

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Maestría en Ciencias de la Ingeniería

Mención en Recursos Hídricos

**CARACTERIZACIÓN DEL TRANSPORTE DE
SEDIMENTOS EN UN TRAMO DEL RÍO TERCERO
(CTALAMOCHITA) UTILIZANDO TECNOLOGÍA
ACÚSTICA DOPPLER**

TESIS DE MAESTRÍA

Autora: Ing. Ana Inés Heredia Ligorria

Director: Dr. Ing. Carlos Marcelo García Rodríguez

Córdoba, 2017

CARACTERIZACIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN UN TRAMO DEL RÍO TERCERO (CTALAMOCHITA) UTILIZANDO TECNOLOGÍA ACÚSTICA DOPPLER

Autora: Ing. Ana Inés Heredia Ligorria
Director: Dr. Ing. Carlos Marcelo García Rodríguez

Palabras Claves: ADCP, Río Tercero (Ctalamochita), transporte de sedimentos, formas de fondo.

Resumen

El Río Tercero (Ctalamochita) es uno de los principales cursos fluviales de la Provincia de Córdoba (módulo de 27 m³/s). Si bien es un sistema fluvial regulado por la presencia de embalses en su cuenca alta, durante los eventos de crecidas se produce un importante movimiento de material del lecho del río en su tramo intermedio, ocasionando problemas típicos de la hidráulica fluvial como erosiones y sedimentaciones. El sistema fluvial del Río Tercero está monitoreado sistemáticamente en su calidad del agua desde hace aproximadamente diez años y desde hace cinco se realiza la cuantificación sistemática del recurso en un trabajo conjunto entre el Centro de Estudios y Tecnología del Agua de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Universidad Nacional de Córdoba (CETA – FCEfYN – UNC), y el Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos de la Provincia de Córdoba a través de la Secretaría de Recursos Hídricos. Sin embargo, hasta la actualidad no se han realizado estudios de transporte de sedimentos en forma sistemática y precisa que permitan cuantificar los distintos procesos de transporte de sedimentos en este sistema fluvial. Esto se debe principalmente a que para condiciones de flujo medias y altas (en las cuales se desarrollan los principales fenómenos de transporte de sedimentos en el sistema fluvial estudiado), la medición del transporte de sedimentos con las técnicas convencionales resulta difícil, insegura y con una gran incertidumbre en los resultados.

En los últimos años se ha incrementado el uso de nuevas tecnologías hidroacústicas (utilizadas comúnmente para medir la velocidad del agua) como alternativa para la cuantificación del transporte de sedimentos en sistemas fluviales,

tanto en condiciones de crecidas (aguas medias y altas) como en estiaje. En este marco el objetivo de esta tesis es la caracterización del transporte de sedimentos en el río Tercero (Ctalamochita) utilizando tecnología acústica Doppler, desarrollando, validando e implementando una metodología rápida y segura para la cuantificación del transporte de sedimentos (tanto en suspensión como de fondo) en condiciones de flujo de aguas medias y altas, con dos instrumentos acústicos utilizados comúnmente para medir la velocidad de flujo (un velocímetro acústico Doppler - ADV y un perfilador de corriente acústico Doppler ADCP). Para cumplimentar este objetivo se realizaron ensayos de laboratorio e intensas campañas de medición en una sección del Río Tercero (Ctalamochita), en Villa María. Los principales resultados obtenidos incluyen el desarrollo y calibración en laboratorio y la validación en campo de herramientas para estimar el transporte de sedimentos en suspensión con ADV y ADCP, la caracterización de las formas de fondo y cálculo del transporte de fondo del Río Tercero (Ctalamochita) con ADCP, y la determinación de la rugosidad del cauce considerando las formas de fondo.

CHARACTERIZATION OF SEDIMENT TRANSPORT ON A SECTION OF TERCERO (CTALAMOCHITA) RIVER USING DOPPLER ACOUSTIC TECHNOLOGY

Author: Ing. Ana Inés Heredia Ligorria
Director: Dr. Ing. Carlos Marcelo García Rodríguez

Key Words: ADCP, Tercero (Ctalamochita) river, sediment transport, bedforms.

Abstract

The Tercero (Ctalamochita) river is one most important rivers of Córdoba province (annual mean discharge of 27 m³/s). Although its flow discharge depends of the reservoir in the upper basin, during flood events, an important bed movement is carried out in its intermediate section causing problems such as erosion and sedimentation. Water Quality studies in Tercero (Ctalamochita) river system has been made for approximately ten years, and flow discharge quantification has been made for five years (in a join effort between the UNC Centro de Estudios y Tecnologia del Agua, CETA) and Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Publicos of Province of Cordoba. Currently, sediment transport studies have not been carried out in a systematic and precise way to know the sediment transport processes in this river. This is mainly due the fact that for medium and high flow conditions (where main phenomena of sediment transport in the studied river system is developed) the measurement of sediment transport with conventional techniques are difficult, unsafe and the results have a great uncertainty.

In recent years, the use of hydroacoustic technologies (commonly used to measure water velocity and discharge) has been used as an alternative for the quantification of sediment transport in river systems, both in flood conditions (medium and high water) and for low flow conditions. In this framework, the objective of this work is the characterization of sediment transport at Tercero (Ctalamochita) River using Doppler Acoustic technology, developing, validating and implementing an easy and safe methodology for the quantification of sediment transport (both in suspension and bedload), with two acoustic instruments commonly used to measure flow velocity (an

Acoustic Doppler Velocimeter - ADV and an Acoustic Doppler Current Profiler - ADCP). To achieve this objective, laboratory tests and field measurement were carried out in a section of Tercero (Ctalamochita) River, located in Villa María. The main results obtained include the development and calibration in laboratory and the validation in the field of developments to estimate the transport of suspended sediments with ADV and ADCP, the characterization of the bedforms and calculation of the bedload at Tercero (Ctalamochita) River with ADCP, and determining the roughness of the channel considering the bedforms.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primer lugar a mis padres y a mi país por darme la oportunidad de poder estudiar, alcanzar un título de grado y ahora uno de posgrado.

Gracias a mi director Carlos Marcelo García, por acompañarme y guiarme en este camino, que resultó un desafío a nivel grupal el comenzar el estudio de una nueva temática. A la comisión asesora (Ricardo Szupiany, Teresa Reyna y Francisco Latonsinski) por la paciencia, la ayuda y cada uno de los aportes a este trabajo. A mis compañeros (y amigos) del CETA y del LH por compartir el día a día en la oficina y horas (muchaa horas) de campañas.

A los profesores de la maestría, por transmitirme sus conocimientos y experiencias. A los compañeros de cursado, de los cuales me llevo amigos para toda la vida y colegas de trabajo.

A mis amigas y amigos extra universidad, que desde hace más de diez años me acompañan en cada nuevo emprendimiento incondicionalmente.

Finalmente quiero agradecer a todas las personas que de una u otra manera aportaron a la realización de esta tesis, tamizando, procesando datos, midiendo o simplemente cebándome un mate, se que esto no hubiese sido posible sin cada uno de su aporte.

¡Muchas gracias a todos!

