1,79	0,32	2,11	5,67	0,85	5,35	7,45	0,72
PROMEDIO	7954	0,58	0,19	0,77	2,27	0,58	4,24	5,01	0,88
DESvíO	2811	0,67	0,11	0,78	1,75	0,24	1,50	2,22	0,08
MÁXIMO	15492	2,53	0,50	3,03	5,70	0,85	8,26	11,29	0,98
MÍNIMO	3034	0,00	0,03	0,03	0,00	0,00	1,62	1,65	0,71

Se advierte que el río Uruguay, a la altura de la sección Puerto Yeruá, transportó en promedio un caudal sólido total de material de fondo (G_s) de 770.000 toneladas al año. De ese total, el 58 % es carga de fondo (G_{sf}) y el resto es sedimento de fondo en suspensión (G_{ss}). Se destacan como valores extremos máximos los años 1983 y 1998, con 3 millones de toneladas al año, y los mínimos en los años 1981, 2006 y 2020-2021, con algunas decenas de miles de toneladas al año. Los máximos coinciden con algunos eventos extremos positivos del fenómeno ENSO.

En esta sección, la carga de lavado se estimó en 4,24 millones de toneladas al año, siendo esta el 88% de la carga total de sedimentos.

Como resumen gráfico de lo tabulado hasta aquí, en la Figura 10.10 se muestra la carga total calculada, en cada sección, en el período 1980 – 2023. También se muestra el valor medio de todas las secciones para cada año (Media anual), y el valor medio de la serie, junto con el caudal en la Sección Colón.

De lo anterior se observa que el transporte predominante en términos volumétricos es la carga de lavado. La misma ocupa en promedio un 79% de la carga total (G_T), totalizando alrededor de 3 millones de toneladas anuales.

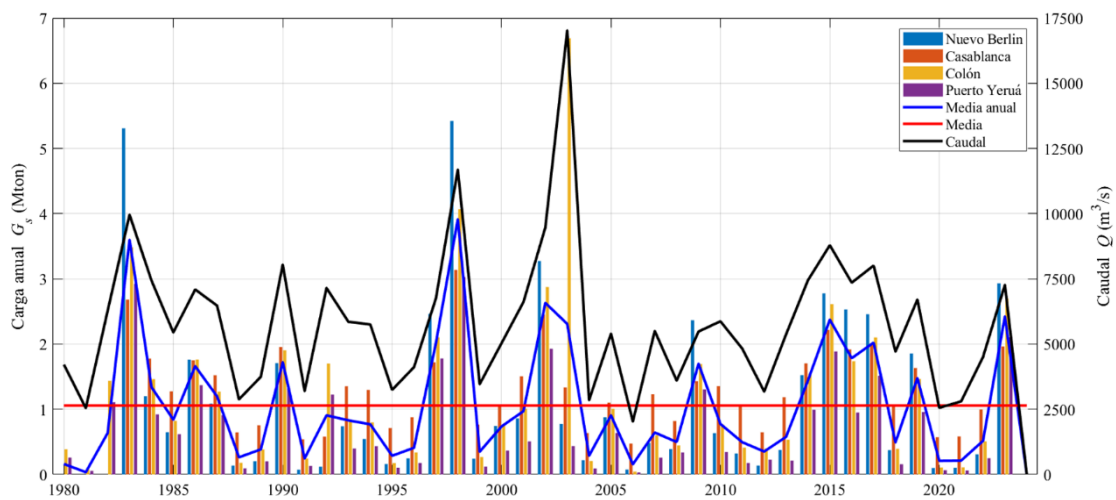


Figura 10.10.- Carga anual de transporte por el fondo, G_s .

A primera vista resalta la correspondencia entre los caudales medios anuales (línea negra) con el promedio de las cargas observadas en cada sección (línea azul). Además, se desprende que la sección con mayor caudal sólido cambia de acuerdo al caudal líquido. Por ejemplo, en el año 1998 (con caudales altos asociados al fenómeno de El Niño), Nuevo Berlín experimentó cargas muy altas, en contraposición a Colón y Casablanca que fueron menores. Sin embargo, en años de menores caudales, el caudal sólido se fue reduciendo hacia aguas abajo de Colón.

La tendencia espacial general, en los 40 años que corresponden al período 1983-2023, se puede inferir de la media de los valores de las figuras y tablas precedentes, expresados en la Tabla 10.7.

Tabla 10.7.- Carga anual promedio de transporte de sedimentos de fondo.

Sección	<i>Carga anual promedio</i> (millones de toneladas/año)				
	G_{sf}	G_{ss}	G_s	G_w	G_T
Nuevo Berlín	0,29	0,90	1,18	3,06	4,25
Casablanca	0,50	0,82	1,32	3,30	4,62
Colón y PGA	0,48	0,66	1,15	3,03	4,18
Puerto Yerúa	<i>0,58</i>	<i>0,19</i>	<i>0,77</i>	<i>4,24</i>	<i>5,01</i>
Promedio*	0,42	0,79	1,22	3,13	4,35

*los datos de Puerto Yerúa (*en cursiva*) no fueron considerados para el promedio.

Considerando que el mayor interés en términos de la navegabilidad se encuentra hacia aguas abajo de Colón, se observa que los valores medios se mantienen aproximadamente constantes para el transporte de fondo. Esto quiere decir que, de mantenerse estos valores medios en el tiempo, existiría una transferencia de material de aguas arriba hacia aguas abajo.

Si se tiene en cuenta que existe una barrera en el aporte de sedimentos impuesta por la represa de Salto Grande, los valores expuestos en la tabla resultarían de la erosión de los sedimentos disponibles en el tramo estudiado. Este proceso ha sido mencionado por distintos actores sociales, particularmente en el tramo desde la represa hasta el PN El Palmar. Las autoridades municipales de Concordia, Salto y Colón han responsabilizado a la operación de la represa por su pérdida de costas. Además, dueños de islas y terrenos costeros en el segmento del río, en entrevistas personales han manifestado y exhibido la pérdida de tierra en su propiedad.

Por otra parte, en la Tabla 10.7 se observa una disminución desde 0,48 Mton/año en Colón, hasta 0,29 Mton/año en Nuevo Berlín en el valor del transporte de fondo. Esto estaría directamente vinculado con la sedimentación en los pasos de navegación, del tramo Colón - Nuevo Berlín, que es la zona donde se registra mayor sedimentación. Además, esta zona coincide en parte con el delta interior holoceno desarrollado inmediatamente aguas abajo de Concepción del Uruguay (descrito por Iriondo & Kröhling, 2008).

Teniendo en cuenta lo expuesto por autores como Urien (1972) y el grupo de trabajo Laboratorio de Hidráulica del INA (Re, et al., 2009; Menéndez & Re, 2009; Re, et al., 2010), que no existe aporte de arenas desde el río Uruguay hacia el Río de la Plata, se puede asumir que esas 500.000 toneladas al año que circulan como transporte de fondo en la sección Colón, se depositarían en el tramo que va desde allí hasta Nueva Palmira. Considerando una densidad de depósito de 1,6 ton/m³ (2,65 ton/m³ correspondiente a arena de cuarzo, depositada con una porosidad del 40%), que es consistente con lo

registrado en las diferentes obras de dragado en el tramo del río Uruguay, se tiene que estas 500.000 ton/año se corresponden con 312.000 m³/año.

Este dato es de importancia superlativa, ya que el contrato de dragado basado en el Pliego de Bases y Condiciones de la Licitación Pública Internacional N° 01/22: Contratación de Trabajos de Dragado de Mantenimiento en el Río Uruguay entre el km 0 y el km 207,8, Incluido el Canal de Acceso al Puerto de Concepción del Uruguay (Comisión Administradora del Río Uruguay, 2022), previó un volumen de referencia anual de 650.000 m³/año, fruto de la experiencia de obras anteriores en años con crecidas.

En cuanto al transporte de sedimentos de fondo en suspensión, este aumenta hacia aguas abajo en el entorno medido. Esto sería un indicativo del mayor movimiento de sedimentos en el tramo Colón-Nuevo Berlín.

El valor de transporte total (G_T) promedio de 4,35 millones de toneladas anuales obtenido es consistente con lo reportado por Moreira & Simionato (2019), aunque menor que lo presentado por Urien (1972), cuyo valor fue de 6,94 millones de toneladas anuales (19.000 ton/día). Esto puede explicarse debido a los detalles particulares de la medición de Urien, a los cuales no se tuvo acceso, ser un efecto de la instalación de la represa de Salto Grande posterior a dichas mediciones, o una combinación de ambas causas.

10.3.4. Análisis de frecuencia de los caudales sólidos

En la Figura 10.11 y la Figura 10.12 se presentan las curvas de frecuencia acumulada de niveles y caudales asociadas al Puerto de Colón. Utilizando las curvas de gasto sólido para Colón, y el método de Schaffernak descripto, se construyó la curva de caudal vs. $f_r(Q) * G_s$ que se presenta en la Figura 10.13. En esta figura, según el método mencionado, el caudal efectivo es de 14.500 m³/s. Sin embargo, es menester señalar que existen dos picos secundarios de caudales que aportan significativamente a la carga media anual de sedimentos, uno cercano a los 9.500 m³/s y otro alrededor de los 23.500 m³/s.

Se calcularon también, para cada modalidad de transporte de sedimentos de fondo (G_{sf} , G_{ss} y G_s), la frecuencia acumulada de transporte de sedimentos ponderada por la frecuencia de caudales. Estas cantidades se graficaron como función de la frecuencia acumulada de caudal líquido en la sección Colón (Figura 10.14).

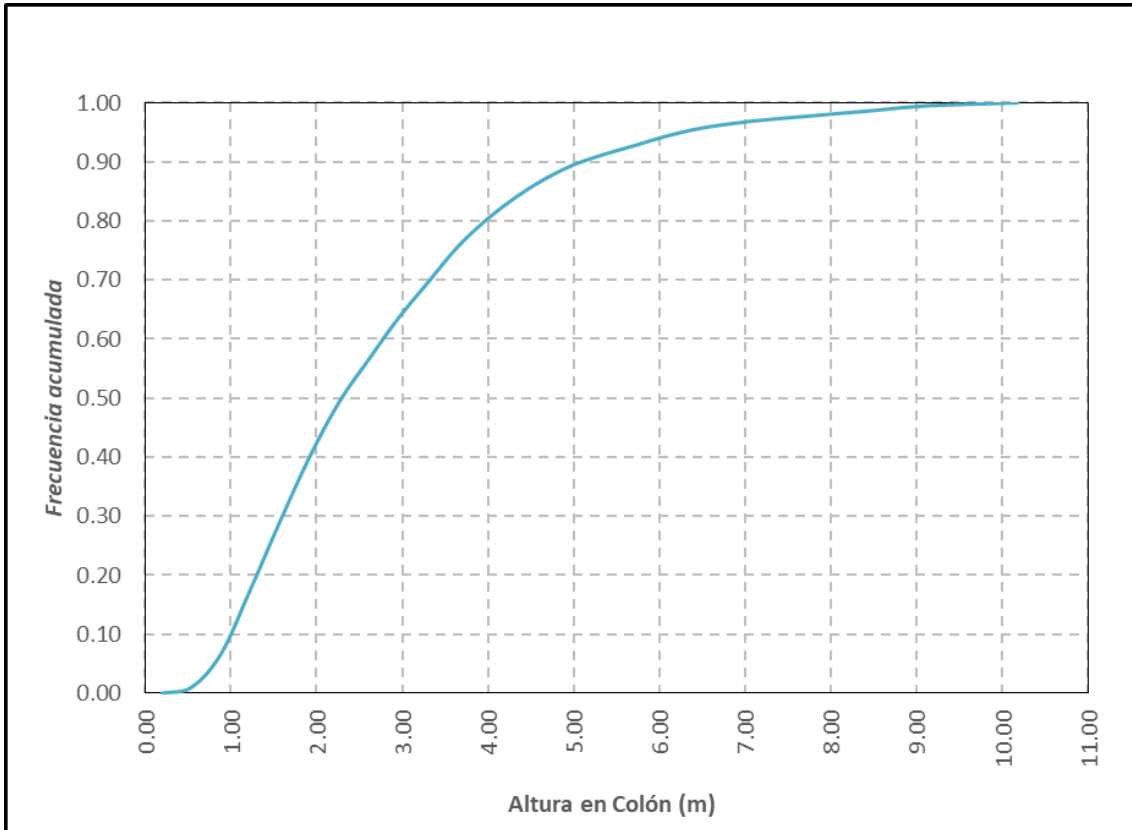


Figura 10.11.- Curva de frecuencia de niveles en el Puerto de Colón (Entre Ríos).