INDICE GENERAL

CAPÍTULO I: Marco Referencial

1.1 Introducción.....	17
1.2 Sistema fluvial de estudio	19
1.3 Objetivos	24
1.3.1. Objetivos generales	24
1.3.2. Objetivos específicos	25
1.4 Organización de la tesis	25

CAPÍTULO II: Conceptos Básicos sobre el Transporte de Sedimentos

2.1 Introducción.....	27
2.2 Transporte de sedimentos en ríos: tipos de transporte de sedimentos.....	27
2.3 Expresiones empíricas desarrolladas para cuantificar distintos tipos de transporte de sedimentos.....	29
2.4 Herramientas empíricas para la predicción de formas de fondo	33
2.5 Métodos convencionales de medición de distintos tipos transporte de sedimentos	37
2.6 Nuevas tecnologías de medición de distintos tipos de transporte de sedimentos .	41
2.6.1 Nuevas tecnologías para el sedimento en suspensión.....	41
2.6.2 Nuevas tecnologías para el sedimento de fondo	48

CAPÍTULO III: Metodología y Técnicas Experimentales Utilizadas para Cuantificar el Transporte de Sedimentos en Suspensión

3.1 Introducción.....	51
3.2 Formulación acústica	51
3.2 Instrumental utilizado.....	54
3.2.1 Perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP)	54
3.2.2 Velocímetro acústico Doppler (ADV)	57
3.3 Metodología experimental desarrollada	59
3.3.1 Calibración en laboratorio	59
3.4 Resultados.....	62
3.4.1 Resultados con ADV	62
3.4.2 Resultados con ADCP	64

3.4.3 Comparación de resultados ADV y ADCP	69
3.4.4 Validación en campo.....	70
3.5 Discusión	73

CAPÍTULO IV: Metodología y Técnicas Experimentales Utilizadas para Cuantificar el Transporte de Sedimentos de Fondo

4.1 Introducción	75
4.2 Técnicas experimentales utilizadas	76
4.2.1 Muestreadores convencionales del transporte de sedimentos de fondo	76
4.2.2 Perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP)	77
4.3 Metodologías experimentales desarrolladas	77
4.3.1 Medición de transporte de fondo con la trampa Helley-Smith.....	78
4.3.2 Mediciones de transporte de fondo con el método del lazo (Loop Method) con el ADCP	78
4.3.3 Mediciones de transporte de fondo estacionarias con ADCP	81
4.3.4 Mediciones de transporte de fondo dinámicas con el ADCP	83
4.4 Resultados.....	85
4.4.1 Resultados de muestreo de material de fondo	85
4.4.2 Resultados de expresiones empíricas para la predicción de formas de fondo.....	88
4.4.3 Resultados de medición de transporte de fondo con la trampa Helley-Smith	90
4.4.4 Resultados de transporte de fondo a partir de mediciones con el método del lazo con ADCP	90
4.4.5 Resultados de transporte de fondo a partir de mediciones estacionarias con ADCP.....	93
4.4.6 Resultados de transporte de fondo obtenidos con mediciones dinámicas con ADCP.....	97
4.4.7 Contraste de resultados experimentales con fórmulas empíricas del transporte de fondo.....	101
4.5 Discusión	103

CAPÍTULO V: Hidrodinámica del Flujo sobre las Formas de Fondo

5.1 Introducción.....	108
-----------------------	-----

5.2 Resistencia del flujo en cursos fluviales con formas de fondo	108
5.2.1 Método de cálculo de la rugosidad equivalente con el método de Van Rijn	109
5.2.2 Método de cálculo de la rugosidad efectiva con perfiles de velocidad sobre la forma de fondo	110
5.3 Resultados	111
5.3.1 Resultado de la rugosidad equivalente con el método de Van Rijn	111
5.3.2 Resultado de la rugosidad efectiva con perfiles de velocidad	113
5.4 Discusión	118

CAPÍTULO VI: Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones	121
6.2 Conclusiones sobre las actividades relacionadas al transporte de sedimentos en suspensión	121
6.3 Conclusiones sobre las actividades relacionadas a la cuantificación del transporte de sedimentos de fondo	122
6.4 Conclusiones en relación con las actividades de caracterización hidrodinámica del flujo sobre las formas de fondo	123
6.5 Trabajos futuros	124

REFERENCIAS	126
--------------------------	------------

ANEXOS: Publicaciones desarrolladas en esta tesis	134
--	------------

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Cuenca del Río Carcarañá (modificado de Díaz Lozada, 2014)	20
Figura 2.- Perfil longitudinal del Río Tercero (Ctalamochita) – Carcarañá (Basile et al., 2013).....	21
Figura 3.- Cuenca del Río Tercero (modificado de Lenarduzzi, 2013).....	22
Figura 4.- Complejos hidroeléctricos ubicados en la cuenca alta del Río Tercero (Ctalamochita)	23
Figura 5.- Sección de estudio seleccionada para cuantificar el transporte de sedimentos en el Río Tercero (Ctalamomchita): Puente Alberdi, Villa María	24
Figura 6.- Perfil esquemático del transporte de sedimentos.....	29
Figura 7.- Predictor de formas de fondo de Boguchwal & Southard (adaptado por Ashley, 1990)	35
Figura 8.- Diagrama de clasificación de formas de fondo de Chabert & Chauvin (1963)	36
Figura 9.- Diagrama de sedimentación en ríos de Shields & Parker (García, 2000)	37
Figura 10.- Muestreador de sedimentos en suspensión integrado en la vertical	38
Figura 11.- Muestreador pasivo de sedimentos en suspensión	39
Figura 12.- Muestreador de sedimentos en suspensión por bombeo (modificado de Morris y Fan, 1997).....	40
Figura 13.- Cuantificación del transporte de fondo (Hudson, 1993)	40
Figura 14.- Muestreadores utilizados para cuantificar el transporte de fondo.....	41
Figura 15.- Turbidímetro digital DTS-12 (catálogo de especificaciones técnicas FTS inc.)	42
Figura 16.- Estimador de sedimentos por difracción láser (LISST) (de Sequoia Scientific Inc.: http://www.sequoiasci.com/)	43
Figura 17.- Radiómetro (instrumento óptico multifrecuencia) apuntando al río (fuera de la fotografía) (Gray, 2012)	44
Figura 18.- Ejemplo del método de estimación de sedimentos por imágenes ópticas digitales (Gray y Gartner, 2010)	44
Figura 19.- Estimador de sedimentos en suspensión por diferencia de presiones (Gray, 2012).....	45
Figura 20.- Sensor acústico de retrodispersión.....	46
Figura 21.- Perfil de concentración de sedimentos en suspensión estimado con perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP).....	47
Figura 22.- Función de forma de retrodispersión para diferentes frecuencias acústicas y tamaño de partículas promedio, modificado de Latosinski et al. 2017	53
Figura 23.- Colisión del pulso acústico con las partículas (Simpson, 2001)	55
Figura 24.- Descripción del instrumento utilizado: ADCP SonTek S5 (SonTek, 2013) ...	56

Figura 25.- Micro ADV YSI SonTek 16MHz utilizado en los experimentos de esta tesis (adaptado de Rusello, 2009).....	58
Figura 26.- Planta y Corte del Tanque de los Ensayos	61
Figura 27.- Instrumentos de Medición en el Tanque.....	61
Figura 28.- Evolución de SNR (ADV) y la concentración de sedimentos en suspensión (CSS).....	63
Figura 29.- Evolución de AMP (ADV) con la concentración de sedimentos en suspensión CSS).....	63
Figura 30.- Resultados del programa RiverSurveyor Live para cada concentración evaluada en el ensayo N° 9	65
Figura 31.- Evolución de los valores de SNR en el tiempo para el modo coherente en el ensayo N°9	66
Figura 32.- Evolución de los valores de SNR en el tiempo para el modo incoherente en el ensayo N°9	66
Figura 33.- Curvas que muestran la evolución de los valores de SNR (ADCP en modo coherente) con la concentración de sedimentos en suspensión.....	67
Figura 34.- Curvas que muestran la evolución de los valores de SNR (ADCP en modo incoherente) y la concentración de sedimentos en suspensión.....	67
Figura 35.- Curvas que muestran el acuerdo entre los valores SNR del ADCP en modo coherente y los valores de SNR del ADV	69
Figura 36.- Curvas que muestran el acuerdo entre los valores SNR del ADCP en modo incoherente y los valores de SNR del ADV	70
Figura 37.- Contraste de la concentración de sedimentos en suspensión (CSS) estimada con la ecuación 33 y la concentración de sólidos suspendidos totales medidos	72
Figura 38.- Trampa de sedimentos de fondo Helley-Smith. Arriba para estiaje y abajo para crecida	76
Figura 39.- Esquema del método del lazo con ADCP	79
Figura 40.- Método del lazo en la campaña del día 23/10/2015 en Río Tercero (Ctalaochita), sección Villa María	79
Figura 41.- Detalle de los resultados del método del lazo en la campaña del día 23/10/2015 en Río Tercero (Ctalamochita), sección Villa María	80
Figura 42.- Medición estacionaria con ADCP en la campaña del día 23/10/2015 en Río Tercero (Ctalamochita), sección Villa María.....	82
Figura 43.- Proyección de las mediciones longitudinales con ADCP.....	84
Figura 44.- Puntos de muestreo equidistantes en la sección de medición	86
Figura 45.- Curva granulométrica del material de fondo de río Tercero (Ctalamochita)	87
Figura 46.- Predictor de formas de fondo propuesta por Boguchawl & Southard, adaptado por Ashley (1990)	88

Figura 47.- Predictor de formas de fondo de Chabert & Chauvin (1963)	89
Figura 48.- Diagrama de sedimentación en ríos de Shields-Parker (García 2000).....	89
Figura 49.- Resultado del método del lazo de la campaña del 23/10/2015, $Q=13,18 \text{ m}^3/\text{s}$	91
Figura 50.- Resultado del método del lazo de la campaña del 16/03/2016, $Q=113,85 \text{ m}^3/\text{s}$	91
Figura 51.- Resultado del método del lazo de la campaña del 08/04/2016, $Q=65,84 \text{ m}^3/\text{s}$	91
Figura 52.- Resultado del método del lazo de la campaña del 05/09/2016, $Q=24,90 \text{ m}^3/\text{s}$	92
Figura 53.- Resultado del método del lazo de la campaña del 07/11/2016, $Q=18,89 \text{ m}^3/\text{s}$	92
Figura 54.- Medición estacionaria de la campaña del 16/03/2016, $Q=113,85 \text{ m}^3/\text{s}$	94
Figura 55.- Medición estacionaria de la campaña del 08/04/2016, $Q=65,84 \text{ m}^3/\text{s}$ (primera parte)	94
Figura 56.- Medición estacionaria de la campaña del 08/04/2016, $Q=65,84 \text{ m}^3/\text{s}$ (segunda parte)	94
Figura 57.- Medición estacionaria de la campaña del 05/09/2016, $Q=24,90 \text{ m}^3/\text{s}$	94
Figura 58.- Medición estacionaria de la campaña del 07/11/2016, $Q=18,89 \text{ m}^3/\text{s}$	95
Figura 59.- Señal original y señal filtrada campaña 16/03/2016, $Q=113,85 \text{ m}^3/\text{s}$	95
Figura 60.- Señal original y señal filtrada campaña 08/04/2016, $Q=65,84 \text{ m}^3/\text{s}$	95
Figura 61.- Señal original y señal filtrada campaña 05/09/2016, $Q=24,90 \text{ m}^3/\text{s}$	96
Figura 62.- Señal original y señal filtrada campaña 07/11/2016, $Q=18,89 \text{ m}^3/\text{s}$	96
Figura 63.- Mediciones dinámicas realizadas la campaña del 16/03/2016, $Q=113,85 \text{ m}^3/\text{s}$	98
Figura 64.- Mediciones dinámicas realizadas la campaña del 05/09/2016, $Q=24,90 \text{ m}^3/\text{s}$	98
Figura 65.- Mediciones dinámicas realizadas la campaña del 07/11/2016, $Q=18,89 \text{ m}^3/\text{s}$	101
Figura 66.- Expresiones empíricas del transporte de sedimento de fondo aplicadas al Río Tercero (Ctalamochita).....	102
Figura 67.- Evolución del transporte de sedimento de fondo con el caudal líquido ...	106
Figura 68.- Rugosidad equivalente de formas de fondo, Van Rijn (1984)	110
Figura 69.- Contribución de la rugosidad k_s de grano y el de forma	112
Figura 70.- Evolución del coeficiente n de Manning con el caudal líquido.....	112
Figura 71.- Perfil de velocidades en cresta, lomo y valle para la duna del 16/03/2016, $Q=113,85 \text{ m}^3/\text{s}$	113
Figura 72.- Perfil de velocidades en cresta, lomo y valle para la duna del 08/04/2016, $Q=65,84 \text{ m}^3/\text{s}$	114

Figura 73.- Perfil de velocidades en cresta, lomo y valle para la duna del 05/09/2016, Q=24,90 m ³ /s.....	114
Figura 74.- Perfil de velocidades en cresta, lomo y valle para la duna del 07/11/2016, Q=18,89 m ³ /s	115
Figura 75.- Ajuste de la función logarítmica al perfil de velocidades en cresta, lomo y valle para la duna del 16/03/2016, Q=113,85 m ³ /s	115
Figura 76.- Ajuste de la función logarítmica al perfil de velocidades en cresta, lomo y valle para la duna del 08/04/2016, Q=65,84 m ³ /s	116
Figura 77.- Ajuste de la función logarítmica al perfil de velocidades en cresta, lomo y valle para la duna del 05/09/2016, Q=24,90 m ³ /s	116
Figura 78.- Ajuste de la función logarítmica al perfil de velocidades en cresta, lomo y valle para la duna del 07/11/2016, Q=18,89 m ³ /s	117

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Características principales del cauce actual del río por tramos (Saldaño, 2010)	21
Tabla 2.- Clasificación del Transporte de Sedimentos (García, 2007).....	28
Tabla 3.- Características ADCP RiverSurveyor S5 (SonTek, 2013).....	57
Tabla 4.- Características del Micro ADV SonTek 16Mhz (http://www.sontek.com)	58
Tabla 5.- Resumen de los ensayos realizados en laboratorio	62
Tabla 6.- Funciones ajustadas describiendo la evolución de AMP (ADV) con la concentración de sedimentos en suspensión (CSS)	64
Tabla 7.- Funciones ajuste de la evolución de SNR (ADCP) con la concentración de sedimentos en suspensión	68
Tabla 8.- Relación promedio entre SNR (ADCP) del modo incoherente y el coherente	69
Tabla 9.- Funciones ajuste del SNR del ADCP y SNR del ADV.....	70
Tabla 10.- Cálculo de la concentración de sedimentos en suspensión con mediciones del ADCP	71
Tabla 11.- Comparación de técnicas de ADPC para evaluar el transporte de fondo.....	85
Tabla 12.- Parámetros hidráulicos medidos en las campañas en el Río Tercero (Ctalamochita) con ADCP.....	85
Tabla 13.- Granulometría del material de fondo	87
Tabla 14.- Diámetros característicos del material de fondo de río Tercero (Ctalamochita)	87
Tabla 15.- Resultado del transporte de sedimento de fondo con la trampa Helley-Smith	90
Tabla 16.- Resumen de los resultados del método del lazo	93
Tabla 17.- Características del flujo y longitudes de filtrado de la señal.....	97
Tabla 18.- Características de las dunas medidas.....	97
Tabla 19.- Resultados de mediciones dinámicas con ADCP de la campaña del 16/03/2016	99
Tabla 20.- Resultados de mediciones dinámicas con ADCP de la campaña del 05/09/2016	100
Tabla 21.- Resultados de mediciones dinámicas con ADCP de la campaña del 07/11/2016	100
Tabla 22.- Diferencia del transporte de fondo calculado con el método estacionario y el dinámico	100
Tabla 23.- Resumen de las ecuaciones empíricas de transporte de fondo	101
Tabla 24.- Diferencias porcentuales del transporte de fondo con expresiones empíricas (a).....	103
Tabla 25.- Diferencias porcentuales del transporte de fondo con expresiones empíricas (b).....	103

Tabla 26.- Resultados del cálculo de la rugosidad equivalente con formas de fondo.	111
Tabla 27.- N de Manning calculado con los perfiles de velocidad sobre dunas	119
Tabla 28.- Comparación del n de Manning calculado con el perfil de velocidades y con el método de Van Rijn	118

CAPÍTULO I: MARCO REFERENCIAL

*Caracterización del Transporte de Sedimentos en un tramo del Río Tercero (Ctalamochita)
utilizando Tecnología Acústica Doppler*

HEREDIA LIGORRIA, ANA INÉS

1.1 Introducción

La cuantificación y caracterización del transporte de sedimentos en cursos fluviales es importante debido a que permite conocer cómo se llevan a cabo los procesos de erosión y deposición tanto de márgenes como de lecho, su efecto sobre las estructuras y sobre la capacidad del cauce (por la presencia de formas de fondo), entre otros motivos. Esta cuantificación puede hacerse de diferentes maneras: a) por medición directa, b) mediciones indirectas y c) por medio de formulaciones empíricas, propuestas por diferentes investigadores.