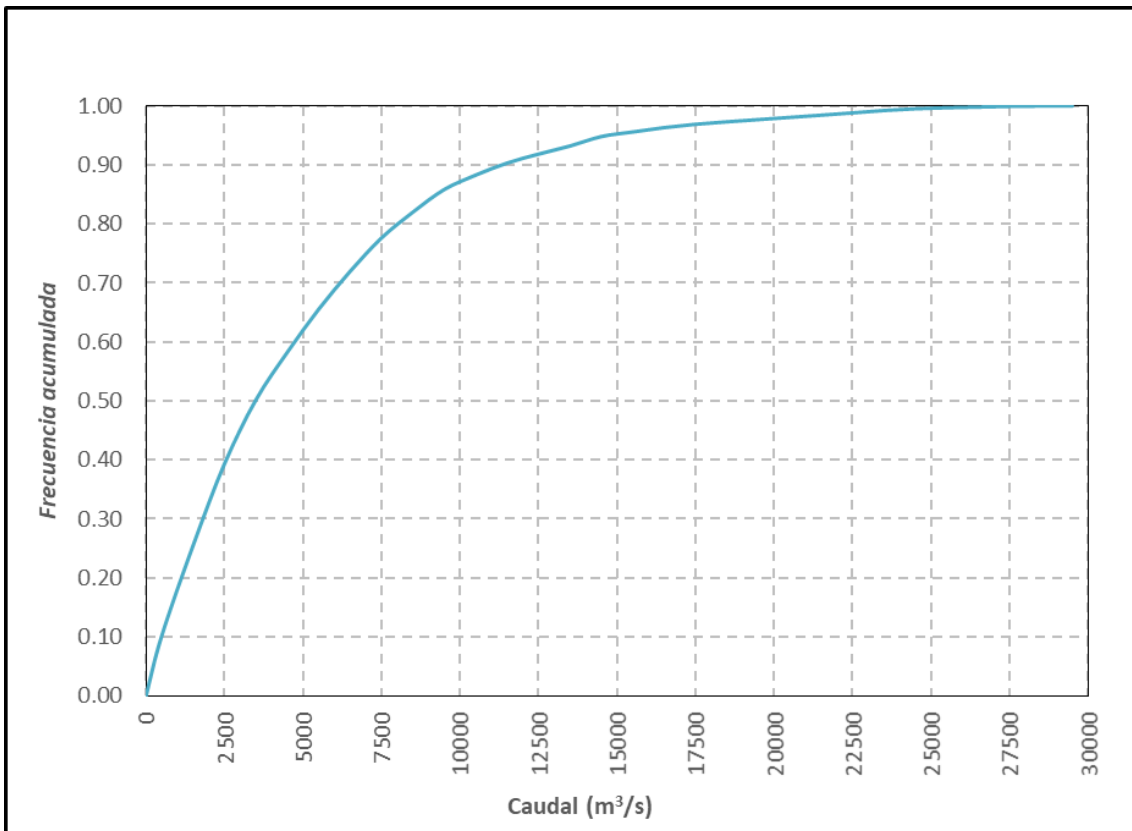


Figura 10.12.- Curva de frecuencia de caudales en el Puerto de Colón (Entre Ríos).

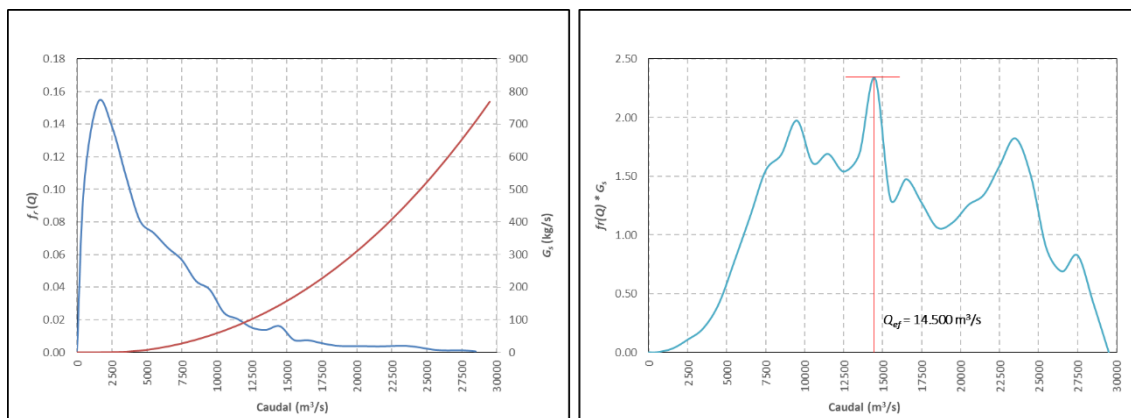


Figura 10.13.- Aplicación del método de Schaffernak para la determinación del caudal efectivo en la Sección Colón (Entre Ríos).

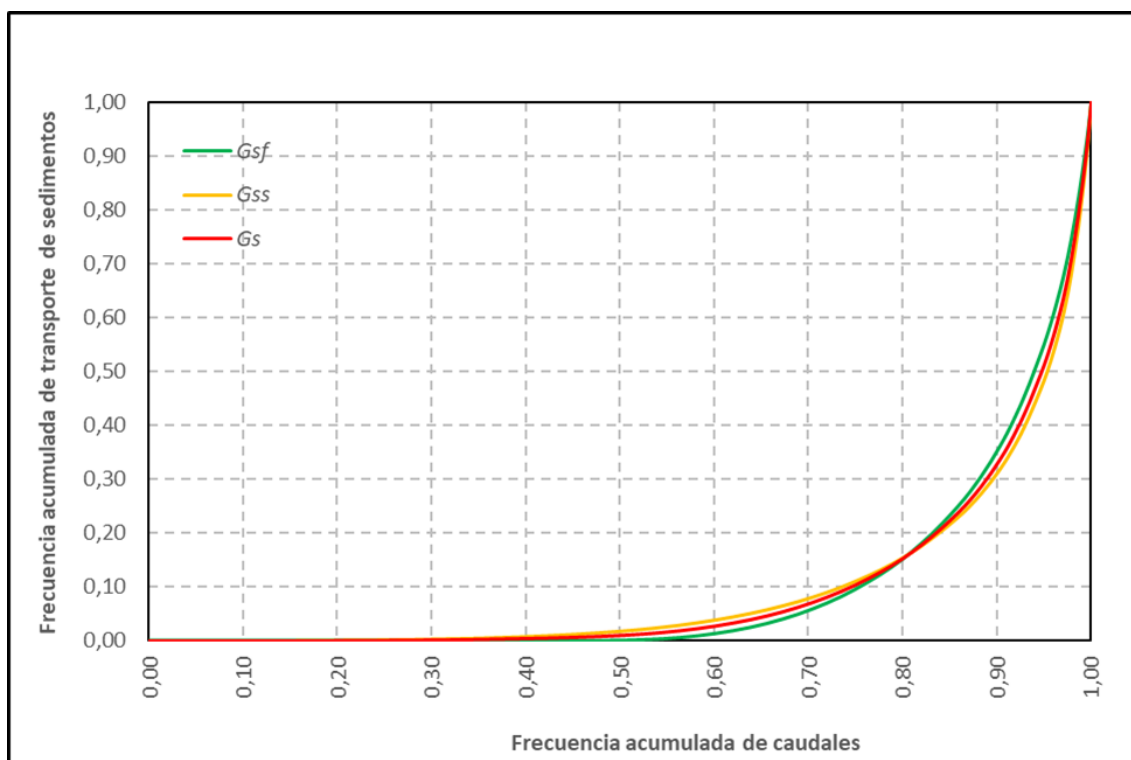


Figura 10.14.- Frecuencia acumulada de caudal líquido vs. Frecuencia acumulada de transporte de sedimentos ponderada por la frecuencia del caudal líquido – Sección Colón (Entre Ríos).

Se observa que la carga de fondo en la sección Colón, es prácticamente nula durante el 45% del tiempo. Asimismo, se señala que durante el 75% del tiempo ($Q=7.000 \text{ m}^3/\text{s}$) ocurre solo el 10% del transporte de fondo, y que la mitad del transporte de fondo solo ocurre para el 5 % de caudales mayores. El valor de caudales asociado a la frecuencia del 95%, según la Figura 10.12, es de $14.500 \text{ m}^3/\text{s}$ coincidente con el caudal efectivo.

Resulta particularmente relevante señalar que el caudal efectivo tiene una probabilidad de ocurrencia de 95%. Esto implica un fuerte sesgo del transporte de fondo hacia caudales altos, que explica la dinámica de pulsos observada en los sedimentogramas presentados.

10.4. Conclusiones

Utilizando como herramienta las curvas de descarga construidas en el capítulo anterior, se lograron analizar las variaciones espaciales del transporte de sedimentos, estimar las series temporales de caudales líquidos y sólidos en 4 secciones transversales que abarcan aproximadamente la mitad del área de estudio, y calcular las cargas anuales en el tramo y en el período de operación de la represa de Salto Grande.

Este análisis ha permitido establecer que el caudal sólido transportado por el fondo (G_{sf}) aumenta desde la represa hasta Colón, y luego desciende hacia aguas abajo. En complementariedad, el caudal sólido total de material de fondo (G_s), aumenta desde la represa hasta Colón, y luego mantiene su valor aproximadamente constante, al menos hasta Nuevo Berlín.

Además, se determinó que, en todas las secciones observadas, existe un caudal mínimo por debajo del cual las tensiones de corte sobre el fondo no serían suficientes para generar transporte por el fondo (G_{sf}). Este valor, para el tramo Colón – Nuevo Berlín se encuentra alrededor de los 3.500 m³/s, y tiene una frecuencia acumulada de 55% aproximadamente.