Las muestras de sedimentos recogidas en una corriente en una determinada fecha y localización, resultado de mediciones directas, sirven para cuantificar la carga de sedimentos transportada en el momento de medición. Sin embargo, se requieren mediciones sistemáticas (periódicas) para caracterizar la evolución espacial y temporal de los procesos de erosión, transporte y deposición. Actualmente en Argentina la medición del transporte de sedimentos en sistemas fluviales en condiciones de aguas medias y altas (condiciones donde se desarrollan la mayoría de los procesos de transporte de sedimentos) es poco común debido a la complejidad que poseen las técnicas de medición directa convencionales, sumado a una serie de desventajas entre las cuales se pueden nombrar: a) baja resolución espacial y temporal; b) elevado costo; y c) requerimiento de un prolongado tiempo de medición y procesamiento de muestras. Por otro lado, las expresiones empíricas tienen el inconveniente de que no existe formulación apta para todo el rango de tamaño de sedimentos y condiciones de flujo, y cuando se aplican varias fórmulas a un mismo río por lo general se obtienen resultados muy dispersos entre sí.

Diferentes investigaciones están en desarrollo en la actualidad explorando el uso de la tecnología hidro-acústica Doppler (ampliamente utilizada para la medición de caudales en sistemas fluviales) para obtener, de manera indirecta, información cuantitativa sobre el movimiento de las partículas en los cursos fluviales (Latosinski et al., 2014), en sus dos modos de transporte: en suspensión y de fondo.

La cuantificación de sedimentos en suspensión utilizando instrumentos acústicos ha sido descrita y desarrollada durante más de tres décadas (Hay, 1983; Thorne et al.,

1991; Hay & Sheng, 1992; Lynch et al., 1994; Thorne & Hardcastle, 1997; Holdaway et al., 1999; Gartner, 2004; Wall et al., 2006; Gray and Gartner, 2010; Guerrero et al., 2011; Gray & Landers, 2014; Topping et al., 2015; Wood et al., 2015), basados en su mayoría en el desarrollo de la expresión conocida como “ecuación del sonar”, la cual relaciona una variable acústica (por ejemplo la amplitud del retorno acústico generalmente expresada en decibeles [dB]) con la concentración de sedimentos en suspensión usando una regresión lineal. En la ecuación del sonar intervienen diversas variables como la atenuación del agua y los sedimentos, el tamaño del transductor, la frecuencia acústica, la temperatura del agua, la densidad del sedimento, entre otras. Usando estos principios, la tecnología hidro-acústica ha sido implementada en grandes ríos de arena para evaluar el transporte de sedimentos de fondo. Repasando la bibliografía, el transporte de sedimentos de fondo en suspensión fue estudiado por Szupiany et al. (2009), Jamieson et al. (2011), Guerrero et al. (2012), Latosinski et al. (2014), relacionando la concentración de sedimentos de fondo en suspensión en grandes ríos con la intensidad de la señal acústica obtenida con el ADCP, con resultados prometedores. Además, la tecnología hidro acústica ha sido implementada en grandes ríos por Rennie et al. (2002, 2004), Kostaschuk et al. (2005), Villard et al. (2005), quienes correlacionaron la carga de transporte de sedimentos de fondo con la velocidad de fondo aparente cercana al lecho del río obtenida con el ADCP. A su vez Gaeuman & Jacobson (2006,2007), encontraron que el seguimiento de dunas con tecnología acústica es más confiable que el muestreo con los métodos convencionales.

En general, no hay antecedentes en la revisión del estado del arte aplicada en ríos de baja profundidad (menores a 2 m), lo cual deja un área de vacancia en donde se focalizará esta tesis. Por ello, se eligió para el presente estudio el Río Tercero, también conocido como Río Ctalamochita, uno de los principales cursos fluviales de la Provincia de Córdoba, con un módulo de 27 m³/s. En los últimos años se ha observado que durante los eventos de crecida del Río Tercero (Ctalamochita) se producen importantes erosiones en el lecho y las márgenes, provocando daños y perjuicios en las localidades aledañas, como Villa María, Bell Ville, etc. Sumado a esto, la presencia de formas de

fondo modifica la rugosidad del lecho y afecta a las curvas altura-caudal ya existentes, alterando también los niveles de inundación.

El Río Tercero (Ctalamochita) es monitoreado estacionalmente en su calidad de agua desde hace aproximadamente diez años, y desde hace cinco se realiza la cuantificación sistemática del recurso, en un trabajo conjunto entre el Centro de Estudios y Tecnología del Agua de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Universidad Nacional de Córdoba (CETA – FCEfN – UNC), y el Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos de la Provincia de Córdoba a través de la Secretaría de Recursos Hídricos. Sin embargo, hasta la actualidad no se han realizado estudios de transporte de sedimentos en forma sistemática y precisa que permitan cuantificar los distintos procesos de transporte de sedimentos en este sistema fluvial. Esto se debe principalmente a que para condiciones de flujo medias y altas (en las cuales se desarrollan los principales fenómenos de transporte de sedimentos en el sistema fluvial estudiado), la medición del transporte de sedimentos con las técnicas convencionales (que se detallan en el próximo capítulo) resulta difícil, insegura y con una gran incertidumbre en los resultados.

La falta de información sobre las cargas de sedimentos que transportan los ríos de Córdoba y en especial el Río Tercero (Ctalamochita) durante los periodos de aguas medias y altas, se convierten en la motivación tecnológica de esta tesis, por lo que se propone estudiar la dinámica del transporte de sedimentos en este curso fluvial, proponiendo una metodología alternativa a las técnicas de medición convencionales que permita caracterizar experimentalmente el transporte de sedimentos en suspensión y de fondo a partir de la información obtenida de instrumentos acústicos utilizados comúnmente para la medición de velocidad de flujo (un perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP) y un velocímetro acústico Doppler (ADV)).

1.2 Sistema fluvial de estudio

El estudio del transporte de sedimentos que se detalla en esta tesis se realiza en un tramo del Río Tercero (Ctalamochita), el cual es uno de los principales tributarios del

Río Carcarañá. Dicho río constituye un sistema de alimentación pluvial con régimen permanente. Este río, además de ser aprovechado hidroeléctricamente y de ser una importante fuente para el suministro de agua potable en la zona sur y este de la Provincia de Córdoba (por ej. a través de las tomas que realiza la Cooperativa del Sudeste), es utilizado como cuerpo receptor para disposición final de las aguas residuales industriales y de estaciones depuradoras de efluentes cloacales (Cossavella et al., 2003).

Los principales tributarios que dan origen del Río Tercero (Ctalamochita) (Figura 1) enunciados de norte a sur, son el Río Santa Rosa, arroyo Amboy, Río Grande, Río Quillínz y Río de La Cruz o de los Sauces. Los de mayor recorrido son el Grande, el Santa Rosa y el de la Cruz, de los cuáles el primero es el tributario más importante y está conformado por los arroyos Durazno, Manzano y las Letanías.