En cuanto a las relaciones observadas en el transporte de sedimentos, se señala que la fracción gruesa (arenas) se transportó predominantemente en suspensión (70-85%) en todas las secciones, con excepción de Casablanca y Puerto Yeruá. Asimismo, se señala que la proporción del transporte se mantuvo relativamente estable para valores superiores al caudal efectivo (14.500 m³/s).

El análisis de series de tiempo realizado reveló el claro efecto de los períodos de crecida y estiaje, exhibiendo además la dinámica de pulsos del transporte de sedimentos en consonancia con los pulsos de crecida. Se señala que no se observaron tendencias sistemáticas en las series de alturas usadas como variable de entrada (Junes, 2020), por cuanto es esperable que las series construidas en base a ello no reflejen comportamientos atípicos.

La integración de estas series de tiempo en base anual permitió conocer las cargas anuales de cada sección analizada. En el tramo medio del área de estudio, delimitado entre Nuevo Berlín y Colón, el caudal sólido total (G_T) fue de 4,35 millones de toneladas al año. De este valor, el 72 % se transportó como carga de lavado (G_w), el 18 % como carga de arena en suspensión (G_{ss}) y el 10 % como carga de fondo (G_{sf}). Estos valores son consistentes con los presentados por Moreira & Simionato (2019), aunque menores que lo presentado

por Urien (1972), previo a la existencia de la represa. Esto sería un indicio de un potencial efecto de retención de la represa.

Por último, los resultados logrados en el presente capítulo demuestran el efecto de los pulsos de crecida producidos por la Represa Salto Grande en el transporte de sedimentos. Se determinó que la carga de material del fondo del cauce (arenas) es prácticamente nula durante el 45% del tiempo, mientras que durante el 75% ocurre solo el 10% del transporte de fondo, y que la mitad del transporte solo ocurre para un caudal de 95 % de probabilidad de excedencia.

Capítulo 11

Conclusiones

11.1. Introducción

Como se mencionó al inicio de este documento, el río Uruguay tiene un rezago científico en comparación con el río Paraná, y otros grandes sistemas fluviales de la región. En este sentido, la presente tesis contribuye al conocimiento del área de vacancia asociada a la hidro-sedimentología en los últimos 350 km del río Uruguay, aguas abajo de la represa de Salto Grande.

Este proceso comenzó como una colaboración entre la CARU y la FICH-UNL en el contexto de una beca otorgada por la CARU a la Dra. Cecilia López Weibel, en su rol de candidata doctoral (FICH-UNL, CONICET). Se realizaron mediciones exploratorias de transporte de sedimentos en suspensión y de perfiles longitudinales de lecho. Para procesar estos perfiles se trabajó en un algoritmo para la medición de formas de fondo en base a perfiles longitudinales y cálculo del transporte de fondo por desplazamiento de dunas. De esta manera, se habían desarrollado las primeras herramientas de trabajo y las primeras nociones sobre el funcionamiento del sistema.

El diseño original del proyecto de medición del transporte de sedimentos en el área de estudio debía evolucionar rápidamente hacia un monitoreo sistemático, con una frecuencia trimestral o semestral en varias secciones transversales del río. Sin embargo, las agendas institucionales, junto con la pandemia de COVID-19 y las restricciones derivadas de ella, impidieron avanzar en esa dirección.

Ante este escenario, se rescató uno de los resultados principales obtenidos en la instancia mencionada, que fue un aforo simultáneo con Sontek M9 y Teledyne RDI de la sección transversal del Puente General Artigas (Colón – Paysandú), realizado en 2018. Sobre la

base de estas mediciones se logró desarrollar un cuerpo teórico que permitió calcular el transporte de sedimentos en suspensión a partir de la información acústica obtenida con Sontek M9 en el tramo de río en estudio, logrando resultados equivalentes a los calculables con el Software ASET en base a los datos de ADCPs Teledyne (Domínguez Rúbén, et al., 2020), y compatibles con lo medido por métodos tradicionales.

A pesar de los obstáculos mencionados para las mediciones nuevas, la CARU continuó con sus actividades prioritarias que incluyeron aforos líquidos utilizando tecnología acústica, y la ejecución de la obra de dragado del río. Esta situación permitió seguir recolectando información clave, la cual conformó posteriormente el cuerpo de datos utilizado en esta tesis.

La aplicación de la teoría acústica desarrollada para Sontek M9 a toda la base de datos de aforos disponibles en la sección Colón-PGA estableció un hito importante, que fue la determinación de la curva de descarga de sólidos en suspensión para dicha sección. Estos resultados permitieron sacar las primeras conclusiones respecto del transporte de sedimentos en la sección, y vislumbrar la potencialidad de la herramienta en la toma de decisiones. Con esta experiencia, fue posible iniciar el proceso de implementación de la misma metodología en las demás secciones transversales con información limnimétrica y aforos medidos, a lo largo del área de estudio.

Con el transporte sólido de fondo en suspensión ya calculado, fue necesario proceder con el estudio del transporte de material de lecho por el fondo. Para ello se trató de determinar la ecuación que mejor predijera el transporte de fondo, lográndose establecer la expresión de Ashida y Michiue (1972) como la más apropiada. La información del transporte de fondo fue validada con datos medidos por diversas metodologías.

Para dar uso a lo estudiado, se trabajó en la construcción de curvas de descarga de caudal líquido y sólido en las secciones disponibles. Luego, con estas curvas se pudieron calcular las series de tiempo y cargas anuales para las distintas modalidades de transporte de sedimentos. El análisis de esta información, si bien carga con el peso de las hipótesis utilizadas en su obtención, permitió obtener una cuantificación de procesos que hasta la fecha eran cualitativos y poco documentados.

Los resultados presentados en esta tesis no solo representan un paso importante en el avance del conocimiento de los procesos hidro-sedimentológicos en el río Uruguay, sino que permiten inferir nuevas líneas de investigación que podrán desarrollarse en los

próximos años. Asimismo, y considerando la bibliografía disponible, se entiende que esta tesis será de referencia casi obligada para aquellos que estudien procesos hidráulicos, sedimentológicos, morfológicos e inclusive ambientales y ecológicos, asociados al transporte de sedimentos en este río, en el Río de la Plata como su cuerpo receptor, o sistemas de similares características.

Se presentan a continuación las principales conclusiones obtenidas en esta tesis como respuesta a los objetivos específicos y objetivo general. Se relata también, seguidamente, las preguntas de investigación que requerirán la atención en los próximos años para el tramo de estudio y para las diversas tecnologías utilizadas.

11.2. Respuesta a los objetivos específicos

11.2.1. Desarrollo y aplicación de nuevas tecnologías de medición y procesamiento de información (OE1)

Los principales aportes de esta tesis al conocimiento en esta área son, por un lado, la programación e implementación del Algoritmo BTT (Capítulo 7), utilizado para determinar el número, la altura, la longitud y la pendiente de la cara de aguas abajo de las formas de fondo presentes en diversos perfiles longitudinales. Este código permite el análisis de perfiles longitudinales del lecho, de manera rápida, para obtener una descripción de las formas de fondo presentes. Asimismo, utilizando el gran volumen de información de perfiles relevados por la CARU en distintos momentos y a lo largo del tramo estudiado, se determinó la variación de las dimensiones características de las formas de fondo como función a los estímulos hidrodinámicos.

Por otro lado, se destaca el desarrollo teórico basado en la ecuación del sonar para aplicar la inversión acústica a los datos relevados con un ADCP Sontek M9, lo cual se implementó mediante la programación del código ASETSM9 (Capítulo 6). Este software constituye una herramienta fundamental para la estimación del transporte en suspensión a partir de un simple aforo con un perfilador acústico Doppler. Esta tecnología, en combinación con una medición del diámetro del sedimento en suspensión, permite una extrapolación rápida a toda la sección transversal de la medición de concentración de sedimento en suspensión, que mejora la calidad del aforo sólido.

Estas dos herramientas, en conjunto, han permitido procesar una gran cantidad de información de campo con códigos programados en lenguaje Matlab, de sencilla edición y disponibles a través del autor.

En particular, el código ASETSM9 representa la primera aplicación de un marco teórico que, aunque requiere más desarrollo e investigación, ha proporcionado resultados válidos y significativos para este estudio.

11.2.2. Cuantificación del transporte de material de fondo y carga de lavado (OE2 y OE3)

Se logró cuantificar el transporte de sedimentos en fondo y carga de lavado para varias secciones del tramo estudiado. En el tramo medio (Nuevo Berlín - Colón), por ejemplo, se determinó un valor promedio de 4,35 millones de toneladas anuales, que se transportan 72 % como carga de lavado, 18 % como arena en suspensión y 10 % como carga de fondo. Estos resultados son consistentes con estudios previos como el de Moreira & Simionato (2019), donde se trabajó con los datos de la base de datos hidrológica (Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica, 2021), en la sección de Concepción del Uruguay, para el período 1993-2016.

11.2.3. Relaciones entre hidrodinámica y transporte de sedimentos (OE4)

El principal logro en este aspecto es la validación de la ecuación de Ashida & Michiue (1972) para predecir el transporte de fondo bajo diferentes condiciones hidrodinámicas. Esto permitió no solo establecer las curvas de descarga de sedimentos transportados como carga de fondo, sino también evaluar la variación de la capacidad de transporte de sedimentos de fondo a lo largo del canal de navegación y validar su aplicación a partir de las sedimentaciones ocurridas en diferentes pasos críticos.

Por otra parte, se señala que se probó válida la ecuación simplificada de van Rijn para el transporte medio en la vertical de arenas en suspensión.

Ambas expresiones, calculadas como función de la hidrodinámica y el material disponible en el lecho, permiten estimar distintos valores del transporte de sedimentos y, posteriormente, contrastar los resultados con los obtenidos mediante esfuerzos de simulación numérica, por ejemplo.

11.2.4. Análisis de las formas de fondo (OE5)

Se observó que en el área de estudio existen tres zonas con características diferenciadas en el lecho o cauce actual. Desde aguas abajo hacia aguas arriba, en los primeros 100 kilómetros, en coincidencia con el último tramo representado por una amplia depresión heredada (Iriondo & Kröhling, 2008), se presenta una distribución granulométrica más

amplia, abarcando desde arcillas hasta arenas. Esto significa una mayor heterogeneidad en el tamaño de los sedimentos. En el tramo medio, entre los kilómetros 100 al 270, predominan las arenas uniformes con diámetros medios en torno a los 300 micrones, cuya granulometría va aumentando progresivamente aguas arriba del kilómetro 220. Aguas arriba del kilómetro 270, la presencia de gravas y afloramientos rocosos (basalto) en el cauce se hace más frecuente, lo que constituye un condicionante para la presencia de formas de fondo.

Las granulometrías observadas permiten, en gran parte del cauce, la formación de dunas, principalmente en la zona del canal de navegación.