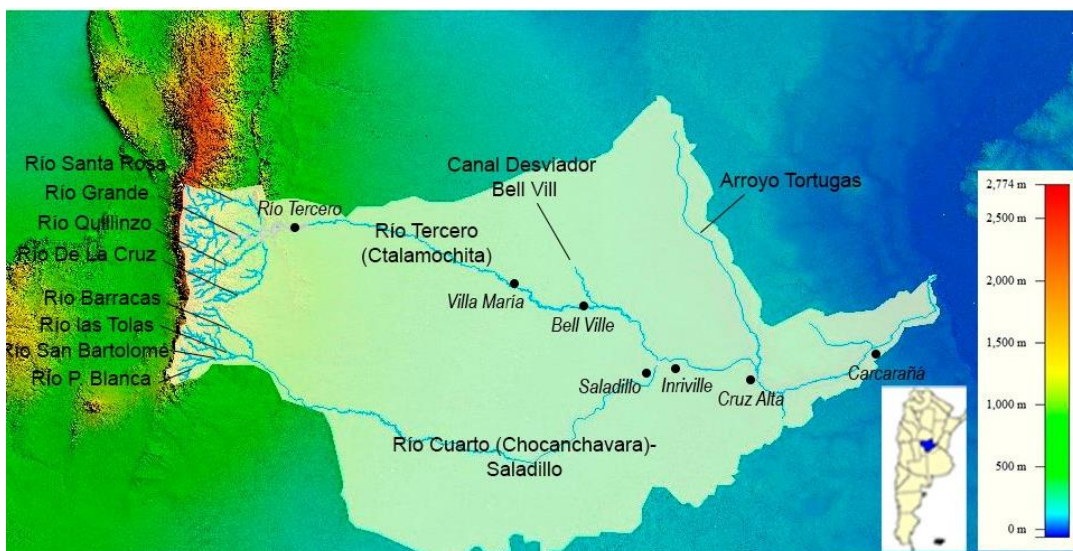


Figura 1.- Cuenca del Río Carcarañá (modificada de Díaz Lozada, 2014)

El Río Tercero (Ctalamochita) nace en el embalse de Río Tercero en las cercanías de la localidad de Embalse al pie de las Sierras de Córdoba, y luego de unos 300 Km se une con el Río Saladillo para formar el Río Carcarañá a la altura de las localidades de Monte Buey e Inrville. En la Figura 2 se presenta un perfil longitudinal del río en el tramo comprendido entre la localidad de Río Tercero y Cruz Alta. En la Tabla 1 se resumen las características morfológicas principales.

Tabla 1.- Características principales del cauce actual del río por tramos (Saldaño, 2010)

Tramo	Prog. Abajo [Km]	Prog. Arriba [Km]	Long. [Km]	Cota T.N. Abajo IGN [m]	Cota T.N. Arriba IGN [m]	Desnivel [m]	So media [%]	Ancho medio [m]
RT – VM	2,3	139,7	137,4	410,0	200,1	209,9	1,53	42,1
VM – BV	139,7	272,8	133,1	200,1	125,4	74,7	0,56	33,8
BV - CA	272,8	426,5	153,7	125,4	63,0	62,4	0,41	29,5

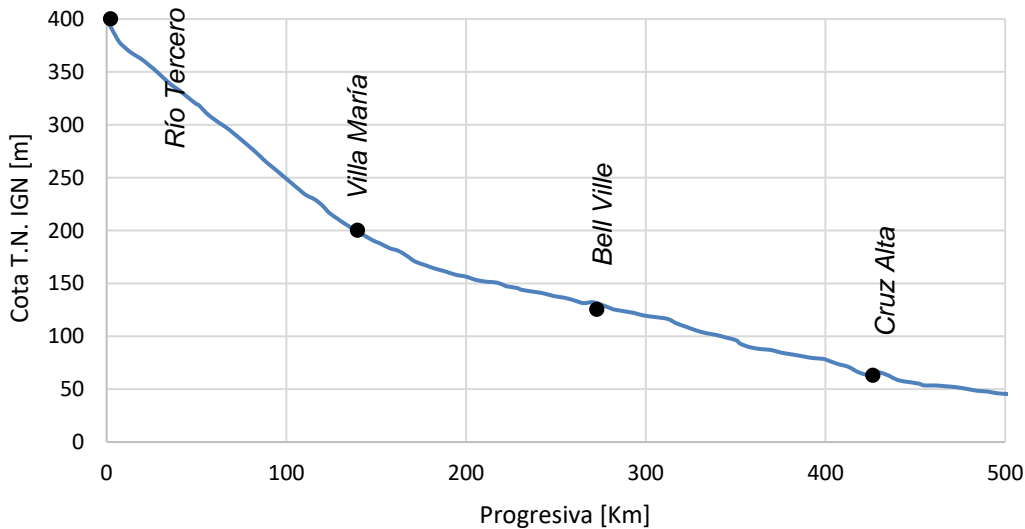


Figura 2.- Perfil longitudinal del Río Tercero (Ctalamochita) – Carcarañá (Basile et al., 2013)

La cuenca del Río Tercero (Ctalamochita) de acuerdo con sus aspectos hidrológicos y geomorfológicos puede dividirse en dos partes: la cuenca alta y la cuenca baja (Figura 3). La cuenca alta abarca una superficie de 3300 Km² (Saldaño, 2010) y en la actualidad los escurrimientos superficiales se utilizan para la generación hidroeléctrica a través de dos sistemas de embalses (Figura 4). La cuenca baja abarca una superficie de 6280 Km² (Saldaño, 2010) y está emplazada en la zona pampeana de la provincia de Córdoba. Constituye un plano sin desniveles apreciables, lo que dificulta su definición. A la altura de Almafuerte el lecho adquiere características de un río de llanura, las barrancas del río disminuyen su altura y lo mismo sucede con las pendientes. Así se favorece el trazado de una gran cantidad de meandros, alcanzando en el tramo Río Tercero-Villa María el máximo ancho (Miatello, 1978).



Figura 3.- Cuenca del Río Tercero (modificado de Lenarduzzi, 2013)

El complejo hidroeléctrico Río Grande cuenta con dos embalses, el superior denominado Cerro Pelado y el inferior Arroyo Corto situado a 12 Km aguas abajo del primero. El desnivel entre ambos es de 185 m y las presas de ambos embalses fueron construidas con material suelto y núcleo impermeable (Trombotto, 2004). El complejo hidroeléctrico de Río Tercero está constituido por los embalses: Río Tercero, Ingeniero Cassaffouth, Ingeniero Benjamín Reolín y Piedras Moras. El embalse Río Tercero tiene un volumen a cota de vertedero de 560 Hm³ con un espejo de 46000 Has (Saldaño, 2010). La central hidroeléctrica al pie de la presa lleva el nombre de Fitz Simon y genera 12 MW. En la costa sur del reservorio, a 30 Km del Río Tercero (Ctalamochita) se encuentra la Central Nuclear Embalse, con una producción mayor a los 600 MW. El embalse Ingeniero Cassaffouth se encuentra 4,5 Km aguas abajo del Embalse Río Tercero. Tiene un volumen a cota de vertedero de 10,4 Hm³ con un espejo de agua de 88 Has. El embalse Ingeniero Reolín se encuentra a 11 Km y 6,5 Km aguas abajo de los embalses Tercero y Cassaffouth, respectivamente. Tiene un volumen a cota de vertedero de 24 Hm³ con un espejo de 266 Has. El embalse compensador Piedras Moras es el cuarto dique de este sistema, tiene una capacidad de 89,8 Hm³ y 832 Has de superficie. Mediante obras de toma y conducción se alimenta la central hidroeléctrica ubicada al pie de presa.