La medición realizada de las formas de fondo en el tramo estudiado del río Uruguay permitió calcular estadísticas de alturas, longitudes y pendientes de las dunas. Se observó que las alturas promedio fueron de 0.41 m y las longitudes de 12.73 m, medidas con el algoritmo BTT, en comparación con valores de 0.53 m y 18.22 m obtenidos manualmente. La pendiente de la cara de aguas abajo fue calculada en más de 6.000 dunas, revelando que las dunas del río Uruguay tienen pendientes más bajas que las de otros grandes ríos, especialmente en sus dunas mayores. Geográficamente, las dunas presentan una tendencia creciente con la progresiva respecto de la altura y longitud, hasta el kilómetro 140, manteniéndose altas hasta el kilómetro 270, donde comienzan a observarse afloramientos rocosos. Entre los kilómetros 20 y 60, se encontraron también grandes dunas, más empinadas que las ubicadas aguas arriba. También se identificaron dunas con dunitas superimpuestas entre los kilómetros 140 (Nuevo Berlín) y 190 (Casablanca), con longitudes de la duna mayor que varían entre 42.5 m y 250 m, y alturas entre 0.50 m y 2.90 m.

La información aquí vertida permite conocer claramente lo esperable en los distintos tramos del río. El proceso de formación de estas dunas desde un lecho plano supone un desafío interesante a futuro, ya que permitirá calcular los tiempos óptimos de redragado, mediante el ajuste de la profundidad de diseño a partir del sobredragado por dunas.

En cuanto a la geomorfología del área de estudio, no se ha podido demostrar un vínculo entre las dimensiones de las formas de fondo y los parámetros descriptivos de los distintos patrones de escurrimiento observados. Sin embargo, se ha establecido que para escenarios hidrológicos menores al caudal efectivo (95% del tiempo), el río no tiene la potencia específica suficiente para generar migraciones laterales o cambios de patrón significativos.

Esto ocurre principalmente para el tramo entre los km 186 y 265, y para caudales cercanos a los máximos observados.

11.2.5. Variaciones espaciales y temporales del transporte de sedimentos. Influencia de Salto Grande (OE6)

Se lograron analizar las variaciones espaciales y temporales del transporte de sedimentos, a lo largo del área de estudio, a partir de la utilización de las curvas de descarga construidas. Se determinó que el caudal sólido transportado por el fondo (G_{sf}) y el caudal sólido total de fondo (G_s) aumentan desde la represa de Salto Grande hasta Colón, pero mientras G_{sf} desciende hacia aguas abajo, G_s se mantiene estable hasta Nuevo Berlín.

Se identificó un caudal mínimo de 3.500 m³/s necesario para generar transporte de fondo, que responde a una frecuencia acumulada de 55%. Se determinó, además, que el transporte de sedimentos sigue la dinámica de los pulsos de crecida, exacerbando el transporte debido a la naturaleza potencial de las curvas de descarga.

Se verificó también la importante influencia de la operación de la Represa Salto Grande en el transporte de sedimentos. Se observó que la carga de fondo es nula el 45% del tiempo, mientras que en el 75 % del tiempo se transporta solo el 10% de los sedimentos de fondo. En otras palabras, en el 25 % del tiempo se transporta el 90 % de los sedimentos en el segmento del cauce estudiado.

El valor de caudales asociado a la frecuencia del 95% es de 14.500 m³/s, coincidente con el caudal efectivo. Resulta entonces particular que el caudal efectivo tenga una probabilidad de ocurrencia de 95%. Esto implica un fuerte sesgo del transporte hacia los caudales altos erogados por la represa. Estos resultados sugieren un rol fundamental del plan de erogación de la represa de Salto Grande en el transporte de sedimentos, en donde para caudales bajos se produce bajo o nulo transporte, mientras que en caudales pico se genera el mayor transporte anual de sedimentos de fondo.

11.2.6. Análisis histórico del transporte de sedimentos (OE7)

Los resultados presentados, si bien resultan prometedores, tienen limitaciones en cuanto al análisis histórico. Se evidenció la dependencia de las curvas de descarga a las situaciones actuales relevadas. Con dichas curvas, se construyeron las series temporales desde la operación de la represa.

Al no contarse con datos medidos para contraste o validación, se infiere que los datos de transporte presentarán un fuerte sesgo a la información actual. Las curvas construidas probablemente hayan variado a lo largo de la operación de la represa, por cuanto la identificación de patrones a partir de las series construidas puede llevar a conclusiones erróneas.

Sin menoscabo de ello, la metodología aplicada pudo utilizarse para estimar, a lo largo del tiempo, los posibles lugares de acumulación o erosión, teniendo en cuenta los caudales predominantes en un período dado.

11.3. Futuro y nuevas líneas de investigación

Teniendo en cuenta que el transporte de sedimentos en el río Uruguay era un tema prácticamente inexplorado, se ha logrado avanzar de manera significativa en esta tesis doctoral. Sin embargo, y a los efectos de lograr un equilibrio entre la rigurosidad técnica y la utilidad de los resultados, algunos tópicos requieren futuras investigaciones con mayor nivel de desarrollo.

Ejemplo de esto se da en el Capítulo 6, con la teoría acústica y el valor de ciertos parámetros (por ejemplo, el valor A) para Sontek M9. Resta analizar el comportamiento de este valor para distintos ríos y comprobar por completo la validez de la extrapolación de la calibración en otras secciones y condiciones hidrológicas.

Sin perjuicio de esto, se demostró que el sistema desarrollado (ASETSM9), para el caso del río Uruguay, tiene mayor sensibilidad a la medida del diámetro de la fracción gruesa (arenas). Para mejorar la implementación de esta metodología son esenciales los esfuerzos de mediciones de campo que permitan determinar un diámetro que mejor represente la fracción en suspensión.

En este sentido, se señala que se adquirió en CARU un equipo Sequoia LISST-SL2, que permitirá trabajar sobre la influencia del diámetro de los sedimentos en el cálculo de la carga en suspensión por medios acústicos. Este novedoso equipo, su explotación y los resultados que se alcancen con él, constituyen una puerta abierta para lograr nuevos desarrollos teórico-prácticos, tanto específicos para el río Uruguay como generales, contemplando fenómenos tales como la estratificación de las partículas transportadas en suspensión, y las fluctuaciones temporales en los procesos de transporte.

En cuanto al transporte de sedimentos, restan explorar las implicancias en la gestión del conocimiento de la dinámica fluvial generado. ¿Existe una forma de manejar el caudal erogado de la represa de Salto Grande a los efectos de morigerar la erosión provocada, fundamentalmente sobre las barrancas? Este manejo, ¿puede afectar también la navegabilidad del canal de navegación? ¿Pueden realizarse maniobras tipo *flash floods* para movilizar el sedimento de lecho y profundizar los pasos de navegación?

También es importante resaltar que el estudio de formas de fondo presentes en el área de estudio ha tenido un carácter meramente descriptivo. La relación de las formas con la hidrodinámica en los diversos tramos ha mostrado respuestas disimiles que necesitan ser exploradas para una mejor explicación. Las dunas en la zona del km 55 del canal de navegación del río Uruguay, de más de 1,50 m de altura, no son explicadas por las ecuaciones que utilizan la hidrodinámica para estimar sus dimensiones. Aquí, estudios sobre la acción de la marea serían fundamentales.

Asimismo, resultará útil conocer, sobre las formas de fondo, su tasa de deformación y su tasa de reconstitución posterior a una obra de dragado. Esto último en particular permitirá ajustar los parámetros de diseño del canal de navegación, que contempla un sobredragado por dunas.

Por último, y teniendo en cuenta lo relacionado con las series de tiempo, la carga de sedimentos y el potencial efecto de la represa de Salto Grande, se constituye en el desafío más significativo y a largo plazo posterior a esta tesis, la implementación de un programa de mediciones sistemáticas del transporte de sedimentos. Con este programa se deberán monitorear no solo los cambios en el transporte de sedimentos, sino también las variaciones temporales de las relaciones entre la hidrodinámica y el transporte de sedimentos. De esta manera, podrán conocerse tendencias a mediano y largo plazo que permitirán identificar procesos morfodinámicos, y contribuir al planteo de medidas de gestión sustentable del río y sus sedimentos.

Bibliografía

- Abadie, J. P. (1998). *El río Uruguay Empleo Histórico y Posibilidades Futuras*. Paysandú, República Oriental del Uruguay: Publicaciones de la Comisión Administradora del Río Uruguay.
- Aceituno, P. (1988). On the functioning of the Southern Oscillation in the South American Sector. Part I: Surface Climate. *Monthly weather review*, 116, 505-524.
- Aceñolaza, F. G. (2007). *Geología y Recursos Geológicos de la Mesopotamia Argentina*. San Miguel de Tucumán, Argentina: Instituto Superior de Correlación Geológica.
- Acres-Hidrosud. (1971). 7. Sedimentación. En: *Proyecto de la Represa de Salto Grande* (págs. 39-46). Buenos Aires, Argentina.
- Agrawal, Y. C., & Hanes, D. M. (2015). The implications of laser-diffraction measurements of sediment size distributions in a river to the potential use of acoustic backscatter for sediment measurements. *Water Resources Research*, 51(11), 8854-8867.
- Alarcón, J. J., Szupiany, R. N., Montagnini, M. D., Gaudín, H., Prendes, H. H., & Amsler, M. L. (2003). *Evaluación del transporte de sedimentos en el tramo medio del río Paraná*. I Simposio sobre Hidráulica de Ríos. Ezeiza, Buenos Aires, Argentina.
- Anderson, C. W., Fisk, G. G., Gartner, J. W., Glysson, D. G., Gooding, D. J., Gray, J. R., . . . Ziegler, A. C. (2010). Surrogate technologies for monitoring suspended-sediment transport in rivers. En C. Poletto, & S. Charlesworth, *Sedimentology of Aqueous Systems* (págs. 3-46). Chichester: Blackwell Publishing.
- Andrews, E. D. (1980). Effective and bankfull discharges of streams in the Yampa River Basin, Colorado and Wyoming. *Journal of Hydrology* (46), 311-330.
- Ashida, K. & Michiue, M. (1972). Study on hydraulic resistance and bed-load transport rate in alluvial streams. *Japan Society of Civil Engineering*, 206, 59-69. https://doi.org/10.2208/jscej1969.1972.206_59
- Attard, M. E. (2012). *Evaluation of aDcps for Suspended Sediment Transport Monitoring, Fraser River, British Columbia*. Vancouver, Canada: Simon Fraser University.
- Baccaro, A. (22 de 11 de 2020). *Eco Digital*. Recuperado el 18 de 08 de 2022, de <https://elecodigital.com.uy/sociedad/rio-uruguay-cortado-por-la-bajante/>
- Baronas, J. J., Stevenson, E. I., Hackney, C. R., Darby, S. E., Bickle, M. J., Hilton, R. G., Larkin, C.S, Parsons, D.R., Khaing, A.M, Tipper, E. T. (2020). Integrating Suspended Sediment Flux in Large Alluvial River Channels: Application of a Synoptic Rouse-Based Model to the Irrawaddy and Salween Rivers. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 125(9).
- Basile, P. A. (2018). *Transporte de sedimentos y morfodinámica de ríos aluviales* (1a ed.). Rosario: UNR Editora.
- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Data Descriptor: Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 5(180214). doi:10.1038/sdata.2018.214
- Best, J. L. (1996). The fluid dynamics of small-scale alluvial bedforms. En P. A. Carling, & M. R. Dawson (Edits.), *Advances in Fluvial Dynamics and Stratigraphy* (págs. 67-125). Chichester, UK: John Wiley and Sons.
- Best, J. L. (2005). The fluid dynamics of river dunes: A review and some future research directions. *Journal of Geophysical Research*, 110(F04S02), 1-21.