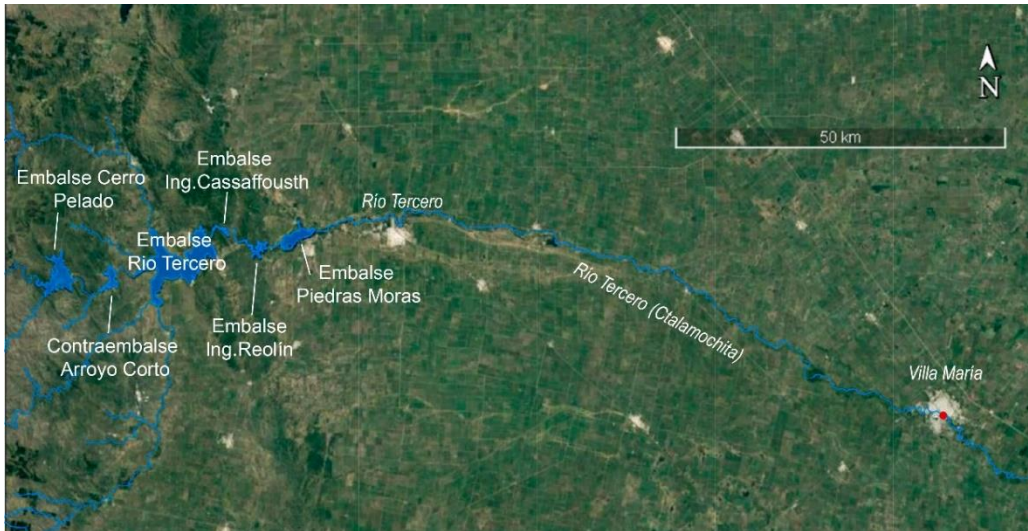


Figura 4.- Complejos hidroeléctricos ubicados en la cuenca alta del Río Tercero (Ctalamochita)

En lo que se refiere a estudios previos realizados en esta cuenca, Díaz Lozada (2014) realizó la cuantificación y caracterización del escurrimiento superficial en la cuenca utilizando técnicas hidroacústicas. Además, el autor realizó la caracterización granulométrica del material del lecho de algunas secciones. En lo que respecta al transporte de sedimentos en este sistema fluvial, Balbis et al. (2007) realizaron un análisis multitemporal de un tramo del Río Tercero (Ctalamochita), cercano a la ciudad de Villa Ascasubi, para evaluar los procesos erosivos de este río en las inmediaciones de un puente y una torre media de tensión, concluyendo que el río tuvo importantes movimientos laterales los últimos 35 años, con la generación de erosiones laterales de barrancas. Existen también algunos estudios de la producción de sedimentos en la cuenca vecina de Río Cuarto (Chocancharava), otro tributario significativo del Río Carcarañá como por ejemplo los estudios desarrollados por Corral et al. (2009), Degiovanni et al. (2013) y Andreazzini et al. (2014). Sin embargo, hasta la actualidad no se han realizado en la cuenca del Río Tercero (Ctalamochita) estudios de transporte de sedimentos en forma sistemática y precisa que permitan cuantificar los distintos procesos de transporte de sedimentos en este sistema fluvial. Esto se debe principalmente a que para condiciones de flujo medias y altas (en las cuales se desarrollan los principales fenómenos de transporte de sedimentos en el sistema fluvial estudiado), la medición del transporte de sedimentos con las técnicas convencionales resulta difícil, insegura y con una gran incertidumbre en los resultados

Para la realización de los estudios experimentales en esta tesis, se seleccionó una sección particular del Río Tercero (Ctalamochita) ubicada en las inmediaciones de la ciudad de Villa María, a la altura del puente Alberdi (Figura 5). La misma fue seleccionada por: a) los procesos de erosión y deposición que ocurren principalmente en ese tramo durante eventos de crecidas, b) la accesibilidad al lugar y c) la presencia de un puente que permita realizar las mediciones con el instrumental en forma segura.

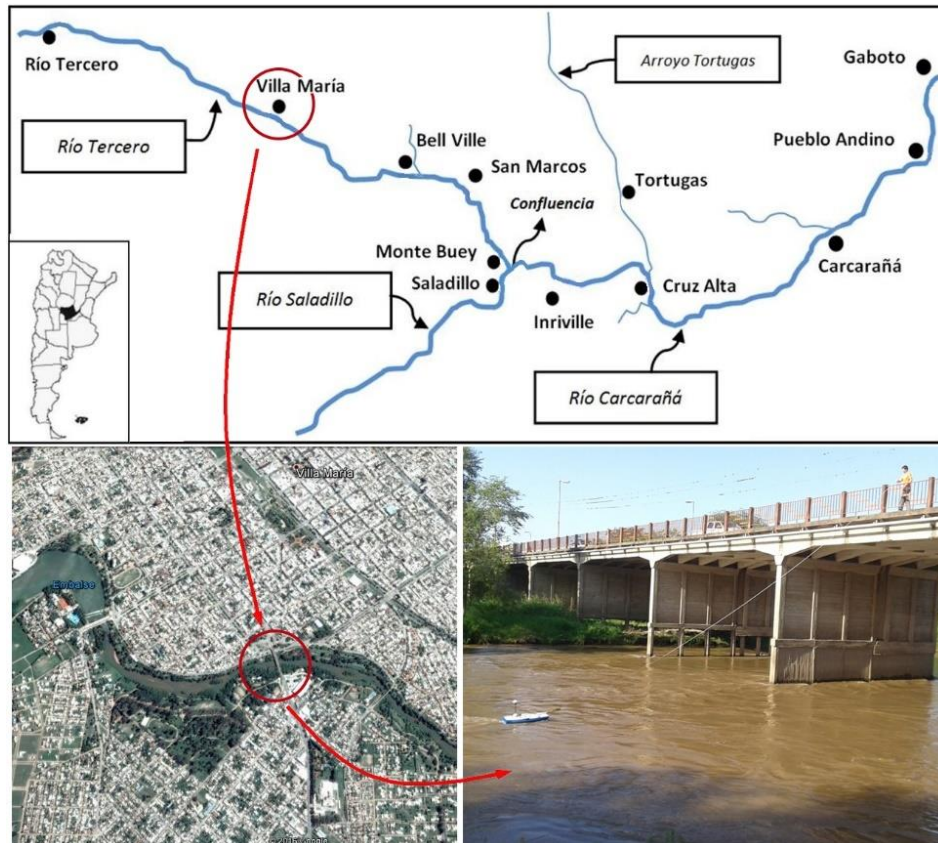


Figura 5.- Sección de estudio seleccionada para cuantificar el transporte de sedimentos en el Río Tercero (Ctalamochita): Puente Alberdi, Villa María

1.3 Objetivos

1.3.1. Objetivo general

El objetivo general de esta tesis es la caracterización del transporte de sedimentos en un tramo del Río Tercero (Ctalamochita) utilizando tecnología acústica Doppler, desarrollando, validando e implementando una metodología rápida y segura para la cuantificación del transporte de sedimentos (tanto en suspensión como de

fondo) en condiciones de flujo de aguas medias y altas, con dos instrumentos acústicos utilizados comúnmente para medir la velocidad de flujo (un velocímetro acústico Doppler - ADV y un perfilador de corriente acústico Doppler ADCP).

1.3.2. Objetivos específicos

- Desarrollo y validación de una metodología para la cuantificación del transporte de sedimentos en suspensión en cursos fluviales utilizando tecnología hidro- acústica.
- Desarrollo y validación de una metodología para la cuantificación del transporte de sedimentos de fondo en cursos fluviales utilizando tecnología hidro- acústica.
- Estudio de la hidrodinámica del flujo sobre las formas de fondo.

1.4 Organización de la tesis

Para el desarrollo de esta tesis, en primer lugar, se ha realizado una recopilación de antecedentes e información del sistema de estudio, lo que ha permitido definir la problemática existente, áreas de vacancia y los objetivos de la tesis, siendo todos estos aspectos documentados en el presente capítulo. En el capítulo 2 se enuncian los conceptos básicos del fenómeno del transporte de sedimentos, incluyendo los criterios de clasificación de transporte, las técnicas convencionales de medición y las nuevas tecnologías existentes en el estado del arte para su estimación, evaluando ventajas y debilidades de cada una en el sistema de estudio. En los capítulos 3 y 4 se presentan el desarrollo y validación de una metodología para la cuantificación del transporte de sedimentos en suspensión y de fondo respectivamente, en el tramo del río estudiado, utilizando tecnología hidro- acústica. En el capítulo 5 se presenta la influencia de las formas de fondo en la hidrodinámica del flujo. Finalmente, en el capítulo 6 se detallan las principales conclusiones alcanzadas a lo largo de toda la tesis, y se plantean las recomendaciones pertinentes para trabajos futuros. Durante el desarrollo de este trabajo se publicaron resultados parciales en artículos científicos y técnicos presentados en diferentes congresos y reuniones científico-técnicas que se incluyen en el anexo de esta tesis.