- Best, J., Simmons, S., Parsons, D., Oberg, K., Czuba, J., & Malzone, C. (2010). A new methodology for the quantitative visualization of coherent flow structures in alluvial channels using multibeam echo-sounding (MBES). *Geophysical Research Letters*, 37, L06405. doi:10.1029/2009GL041852
- Brice, J. C. (1975). Airphoto interpretation of meander migration. *Journal of the Waterways, Harbors, and Coastal Engineering Division*, 101(WW4), 389–398.
- CAMMESA. (2022). <https://portalweb.cammesa.com/default.aspx>. Obtenido de https://portalweb.cammesa.com/memnet1/revistas/estacional/clasificacion_de_centrales_hid.html
- Carling, P. A. (1999). Subaqueous gravel dunes. *Journal of Sedimentary Research*, 69(3), 534–545.
- Cisneros, J., Best, J., van Dijk, T., Paes de Almeida, R., Amsler, M., Boldt, J., Freitas, B., Galeazzi, C., Huizinga, R.J., Ianniruberto, M., Ma, H., Nittrouer, J., Oberg, K., Orfeo, O., Parsons, D.R., Szupiany, R.N., Wang, P., Zhang, Y. (2020). Dunes in the world's big rivers are characterized by low-angle lee-side slopes and a complex shape. *Nature Geoscience*, 13, 156–162. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0511-7>
- Cheng, N. S. (2002). Exponential formula for bedload transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 128 (102), 942–946. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001909](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001909)
- Church, M. (2006). Bed Material Transport and the Morphology of Alluvial Rivers. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 34. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.33.092203.122721>
- Clay, C. S., & Medwin, H. (1977). *Acoustical Oceanography: Principles and Applications* (1a ed.). New York, NY: Wiley.
- Collazos, G., Prendes, H. H., Huespe, J., Sapriza, G., & Zamanillo, E. (2021). Estudio batimétrico del Embalse de Salto Grande (Argentina-Uruguay). En: *Resúmenes del XXIX Congreso Latinoamericano de hidráulica*. México (Evento Virtual): Asociación Internacional de Ingeniería e Investigación Hidroambiental.
- Colombo, J. C., Skorupka, C. N., Bilos, C., Tatone, L., Cappelletti, N., Migoya, M. C., Speranza, E. (2014). Seasonal and inter-annual variability of water quality in the Uruguay River, Argentina. *Hydrological Sciences Journal* 60(6), 1155–1163. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.905690>
- Comisión Administradora del Río Uruguay (2019). *Digesto sobre el Uso y Aprovechamiento del Río Uruguay*. Paysandú, República Oriental del Uruguay. Obtenido de <https://www.caru.org.uy/>
- Comisión Administradora del Río Uruguay (2022). www.caru.org.uy.
- Comisión Técnica Mixta de Salto Grande. (1995). *Análisis de la Sedimentación en el Embalse de Salto Grande*. Departamento de Hidrología.
- Comisión Técnica Mixta de Salto Grande. (2004). Estudios complementarios del Proyecto “Desarrollo Regional y Mejora de la Navegabilidad del Río Uruguay”.
- Comisión Técnica Mixta de Salto Grande. (2006). *Manual del Agua*.
- Comisión Técnica Mixta de Salto Grande. (2022). <https://www.saltogrande.org/>.
- Comité Científico CARU. (2019). *Plan de Monitoreo Integral del Río Uruguay para todo el tramo compartido*. Subprograma 1. Monitoreo de la calidad de agua, sedimento y biota en el Río Uruguay. Informe primeros seis meses de monitoreo. Comisión Administradora del Río Uruguay. www.caru.org.uy.

- Conevski, S. (2020). Tesis doctoral: *Bedload Monitoring by means of Hydro - Acoustic Techniques*. Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology - Alma Mater Studiorum, Università di Bologna.
- Consorcio TELEMAT-MASCARET. (2022). <http://www.opentelemat.org/>.
- Consultora ad hoc - Rodrigo Junes y Abelardo Llosa. (2023). *Estudio de Impacto Ambiental y Social - Proyecto de dragado y balizamiento del río Uruguay entre los km 207,8 y 336*. Paysandú: Comisión Administradora del Río Uruguay. Obtenido de <https://www.caru.org.uy/web/2023/11/estudios-de-impacto-ambiental-y-social-del-proyecto-de-dragado-y-balizamiento-del-rio-uruguay-entre-los-kilometros-2078-y-336/>
- Coronel, G., & Menéndez, Á. (2006). Ch. IV - Physiography and hydrology. En V. Barros, R. Clarke, & P. Silva Dias (Edits.), *Climate change in the la Plata Basin* (págs. 44-60). Buenos Aires: UBA - Conicet - CIMA.
- Deines, K. L. (1999). Backscatter estimation using broadband acoustic Doppler current profilers. *En Proceedings, Sixth Working Conference on Current Measurements* (págs. 249-253). San Diego, CA: IEEE.
- Depetris, P. J., & Griffin, J. J. (1968). Suspended load in the rio de la Plata drainage basin. *Sedimentology*, 11, 53-60.
- Dewey, R., & Stringer, S. (2007). *Reynolds stresses and turbulent kinetic energy estimates from various ADCP beam configurations: Theory*. Sin publicar. Disponible en DOI: 10.13140/RG.2.1.1042.8002.
- DHI A/S. (2024). MIKE Powered by DHI. Obtenido de <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-11>
- Di Persia, D. H., & Neiff, J. J. (1986). The Uruguay Rivers system. En B. R. Davies, & K. F. Walker (Edits.), *The Ecology of River Systems* (págs. 599-619). Dordrecht, The Netherlands: Dr. W. Junk Publishers.
- Díaz, Á. F., Studzinski, C. D., & Mechoso, C. R. (1998). Relationships between Precipitation Anomalies in Uruguay and Southern Brazil and Sea Surface Temperature in the Pacific and Atlantic Oceans. *Journal of Climate*, 11(2), 251–271.
- Dinehart, R. (1992). Evolution of coarse gravel bed forms: field measurements at flood stage. *Water Resources Research*, 28(10), 2667-2689.
- Diplas, P., Kuhnle, R., Gray, J., Glysson, D., & Edwards, T. (2008). Sediment transport measurements. En M. H. García (Ed.), *ASCE Manual of Practice 110, Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modelling and Practices*. (pág. 47). Reston, Va: ASCE.
- División Laboratorio Ambiental DINAMA. (2017). Determinación de Sólidos Suspendidos totales, fijos y volátiles en aguas naturales y efluentes líquidos. En <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/politicas-y-gestion/manual-procedimientos-analiticos-para-muestras-ambientales-tercera-edicion-2017> (Ed.), Manual de procedimientos analíticos para muestras ambientales. Dirección Nacional de Medio Ambiente - DINAMA (República Oriental del Uruguay).
- Domínguez Rúben, L. (2018). Tesis doctoral: *Comportamiento Morfológico, Hidráulico y Sedimentológico del Sistema Cauce Principal (Paraná) y Secundario (Colastiné)*. Santa Fe, Argentina: Universidad Nacional del Litoral.
- Domínguez Rúben, L. G., Szupiany, R. N., Latosinski, F. G., López Weibel, C., Wood, M., & Boldt, J. (2020). Acoustic Sediment Estimation Toolbox (ASET): A software package for calibrating and processing TRDI ADCP data to compute suspended-sediment transport in sandy rivers. *Computers and Geosciences*, 140(104499), 13.

- Domínguez Rúben, L. G., Naito, K., Gutierrez, R.R., Szupiany, R. N., Abad, J.D. (2021). Meander Statistics Toolbox (MStaT): a toolbox for geometry characterization of bends in large meandering channels. *SoftwareX*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2021.100674>.
- Downing, A., Thorne, P. D., & Vincent, C. E. (1995). Backscattering from a suspension in the near field of a piston transducer. *Journal of the Acoustical Society of America*, 97(3), 1614-1620.
- Duffy, G. P., & Hughes-Clarke, J. E. (2005). Application of spatial cross correlation to detection of migration of submarine sand dunes. *Journal of Geophysical Research*, 110, F04S12. doi:10.1029/2004JF000192
- Edwards, T. K., & Glysson, G. D. (1999). *Field Methods for Measurement of Fluvial Sediment*. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey.
- EIH-INCOIV. (2012). Informe final “Proyecto de Dragado y Balizamiento Río Uruguay desde el km 0 al km 206,8”.
- Einstein, H. A. (1950). *The Bed-Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows*. Washington, D.C., United States: U.S.D.A. Soil Conservation Service.
- Engelund, F., and Fredsøe, J. (1976). A Sediment Transport Model for Straight Alluvial Channels. *Nordic Hydrology*, 7, 293–306. <https://doi.org/10.2166/nh.1976.0019>
- Ettema, R., & Muttel, C. F. (2004). Hans Albert Einstein: Innovation and Compromise in Formulating Sediment Transport by Rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(6), 477-487. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:6(477)
- Fernandez Luque, R., and van Beek, R. (1976). Erosion and Transport of Bed Sediment. *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, 14(2), 127–144. <httpdx.doi.org/10.108000221687609499677>
- Friedman, G. M. (1962). On Sorting, Sorting Coefficients, and the Lognormality of the Grain-Size Distribution of Sandstones. *The Journal of Geology*, 70(6), 737-753. doi:10.1086/jg.70.6.30066373
- Gaeuman, D., & Jacobson, R. B. (2006). Acoustic bed velocity and bed load dynamics in a large sand bed river. *Journal of Geophysical Research*, 111(F02005). doi:10.1029/2005JF000411
- Gaeuman, D., & Jacobson, R. B. (2007). Field Assessment of Alternative Bed-Load Transport Estimators. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(12), 1319-1328.
- Galeazzi, C. P., Almeida, R. P., Mazoca, C. E., Best, J. L., Freitas, B. T., Ianniruberto, M., Cisneros, J. Tamura, L. N. (2018). The significance of superimposed dunes in the Amazon River: Implications for how large rivers are identified in the rock records. *Sedimentology*, 65(7). doi:10.1111/sed.12471
- García, M. H. (2008). Sediment transport and morphodynamics. En M. H. García (Ed.), *ASCE Manual of Practice 110, Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modelling and Practices* (pág. Chapter 2). Reston, Va: ASCE.
- García, N. O., & Vargas, W. M. (1998). The temporal climatic variability in the 'Río de la Plata' basin displayed by the river discharges. *Climatic change*, 38, 359-379.
- 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, 169-187.
- Glysson, G. D. (1987). *Sediment-Transport Curves*. Reston, Virginia, EE.UU.: U.S. Geological Survey Open-File Report 87-218.
- Goso Aguilar, C., Perea, D., & Perinotto, J. A. (1999). Análisis de facies y paleogeografía de la Formación Guichón (Cretácico Inferior) en la cuenca del Litoral Uruguay. *Revista de la Sociedad Uruguaya de Geología*, III(6), 2-15.