CAPÍTULO II: CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

*Caracterización del Transporte de Sedimentos en un tramo del Río Tercero (Ctalamochita)
utilizando Tecnología Acústica Doppler*

HEREDIA LIGORRIA, ANA INÉS

2.1 Introducción

En este capítulo se enuncian los conceptos básicos del fenómeno del transporte de sedimentos, incluyendo los criterios de clasificación de transporte, las técnicas convencionales de medición y las nuevas tecnologías existentes en el estado del arte para su estimación, evaluando ventajas y debilidades de cada una en el sistema de estudio.

2.2 Transporte de sedimentos en ríos: tipos de transporte de sedimentos

El transporte de sedimentos hace referencia al sedimento que está en movimiento en un río. Hay dos clasificaciones habituales de este transporte conforme a diferentes criterios: según el modo de transporte y según el origen del material (Tabla 2), como se puede ver en la Figura 6. La primera distingue entre transporte en suspensión y transporte de fondo. El transporte en suspensión está conformado por los sedimentos finos como limos y arcillas, aunque también puede incluir partículas de arena, que son mantenidos en el seno de flujo por la turbulencia. Puede representar el 90% o más de todo el transporte sólido de un río y dentro de éste el transporte de lavado puede ser el más importante. El transporte de fondo es aquel que viaja cercano al fondo, ya sea por rodamiento, deslizamiento o saltación (en correspondencia con el tamaño del grano: de grueso a fino respectivamente), sin alejarse lo suficiente del lecho. Este transporte tiene el efecto sobre el río mismo ya que condiciona el fondo del cauce y sus modificaciones, y es por ello el interés en la hidráulica fluvial. El transporte de fondo (material del cauce) está relacionado a las características del cauce: ancho, pendiente, granulometría, caudal, etc (Maza Álvarez y Flores, 1996).

La diferencia principal en el comportamiento entre ambos materiales consiste en que el transporte de fondo depende de las características hidráulicas de la corriente y de las características físicas del material mientras que el transporte en suspensión no. Por lo tanto, si dos ríos tienen tramos semejantes, con idéntico material en el fondo, transportarían la misma cantidad de material de fondo bajo condiciones hidráulicas semejantes. Lo anterior no ocurre con el material en suspensión: en forma general, un

río puede transportar tanto material de lavado como llegue a él, casi independientemente de las características hidráulicas de la corriente.

El transporte en suspensión siempre tiene lugar en suspensión, mientras que el transporte del material de fondo puede tener lugar dentro de la capa de fondo (la que se encuentra inmediatamente arriba del lecho del cauce) o en suspensión. Entonces una partícula inicialmente en reposo puede ser transportada rodando o saltando cuando se supera el umbral de movimiento, pero si la corriente sigue creciendo puede ser luego transportada en suspensión. Cuanto más intensa es la velocidad del flujo mayor es el tamaño del material que puede ser puesto en suspensión y transportado de ese modo.

Tabla 2.- Clasificación del transporte de sedimentos (García, 2007)

Transporte Total de Sedimento	Criterios de Clasificación	
	Según el Mecanismo de Transporte	Según el Origen del Material
Carga de Lavado	Carga en Suspensión	Cuenca
Carga de Fondo en Suspensión	Carga en Suspensión	Lecho
Carga de Fondo	Carga de Fondo	Lecho

Según el origen del sedimento puede ser de la cuenca que aporta al tramo de río en estudio o del mismo cauce. El sedimento cuyo origen es el cauce puede ser transportado de ambos modos: en suspensión y por el fondo. Si el origen del material transportado es la cuenca hidrográfica estamos en presencia de partículas muy finas (limos y arcillas con diámetros menores a 0,625mm) las cuales son transportadas siempre en suspensión y se denominan carga de lavado (de la cuenca), la cual está relacionada con las características hidrológicas y geomorfológicas de la cuenca (tipo de suelos y cobertura, topografía, precipitaciones, etc.). El material transportado en suspensión tiene gran repercusión en la desembocadura de un sistema fluvial, en la formación de deltas y la colmatación de embalses.

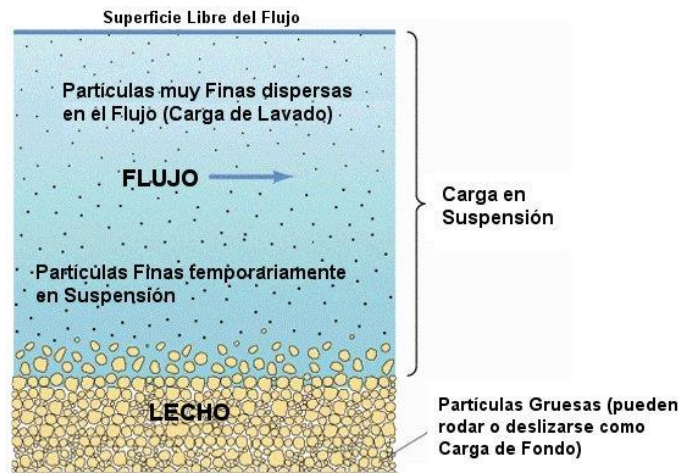


Figura 6.- Perfil esquemático del transporte de sedimentos

En resumen, se puede afirmar que el caudal sólido total en un río está formado por la carga de fondo, la carga de fondo en suspensión y la carga de lavado, como se ve en la ecuación 1.

$$q_{st} = q_{sb} + q_{ss} + q_w \quad [1]$$

Donde:

q_{st} : caudal sólido total;

q_{sb} : caudal de material de lecho que se transporta por el fondo;

q_{ss} : caudal de material de lecho que se transporta en suspensión;

q_w : caudal de material proveniente de la cuenca (de lavado).

2.3 Expresiones empíricas desarrolladas para cuantificar distintos tipos de transporte de sedimentos

La cuantificación del caudal sólido de un río puede hacerse mediante mediciones (ya sean directas o indirectas) o estimarse con el empleo de fórmulas empíricas. En la próxima sección se detallan los inconvenientes que generalmente se presentan cuando se realizan mediciones de transporte de sedimentos con técnicas habituales. En esta sección se presentan las expresiones empíricas utilizadas para estimar el caudal sólido de una corriente en función de sus características hidráulicas y de las propiedades geométricas y granulométricas del cauce. Sin embargo, su aplicación es limitada ya que no existe ninguna formulación apta para todas las condiciones y tamaños de

sedimentos, y cuando se aplican varias fórmulas a un mismo río por lo general se obtienen resultados muy distintos entre sí.

En el presente trabajo se decidió trabajar con fórmulas empíricas debido a que la aplicación de fórmulas analíticas derivadas de las ecuaciones de mecánica de los fluidos es de mayor dificultad y no proporcionan un resultado adecuado (Bertoni et al., 2016). Se estudiaron seis fórmulas empíricas que se detallan a continuación, para luego compararlas con las mediciones en campo y seleccionar la que más se adecúe al comportamiento real del tramo estudiado. (Estas ecuaciones son válidas para el transporte de sedimento de fondo). Las fórmulas de transporte de fondo estudiadas fueron:

- a) Ecuación de Meyer-Peter y Müller (1948);
- b) Ecuación de Wong y Parker (2006);
- c) Ecuación de Ashida y Michue (1972);
- d) Ecuación de Du Boys (1879) y Straub (1935);
- e) Ecuación de Einstein y Brown (1950);
- f) Ecuación de Van Rijn (1982).

a) Ecuación de Meyer-Peter y Müller (1948)