- Gostiaux, L., & van Haren, H. (2010). Extracting meaningful information from uncalibrated backscattered echo intensity data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 27(5), 943-949.
- Gray, J. R., & Simoes, F. J. (2008). Appendix D: Estimating Sediment Discharge. En M. H. García (Ed.), *ASCE Manual of Practice 110: Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling, and Practice* (págs. 1065-1086). Reston, Va., EE.UU.: ASCE.
- Gray, J. R., & Gartner, J. W. (2009). Technological advances in suspended-sediment surrogate monitoring. *Water Resources Research*, 45(W00D29).
- Gray, J. R., & Gartner, J. W. (2010). Surrogate technologies for monitoring bed-load transport in rivers. En C. Poletto, & S. Charlesworth (Edits.), *Sedimentology of Aqueous Systems* (págs. 46-79). Londres: Wiley-Blackwell.
- Guerrero, M., Szupiany, R. N., & Latosinski, F. G. (2013). Multi-frequency acoustics for suspended sediment studies: an application in the Parana River. *Journal of Hydraulic Research*, 51(6), 696-707.
- Guerrero, M., Rütther, N., Szupiany, R. N., Haun, S., Baranya, S., & Latosinski, F. G. (2016). The Acoustic Properties of Suspended Sediment in Large Rivers: Consequences on ADCP Methods Applicability. *Water*, 8(13).
- Gutierrez, R. R., Abad, J. D., Parsons, D. R., & Best, J. L. (2013). Discrimination of bed form scales using robust spline filters and wavelet transforms: Methods and application to synthetic signals and bed forms of the Río Paraná, Argentina. *Journal of Geophysical Research: Earth surface*, 118, 1400-1419.
- Gutierrez, R. R., Mallma, J. A., Nuñez-González, F., Link, O., & Abad, J. D. (2018). Bedforms-ATM, an open-source software to analyze the scale-based hierarchies and dimensionality of natural bed forms. *SoftwareX*, 7, 184-189.
- Guy, H. P. (1969). *Laboratory theory and methods for sediment analysis*. Washington, D.C. (U.S.A.): U.S. Geological Survey.
- Hanes, D. M. (2012). On the possibility of single-frequency acoustic measurement of sand and clay concentrations in uniform suspensions. *Continental Shelf Research*, 46, 64-66.
- Hanes, D. M. (2016). Acoustic attenuation due to bi-modal size distributions of suspended sediment. *Journal of Coastal Research* (Special Issue No. 75), 23-27.
- Haschenburger, J. K., & Church, M. (1998). Bed material transport from the virtual velocity of sediment. *Earth Surf. Process. Landforms*, 23, 791-808.
- Hought, D., Venditti, J. G., & Wright, S. A. (2017). Calculation of in situ acoustic sediment attenuation using off-the-shelf horizontal ADCPs in low concentration settings. *Water Resources Research*, 53(6), 5017-5037.
- Hay, A. E. (1983). On the remote acoustic detection of suspended sediment at long wavelengths. *Journal of Geophysical Research*, 88(C12), 7525--7542.
- Heredia Ligorria, A. I. (2017). Tesis de maestría: *Caracterización del transporte de sedimentos en un tramo del río Tercero (Ctalamochita) utilizando tecnología acústica Doppler*. Córdoba, Argentina: Universidad Nacional de Córdoba.
- Hill, K. M., Gaffney, J., Baumgardner, S., Wilcock, P., & Paola, C. (2017). Experimental study of the effect of grain sizes in a bimodal mixture on bed slope, bed texture, and the transition to washload. *Water Resources Research*, 53(1), 923-941. doi.org/10.1002/2016WR019172
- Holdaway, G. P., Thorne, P. D., Flatt, D., Jones, S. E., & Prandle, D. (1999). Comparison between ADCP and transmissometer measurements of suspended sediment concentration. *Continental Shelf Research*, 19, 421-441.

- Holmes, R. R. (2010). *Measurement of Bedload Transport in Sand-Bed Rivers: A look at Two Indirect Sampling Methods*. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5091, United States Geological Survey, Rolla, Missouri, USA.
- Hopwood, H. J. (2015). *Análisis Diagnóstico Transfronterizo (ADT) y Programa de Acciones Estratégicas (PAE) para la Gestión Sostenible de los Recursos Hídricos de la Cuenca del Plata, RECURSOS HIDRICOS: Componente Sedimentos*. Buenos Aires: Comité Intergubernamental Coordinador de los Países de la Cuenca del Plata.
- Huang, H. (2019). The importance of ADCP alignment with GPS in moving-boat streamflow measurements. *Flow Measurement and Instrumentation* (67), 33-40. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2019.04.002>
- HYPACK / Xylem Inc. (2021). www.hypack.com. Obtenido de <https://www.hypack.com/>
- Instituto Nacional del Agua. (2020). *Consulta por email: Consulta aforadores Doppler*.
- Iriondo, M. H. (1980). El Cuaternario de Entre Ríos. *Rev. Asoc. Cienc. Nat. Litoral*(11), 125-141.
- Iriondo, M. H., & Kröhling, D. M. (2008). *Cambios ambientales en la cuenca del río Uruguay: Desde dos millones de años hasta el presente* (1a ed. ed.). Santa Fe: Universidad Nacional del Litoral.
- Jaime, P. R., & Menéndez, Á. N. (2002). *Análisis del régimen hidrológico de los ríos Paraná y Uruguay*. Ezeiza, Buenos Aires, Argentina: Laboratorio de Hidráulica - Instituto Nacional del Agua.
- Jamieson, E. C., Rennie, C. D., Jacobson, R. B., & Townsend, R. D. (2011). Evaluation of ADCP apparent bed load velocity in a large sand-bed river: moving versus stationary boat conditions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(9), 1064-1071. doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000373
- Jirka, G. H., & Uijttewaal, W. S. (2004). Shallow flows: A definition. En G. H. Jirka, & W. S. Uijttewaal (Edits.), *Proceedings of the International Conference on Shallow Flows* (págs. 3-11). Balkema, The Netherlands.
- Johannesson, K. A., & Mitson, R. B. (1983). *Fisheries Acoustics - A Practical Manual for Aquatic Biomass Estimation* (1a ed.). Roma, IT: FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATION.
- Junes, R. I. (2020). Tesis de maestría: *Modelo hidrodinámico del río Uruguay - Determinación de los principales patrones de flujo y su variación espacio-temporal en función de los forzantes*. Montevideo: Facultad de Ingeniería - Universidad de la República.
- Kleinhans, M. G. (2001). The key role of fluvial dunes in transport and deposition of sand-gravel mixtures, a preliminary note. *Sedimentary Geology*, 143, 7-13.
- Kleinhans, M. G. (2002). *Sorting out sand and gravel: sediment transport and deposition in sand-gravel bed rivers* (293 ed.). Utrecht, NL: Netherlands Geographical Studies.
- Kleinhans, M. G., & van den Berg, J. H. (2011). River channel and bar patterns explained and predicted by an empirical and physics-based method. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36(6), 721-738.
- Knaapen, M. A., & Hulscher, S. J. (2002). Regeneration of sand waves after dredging. *Coastal Engineering*, 46, 277-289.
- Knighton, D. (1998). *Fluvial Forms and Processes: A New Perspective* (2nd ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203784662>
- Kostaschuk, R., Best, J., Villard, P., Peakall, J., & Franklin, M. (2005). Measuring flow velocity and sediment transport with an acoustic Doppler current profiler. *Geomorphology*, 68, 25-37.

- Krepper, C. M., García, N. O., & Jones, P. D. (2003). Interannual variability in the Uruguay River basin. *International Journal of Climatology*, 23, 103-105. doi:10.1002/joc.853.
- Kröhling, D. M. (2009). La Formación El Palmar, una unidad fluvial asignable al subestadio cálido EIO 5A (Pleistoceno tardío) de la cuenca del Río Uruguay. *Natura Neotropicalis*, 1(40), 61-86.
- Landers, M. N., Straub, T. D., Wood, M. S., & Domanski, M. M. (2016). *Sediment Acoustic Index Method for Computing Continuous Suspended-Sediment Concentrations*. En US Geological Survey Techniques and Methods (págs. Libro 3, Capítulo C5, 63). Reston, VA: US Geological Survey.
- Larenze, G. (1998). *Régimen hidrológico del río Uruguay y análisis de crecientes*. Paysandú, Uruguay: Comisión Administradora del Río Uruguay.
- Latosinski, F. G., Szupiany, R. N., García, C. M., Gallego, M., Amsler, M. L., & Pujol, A. (2011). Estimación de la concentración y transporte de sedimentos de fondo en suspensión con perfilador acústico Doppler. En H. D. Farías, J. D. Brea, & C. M. García (Edits.), *Hidráulica fluvial: Procesos de erosión y sedimentación, obras de control y gestión de ríos*. Santiago del Estero, Argentina.
- Latosinski, F. G. (2014). Tesis de doctorado: *Estimación y caracterización del transporte de sedimento en cauces aluviales utilizando tecnología acústica Doppler*. Rosario: Universidad Nacional de Rosario.
- Latosinski, F. G., Szupiany, R. N., García, C. M., Guerrero, M., & Amsler, M. L. (2014). Estimation of concentration and load of suspended bed sediment in a large river by means of acoustic Doppler technology. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(7), 1-15.
- Latosinski, F. G., Szupiany, R. N., Guerrero, M., Amsler, M. L., & Vionnet, C. (2017). The ADCP's bottom track capability for bedload prediction: Evidence on method reliability from sandy river applications. *Flow Measurement and Instrumentation* (54), 124-135. doi:10.1016/j.flowmeasinst.2017.01.005
- Latosinski F.G., Amsler M.L., Vionnet C.A., Heredia A.I., Szupiany R.N., Diaz Lozada J.M., García C.M. & García M.H. (2022). The role of dunes in flow resistance in a large and a small river. The case of the Paraná and Tercero rivers, Argentina. *Journal of Hydraulic Research*. DOI: 10.1080/00221686.2021.2001588
- Latrubesse, E. M., Stevaux, J. C., & Sinha, R. (2005). Tropical rivers. *Geomorphology*, 70, 187-206.
- Leary, K. C., & Buscombe, D. (2020). Estimating sand bed load in rivers by tracking dunes: a comparison of methods based on bed elevation time series. *Earth Surface Dynamics*, 8, 1-12. doi:10.5194/esurf-8-1-2020
- Leopold, L.B. y Wolman, M.G. (1957). River Channel Patterns – Braided, Meandering and Straight. *Unites States Geological Survey*. Professional Paper N° 282B.
- López Weibel, C. (2018). *Informe Final: Beca de Posgrado de la Comisión Administradora del Río Uruguay*. Paysandú, Uruguay: Secretaría Técnica - Comisión Administradora del Río Uruguay.
- López Weibel, C., Szupiany, R. N., Nardin, A. R., Arcelus, C. A., Latosinski, F. G., & Amsler, M. L. (2019). Comparación de técnicas para la cuantificación del transporte de sedimento en suspensión en el río Uruguay. En A. R. Nardin, C. A. Arcelus, R. N. Szupiany, F. Pedocchi, & C. M. García (Edits.), *Libro de resúmenes extendidos del VI Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica* (págs. 9-10). Paysandú, ROU.
- López Weibel, C. (2023). Tesis de doctorado: *Transporte de sedimentos en los ríos Paraná y Uruguay. Cuantificación, dinámica e implicancias en bifurcaciones*. Santa Fe: Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas - Universidad Nacional del Litoral.

- Madsen, O. S. (1991). Mechanics of cohesionless sediment transport in coastal waters. *Coastal Sediments*, 91, N. C. Kraus, K. J. Gingerich, and D. L. Kriebel, eds., pp. 15–27, ASCE, New York.
- Mangini, S., Prendes, H. H., Huespe, J., & Amsler, M. (2007). Sedimentación de finos en el entorno del Embalse de Salto Grande en el Río Uruguay. *Ingeniería del Agua*, 14(4), 307-318.
- McLean, S. R., Wolfe, S. R., & Nelson, J. M. (1999). Predicting boundary shear stress and sediment transport over bed forms. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(7), 725-736.
- Menéndez, A., & Re, M. (2009). *Modelación Hidro-Sedimentológica del Río de la Plata - MODELO CONCEPTUAL Y FORZANTES*. Ezeiza, Buenos Aires, Argentina: Laboratorio de Hidráulica - Instituto Nacional del Agua.
- Meyer-Peter, E., and Muller, R. (1948). Formulas for Bedload Transport. *Proceedings of the 2nd Congress, IAHR*, Estocolmo, 39–64.
- Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda. (2017). Plan *Estratégico de Turismo Sustentable*. Colón, Provincia de Entre Ríos. (A. M. Tomasenía, Ed.) Presidencia de la Nación Argentina.
- Moate, B. D., & Thorne, P. D. (2009). Measurements and inversion of acoustic scattering from suspensions having broad size distributions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 126(6), 2905-2917.
- Moate, B. D., & Thorne, P. D. (2012). Interpreting acoustic backscatter from suspended sediments of different and mixed mineralogical composition. *Continental Shelf Research*, 46, 67-82.
- Moate, B. D., & Thorne, P. D. (2013). Scattering from suspended sediments having different and mixed mineralogical compositions: comparison of laboratory measurements and theoretical predictions. *Journal of the Acoustical Society of America*, 133(3), 1320-1334.
- Moore, S. A., Le Coz, J., Hurther, D., & Paquier, A. (2013). Using multi-frequency acoustic attenuation to monitor grain size and concentration of suspended sediment in rivers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 133(4), 1959-1970.
- Moore, S. A. (2017). Concentration measurement with ADCPs. En J. Aberle, C. Rennie, D. Admiraal, & M. Muste (Edits.), *Experimental Hydraulics: Methods, Instrumentation, Data Processing and Management - Volume II: Instrumentation and Measurement Techniques* (1a ed., págs. Capítulo 5.A.2, p. 290). London, UK: CRC Press.
- Moreira, D. (2016). Tesis de doctorado: *Estudio de los procesos que determinan el transporte de los sedimentos finos y su variabilidad en el Río de la Plata en base a simulaciones numéricas y observaciones satelitales e in situ*. Buenos Aires: Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - Universidad de Buenos Aires.
- Moreira, D., & Simionato, C. G. (2019). Modeling the Suspended Sediment Transport in a Very Wide, Shallow, and Microtidal Estuary, the Río de la Plata, Argentina. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*(11). 10.1029/2018MS001605
- Mueller, D. S., Wagner, C. R., Rehmel, M. S., Oberg, K. A., & Rainville, F. (2013). Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat. *En U. S. Survey, Section A: Surface-water techniques in Book 3 Applications of Hydraulics*. Reston, VA., U.S.A.: U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/tm3A22>
- Mullison, J. (2017). Backscatter estimation using broadband acoustic Doppler current profilers - updated. En *Proceedings, ASCE Hydraulic measurements & experimental methods conference*. Durham, NH.
- Nardin, A. R., López Weibel, C., Szupiany, R. N., & Arcelus, C. A. (2018). Determinación de dimensiones características, desplazamientos y evolución temporal de dunas en el río

- Uruguay. En *XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. International Association for Hydro-Environment Engineering and Research, Buenos Aires, Argentina.
- Nardin, A. R., Junes, R., Szupiany, R. N., & Arcelus, C. A. (2019a). Capacidad de transporte de sedimentos en el canal de navegación del río Uruguay a partir de datos de campo y modelación hidrodinámica. En A. R. Nardin, C. A. Arcelus, R. N. Szupiany, F. Pedocchi, & C. M. García (Edits.), *Libro de resúmenes extendidos del VI Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica*. Comisión Administradora del Río Uruguay, Paysandú, República Oriental del Uruguay.
- Nardin, A. R., Szupiany, R. N., & Arcelus, C. A. (2019b). Aplicación de un algoritmo computacional para la determinación automática de dimensiones de formas de fondo en el río Uruguay. En A. R. Nardin, C. A. Arcelus, R. N. Szupiany, F. Pedocchi, & C. M. García (Edits.), *Libro de resúmenes extendidos del VI Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica* (págs. 91-92). Comisión Administradora del Río Uruguay, Paysandú, República Oriental del Uruguay.
- Nardin, A. R., Szupiany, R. N., López Weibel, C., & Arcelus, C. A. (2021). Características del lecho y transporte de sedimentos en el tramo inferior del río Uruguay. En *Resúmenes de la XVII Reunión Argentina de Sedimentología y VIII Congreso Latinoamericano de Sedimentología*. Paraná, Entre Ríos, Argentina.
- Nardin, A. R., Szupiany, R. N., López Weibel, C., Domínguez Rúben, L., Latosinski, F. G., & Arcelus, C. A. (2021). Procedimiento para la estimación de la concentración de sedimento en suspensión en un curso fluvial con un aDcp Sontek M9®. En *Resúmenes del XXIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Asociación Internacional de Ingeniería e Investigación Hidroambiental (IAHR). México (Evento Virtual).
- Nardin, A. R., Szupiany, R. N., & Arcelus, C. A. (2021). Suspended sand load in lower Uruguay River. Online: *II Young Professional Network Congress – IAHR*. 30 November-2 December.
- Nardin, A. R., Szupiany, R. N., Domínguez Rúben, L. G., & Arcelus, A. (2022). A method to obtain Sontek M9® missing values in the sonar equation for sediment concentration calculation. Virtual Event: *2022 Particles in the Americas Conference (PiA 2022)*.
- Nardin, A. R., Domínguez Rúben, L. G., Arcelus, C. A., & Szupiany, R. N. (2023). Vía navegable del río Uruguay: evaluación hidrodinámica de la profundización en el paso San Francisco. En *XXVII Congreso Nacional del Agua - Instituto Nacional del Agua*. Buenos Aires, Argentina.
- Nielsen, P. (1992). *Coastal Bottom Boundary Layers and Sediment Transport*. World Scientific, River Edge, N.J.
- Nikora, V., McEwan, I., McLean, S., Coleman, S., Pokrajac, D., & Walters, R. (2007a). Double-Averaging Concept for Rough-Bed Open-Channel and Overland Flows: Theoretical Background. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(8).
- Nikora, V., McLean, S., Coleman, S., Pokrajac, D., McEwan, I., Campbell, L., Aberle, J., Clunie, D., Koll, K. (2007b). Double-Averaging Concept for Rough-Bed Open-Channel and Overland Flows: Applications. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(8), 884-895.
- Niño, Y., & García, M. H. (1998). Engelund's analysis of turbulent energy and suspended load. *Journal of Engineering Mechanics*, 124, 480-483.
- Nordin, C. F. (1971). *Statistical properties of dune profiles*. Professional Paper, United States Geological Survey. doi: 10.3133/pp562F
- Organización Meteorológica Mundial. (2011). *Guía de prácticas hidrológicas - Volumen I - Hidrología – De la medición a la información hidrológica - OMM-Nº 168* (Sexta ed.). Ginebra, Suiza: Organización Meteorológica Mundial.

- Organización Meteorológica Mundial. (2011). *Guía de prácticas hidrológicas. Volumen II - Gestión de recursos hídricos y aplicación de prácticas hidrológicas* - OMM - N°168 (Sexta ed.). Ginebra, Suiza: Organización Meteorológica Mundial.
- Paintal, A. S. (1971). Concept of critical shear stress in loose boundary open channels. *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, 9, 91–113. <https://doi.org/10.1080/00221687109500339>
- Paoli, C. U., Iriando, M., & García, N. (2000). Capítulo 1: Características de las cuencas de aporte. En C. Paoli, M. Schreider, C. U. Paoli, & M. Schreider (Edits.), *El río Paraná en su tramo medio* (pág. 34). Santa Fe: Universidad Nacional del Litoral.
- Parker, G. (1979). Hydraulic Geometry of Active Gravel Rivers. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*. 105 (8). <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0005275>
- Parker, G. (2004). *1D Sediment transport morphodynamics with applications to rivers and turbidity currents*. Copyrighted e-book downloadable at http://hydrolab.illinois.edu/people/parkerg/morphodynamics_e-book.htm.
- Pasquini, A. I., & Depetris, P. J. (2007). Discharge trends and flow dynamics of South American rivers draining the southern Atlantic seaboard: An overview. *Journal of Hydrology*, 333, 385-399. 10.1016/j.jhydrol.2006.09.005
- Patterer, N. I., Kröhlting, D. M., & Zucol, A. F. (2020). Phytolith analysis in Quaternary fluvial deposits (El Palmar Formation-Late Pleistocene) of the Uruguay River valley, Entre Ríos province, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 100.
- Preciozzi Porta, F., Spoturno Pioppo, J., Heinzen Marziotto, W., & Rossi Kempa, P. (1985). *Carta geológica del Uruguay a escala 1:500.000*. Montevideo: Dirección Nacional de Minería y Geología. Ministerio de Industria y Energía. Uruguay.
- Prendes, H. H., Huespe, J., Mangini, S., Amsler, M., Piedra Cueva, I., Irigoyen, M., . . . Zamanillo, E. (2005). Sedimentación de finos en el embalse de Salto Grande. Relevamiento de las zonas con mayores depósitos. *Salto Grande: VI Taller Internacional sobre Enfoques para el Desarrollo y Gestión de Embalses en la Cuenca del Plata*.
- Rayleigh, M. F. (1877). *On progressive waves*. *Proceedings of the London Mathematical Society*, s1-9(1), 21-26.
- Re, M., Sarubbi, A., & Menéndez, Á. (2009). *Modelación Hidro-Sedimentológica del Río de la Plata - DINÁMICA DE SEDIMENTOS*. Ezeiza, Buenos Aires, Argentina: Laboratorio de Hidráulica - Instituto Nacional del Agua.
- Re, M., Sabarots Gerbec, M., & Menéndez, Á. (2010). *Modelación Hidro-Sedimentológica del Río de la Plata - IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO SEDIMENTOLÓGICO*. Ezeiza, Buenos Aires, Argentina: Laboratorio de Hidráulica - Instituto Nacional del Agua.
- Rennie, C. D., Millar, R. G., & Church, M. A. (2002). Measurement of bedload velocity using an acoustic Doppler current profiler. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(5), 473-483.
- Rennie, C. D., & Millar, R. G. (2004a). Measurement of the spatial distribution of fluvial bedload transport velocity in both sand and gravel. *Earth, Surface, Processes and Landforms*, 29(10), 1173-1193.
- Rennie, C. D., & Villard, P. V. (2004b). Site specificity of bed load measurement using an acoustic Doppler current profiler. *Journal of Geophysical Research*, 109(F03003).
- Rennie, C. D. (2017). Sediment Transport. En J. Aberle, C. Rennie, D. Admiraal, & M. Muste (Edits.), *Experimental Hydraulics: Methods, Instrumentation, Data Processing and Management - Volume II: Instrumentation and Measurements Techniques* (págs. 261-307). London, UK, UK: CRC Press.
- Rhoads, B. L. (2020). *River Dynamics: Geomorphology to Support Management*. Cambridge: Cambridge University Press.

- Rubin, D. M., & Hunter, R. E. (1982). Bedform climbing in theory and nature. *Sedimentology*, 29, 121-138.
- Sassi, M. G., Hoitink, A. J., & Vermeulen, B. (2012). Impact of sound attenuation by suspended sediment on ADCP backscatter calibrations. *Water Resources Research*, 48(W095290).
- Schlichting, H., & Gersten, K. (2000). *Boundary-Layer Theory* (9th ed.). Berlin: Springer.
- Schulkin, M., & Marsh, H. W. (1962). Sound absorption in sea water. *Journal of the Acoustical Society of America*, 34, 864-865.
- Schumm, S. A. (1985). Patterns of alluvial rivers. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 13(1), 5-27. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.13.050185.000253>
- Seminara, G. (1995). Effect of grain sorting on the formation of bedforms. *Applied Mechanics Reviews*, 48(9), 549-563.
- Sequoia Scientific, Inc. (2024). <https://www.sequoiasci.com/product/lisst-sl/>.
- Serra, S. G. (2007). Tesis de maestría: *Flujo y transporte sobre un lecho con dunas*. Santa Fe, Argentina: Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas - Universidad Nacional del Litoral.
- Shaw, E. M. (1994). *Hydrology in Practice* (Third Edition ed.). Taylor & Francis.
- Simons, D. B., Richardson, E. V., & Nordin, C. F. (1965). *Bedload equation for ripples and dunes*. Washington D.C., USA: United States Geological Survey - US Government Printing Office.
- Simpson, M. R. (2001). *Discharge measurements using a broad-band acoustic Doppler current profiler*. Sacramento, CA: United States Geological Survey.
- Sontek, a Xylem brand. (2022). *RiverSurveyor S5/M9 - System Manual*. Obtenido de <https://info.xylem.com/RiverSurveyorManual.html>
- Sterling, P. (06 de 2019). *Comunicación personal*, representante comercial de Xylem/Sontek para latinoamérica.
- Subsecretaría de Infraestructura y Política Hídrica. (2021). Sistema Nacional de Información Hídrica. Recuperado el 2021, de <https://snih.hidricosargentina.gob.ar/>
- Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación Argentina. (2014). *Publicaciones Hidrometeorológicas 2013*.
- Szupiany, R. N., Trento, A. E., & Álvarez, A. M. (2005). Transporte de sedimentos de fondo en el río Salado (Santa Fe, Argentina). *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 10(1), 79-88.
- Szupiany, R. N., Amsler, M. L., Parsons, D. R., & Best, J. L. (2009). Morphology, flow structure, and suspended bed sediment transport at two large braid-bar confluences. *Water Resources Research*, 45(W05415).
- Szupiany, R. N., López Weibel, C., Guerrero, M., Latosinski, F. G., Wood, M., Domínguez Rúben, L., & Oberg, K. (2019). Estimating sand concentrations using ADCP-based acoustic inversion in a large fluvial system characterized by bi-modal suspended-sediment distributions. *Earth, surface, processes and landforms*. doi: 10.1002/esp.4572
- Takezawa, K. (2005). *Introduction to nonparametric regression* (1a, p. 4 ed.). Hoboken, NJ: John Wiley and Sons.
- Teledyne RD Instruments. (1999). *Using the 305A4205 Hydrophone to Identify the RSSI Scale Factors for Calibrating the Echo Strength Output of an ADCP*. San Diego, CA: Teledyne RD Instruments.
- Teledyne RD Instruments. (2007). *Work Horse Rio Grande ADCP Users Guide*. P/N 957-6167-00. Teledyne RDI Instruments.

- Teledyne RD Instruments. (2011). *Acoustic Doppler Current Profiler Principles of Operation. A Practical Primer* (Fourth edition for Broadband ADCPs ed.). Poway, California, USA.
- Ten Brinke, W. B., Wilbers, A. W., & Wesseling, C. (1999). Dune Growth, Decay and Migration Rates during a Large-Magnitude Flood at a Sand and Mixed Sand–Gravel Bed in the Dutch Rhine River System. *Fluvial Sedimentology VI*, 28, 15-32. doi:10.1002/9781444304213.ch2
- Thomas, L. P., Marino, B. M., Szupiany, R. N., & Gallo, M. N. (2017). Characterisation of the suspended particulate matter in a stratified estuarine environment employing complementary techniques. *Continental Shelf Research*, 148, 37-43.
- Thorne, P. D., Hardcastle, P. J., & Soulsby, R. L. (1993). Analysis of acoustic measurements of suspended sediments. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 98(1), 899-910.
- Thorne, P. D., & Hanes, D. M. (2002). A review of acoustic measurement of small-scale sediment processes. *Continental Shelf Research*, 22, 603-632.
- Thorne, P. D., & Meral, R. (2008). Formulations for the scattering properties of suspended sandy sediments for use in the application of acoustics to sediment transport processes. *Continental Shelf Research*, 28, 309-317.
- 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.
- Thorne, P. D., Hardcastle, P. J., & Dolby, J. W. (1998). Investigation into the application of cross-correlation analysis on acoustic backscattered signals from suspended sediments to measure nearbed current profiles. *Continental Shelf Research*, 18, 695-715.
- Topping, D. J., Wright, S. A., Melis, T. S., & Rubin, D. M. (2007). High-resolution measurements of suspended-sediment concentration and grain size in the Colorado River in Grand Canyon using a multi-frequency acoustic system. En *PROCEEDINGS OF THE TENTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RIVER SEDIMENTATION: "The Effects of River Sediments and Channel Processes on Social, Economic and Environmental Safety"* (pág. 470). Moscú, Rusia.
- Topping, D. J., & Wright, S. A. (2016). *Long-term continuous acoustical suspended-sediment measurements in rivers-Theory, application, bias, and error*. USGeological Survey Professional Paper 1823, USGeological Survey, Reston, VA.
- Tossini, L. (1959). Sistema hidrográfico y cuenca del río de la Plata. *Anales de la Sociedad Científica Argentina*, CLXVII(III-IV), 41-64.
- United States Federal Interagency Sedimentation Project. (2021). Federal Interagency Sedimentation Project. Consultado el 17 de diciembre de 2021, de https://water.usgs.gov/fisp/catalog_index.html
- Urick, R. J. (1948). The absorption of sound in suspensions of irregular particles. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 20(3), 283-289.
- Urick, R. J. (1983). *Principles of Underwater Sound* (3rd edn.). New York: McGraw-Hill.
- Urien, C. M. (1972). Rio de la Plata Estuary Environments. En B. W. Nelson (Ed.), Environmental framework of coastal plain estuaries (págs. 213-234). *The Geological Society of America, Inc. Annual Memoir* 133.
- van der Mark, C., & Blom, A. (2007). A new and widely applicable tool for determining the geometric properties of bedforms. Enschede, Netherlands.: CE&M Research Report 2007R-003/WEM-002 ISSN 1568-4652, University of Twente.
- van der Mark, C. F., Blom, A., & Hulscher, S. J. (2008). Quantification of variability in bedform geometry. *Journal of Geophysical Research*, 113(F03020), 1-11.

- van Rijn, L. C. (1984a). *Sediment Transport, Part I: Bed Load Transport*. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(10), 1431-1456.
- van Rijn, L. (1984b). Sediment Transport, Part II: Suspended Load Transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(11), 1613-1641.
- van Rijn, L. (1984b). Sediment transport, part III: bed forms and alluvial roughness. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(12), 1733-1754.
- van Rijn, L. (1993). *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*. The Netherlands: Aqua Publications.
- van Rijn, L. C. (2007). *Manual sediment transport measurements in rivers, estuaries and coastal seas*. Rijkswaterstaat, Aqua Publications.
- Vanoni, V. A. (1975). *Sedimentation Engineering - Classic Edition*, ASCE Manual and Reports on Engineering Practice 54 (1a ed.). Reston, VA: ASCE/EWRI.
- Vanoni, V. (2006). *Sedimentation Engineering*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
- Venditti, J. G., Church, M., Attard, M. E., & Haught, D. (2016). Use of ADCPs for suspended sediment transport monitoring: An empirical approach. *Water Resources Research*, 52, 2715-2736.
- Vilaseca, F. (2019). Tesis de maestría: *Avances para la estimación del transporte de sedimentos por fondo en cauces fluviales de Uruguay*. Montevideo, Uruguay: Universidad de la República.
- Villalba, S. (2018). *Informe Final Práctica Profesional Supervisada*. Paysandú, República Oriental del Uruguay: Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas - Universidad Nacional del Litoral.
- Villalba, S., Nardin, A. R., & Arcelus, C. A. (2019). Use of Hydrodynamic models for decision-making in dredging works. Uruguay River waterway case (Argentina). En *Proceedings of the PIANC Smart Rivers Conference*. Lyon, Francia: PIANC.
- Villard, P., Church, M., & Kostaschuk, R. (2005). Estimating bedload in sand-bed channels using bottom tracking from an acoustic Doppler profiler. *Fluvial Sedimentology VII*, 35, 197-209.
- Vincent, C. E., & MacDonald, I. T. (2015). A flocculi model for the acoustic scattering from flocs. *Continental Shelf Research*, 104, 15-24.
- Wall, G. R., Nystrom, E. A., & Litten, S. (2006). *Use of an ADCP to compute suspended-sediment discharge in the Tidal Huson River*, New York. Reston, VA: US Geological Survey Scientific Investigations Report 2006-5055.
- Wentworth, C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The Journal of Geology*, 30(5), 377-392.
- Wilson, K. C. (1966). Bedload Transport at High Shear Stresses. *Journal of the Hydraulics Division*. ASCE, 92 (HY6), 49–59. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0001562>
- Wosiacki, L. F., Suekame, H. K., Wood, M. S., Gonçalves, F. V., & Bleninger, T. (2021). Mapping of suspended sediment transport using acoustic methods in a Pantanal tributary. *Environ. Monit. Assess.* (193), 493.
- Wright, S. A., Topping, D. J., & Williams, C. A. (2010). Discriminating silt-and-clay from suspended-sand in rivers using sidelooking acoustic profilers. En P. o. Conference (Ed.), *Proceedings of the Joint Federal Interagency Conference on Sedimentation and Hydrologic Modeling*. Las Vegas, NV, USA. Obtenido de <https://acwi.gov/sos/pubs/2ndJFIC/Contents/>
- Yalin, M. S. (1963). An Expression for Bedload Transportation. *Journal of the Hydraulic Division*, ASCE, 89 (HY3), 221–250. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0000874>

Zorndt, A., Wurpts, A., Schlurmann, T., Ohle, N., & Strotmann, T. (2011). Dune migration and sand transport rates in tidal estuaries: the example of the river Elbe. *Coastal Engineering Proceedings*, 32(1). <https://doi.org/10.9753/icce.v32.sediment.38>