La ecuación de Meyer-Peter y Müller (1948) desarrollada para calcular el arrastre de la capa de fondo fue obtenida a partir de experiencias realizadas entre 1932 y 1948 en el Instituto Tecnológico Federal de Zurich (Meyer-Peter y Muller, 1948). Es válida para cuantificar el transporte de sedimentos de fondo con las siguientes características:

$$0,4mm < d_{50} < 30mm$$

$$1250Kg/m^3 < \rho_s < 4200Kg/m^3$$

La expresión está dada por la ecuación 2:

$$q_b = \phi \gamma_s \sqrt{g \Delta d_{50}^3} \quad [2]$$

Donde:

q_b : caudal sólido transportado en el fondo;

γ_s : peso específico saturado del sedimento;

g : aceleración de la gravedad;

Δ : peso específico sumergido relativo del sedimento;

$\gamma_s' = \gamma_s - \gamma$: peso específico sumergido;

d_{50} : diámetro característico del sedimento. (Diámetro del tamiz en el cual queda retenido el 50% del material);

ϕ : parámetro de intensidad del transporte, dado por la ecuación 3

$$\phi = 8 (\bar{\tau}' - 0,047)^{3/2} \quad [3]$$

$\bar{\tau}'$: tensión de corte adimensional debida únicamente a la fricción (rugosidad del grano). Se determina a partir de la ecuación 4.

$$\bar{\tau}' = \frac{RS}{\Delta d_{50}} \quad [4]$$

b) Ecuación de Wong y Parker (2006)

En 2006, Wong y Parker reanalizaron los datos utilizados por Meyer-Peter y Muller obteniendo un mejor ajuste del parámetro ϕ , que se muestra en la ecuación 5.

$$\phi = 4,93 (\bar{\tau}' - 0,047)^{1,6} \quad [5]$$

c) Ecuación de Ashida y Michue (1972)

Ashida y Michiue propusieron en 1972 una ecuación semiempírica para evaluar el transporte de fondo (ecuación 6) y la verificación utilizando sedimentos uniformes con diámetros comprendidos entre:

$$0,3mm < d_{50} < 7mm$$

Donde el del parámetro ϕ se calcula como:

$$\phi = 17 (\bar{\tau}' - 0,05) (\sqrt{\bar{\tau}'} - \sqrt{0,05}) \quad [6]$$

d) Ecuación de Du Boys (1879) y Straub (1935)

Du Boys en 1879 establece por primera vez una fórmula para estimar el arrastre de material sólido en el fondo de un río o canal. Straub en 1935 introdujo mejoras a la ecuación, llegando a la expresión ecuación 7. Él fijó como límite de aplicación:

$$0,1mm < d_{84} < 4mm$$

$$q_b = \frac{0,01003}{d_{50}^{3/4}} \tau_o (\tau_o - \tau_c) \quad [7]$$

Donde τ_c es la tensión de corte crítica, que según Maza Álvarez y García (1996) está dada por la ecuación [8].

$$\tau_c = 41,8 d_{50}^{0,82} - 0,017 \ln(454 d_{50}) \quad [8]$$

e) Ecuación de Einstein y Brown

A partir de los resultados experimentales obtenidos por Gilbert en 1914 y Meyer Peter y Müller, Einstein propuso en 1942 una fórmula para evaluar el arrastre en la capa de fondo, la que en 1950 fue publicada por Brown.

Einstein (1932) propone que el transporte q_b depende del parámetro ψ , intensidad de flujo, que es igual al recíproco del parámetro de Shields (1936) o tensión de corte adimensional τ^* , y del parámetro de intensidad de transporte ϕ . La fórmula propuesta por Einstein es la ecuación 9.

$$0,465 \phi' = e^{-0,391 \psi} \quad [9]$$

Válida para:

$$5,5 \leq \psi \leq 22$$

Donde:

$$\psi = \frac{1}{\tau_*} = \frac{\Delta D_{50}}{R S} \quad [10]$$

$$\phi = \frac{g_B}{\gamma_s \sqrt{g \Delta D_{50}^3}} \quad [11]$$

Al afectar ϕ por el coeficiente de corrección propuesto por Rubey para determinar la velocidad de caída, se obtiene ϕ' (ecuación 12).

$$\phi' = \frac{\phi}{F_1} \quad [12]$$

Donde F_1 vale:

$$F_1 = \left(\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{g\Delta D^3} \right)^{0,5} - \left(\frac{36v^2}{g\Delta D} \right)^{0,5} \quad [13]$$

En el caso que $\psi < 5,5$ Rouse, Boyer y Laursen propusieron la ecuación 14.

$$\phi' = 40 \left(\frac{1}{\psi} \right)^3 \quad [14]$$

Finalmente, el caudal sólido transportado por unidad de ancho y unidad de tiempo está dada por la ecuación 15.

$$q_b = \phi \gamma_s \sqrt{g \Delta} d_{50}^3 \quad [15]$$

f) Ecuación de Van Rijn

La ecuación de Van Rijn fue derivada a través de análisis teóricos y verificada con datos de laboratorio y de campo utilizando sedimentos uniformes con diámetros de partículas comprendidos entre:

$$0,2mm < d_{50} < 2mm$$

Este autor presentó un método mediante el cual determinó el transporte de fondo como el producto de la altura de salto, la velocidad de escurrimiento y la concentración de las partículas, dado por la ecuación 16.

$$q_b = u_b \delta_b C_b = 0,053 (\Delta g)^{0,5} d_{50}^{1,5} D_*^{-0,3} T^{2,1} \quad [16]$$

Donde:

D_* : diámetro adimensional (ecuación 17)

$$D_* = d_{50} \left(\frac{\Delta g}{\nu^2} \right)^{1/3} \quad [17]$$

T : Parámetro de transporte (ecuación 18)

$$T = \frac{(u_*')^2 - (u_{*crit})^2}{(u_{*crit})^2} \quad [18]$$

u_*' : Velocidad de corte efectiva relacionada a los granos (ecuación 19)

$$u_*' = \frac{\sqrt{g}}{C'} \bar{u} \quad [19]$$

u_{*crit} : Velocidad de corte crítica según Shields

C' : Coeficiente de Chézy relacionada al grano (ecuación 20)

$$C' = 18 \log \left(\frac{12 h}{3 d_{90}} \right) \quad [20]$$

2.4 Herramientas empíricas para la predicción de formas de fondo

Una vez iniciado el transporte de fondo, el escurrimiento de agua sobre un fondo móvil interactúa con él, modelando y dando origen a diferentes configuraciones de fondo. Es común distinguir cuatro tipos principales de formas de fondo: rizos, dunas, lecho plano y antidunas. La naturaleza de las interacciones entre el fondo y el fluido, así como también las formas resultantes, depende de la profundidad y la velocidad de flujo, y de las propiedades del fluido y del material granular del fondo.

Varias formas de fondo están asociadas con diversos regímenes de flujo. En el caso de un flujo con fondo de arena con un tamaño característico inferior a aproximadamente 0,5mm, es evidente una clara progresión a medida que aumenta la velocidad de flujo. Suponiendo que el lecho es inicialmente plano, a una velocidad muy baja, el lecho permanece plano porque no se mueve ningún sedimento. A medida que la velocidad supera un valor crítico, se forman rizos. A valores más altos, se desarrollan las dunas y coexisten con los rizos. Para velocidades aún más altas, las dunas bien desarrolladas se forman en ausencia de rizos. Cuando la velocidad alcanza un valor próximo al valor crítico ($F \approx 1$) las dunas desaparecen, dando como resultado un fondo plano conocido como lecho plano de régimen superior (supercrítico). Aumentos adicionales en la velocidad conducen a la formación de antidunas (Cardoso, 1998).

Están ampliamente difundidos en la literatura especializada diversos criterios de previsión de formas de fondo (rizos, dunas, etc.) y regímenes de escurrimiento (régimen inferior, transición o régimen superior). Estos criterios son importantes para la predicción de la resistencia al escurrimiento en la medida que muchas fórmulas suponen la presencia de formas de fondo o un determinado régimen de escurrimiento. Hasta el presente se han intentado dos vías para la predicción de formas de fondo: una vía teórica iniciada por Exner en 1925 y una vía empírica. Esta última ha llevado a la elaboración de gráficos que, en su mayoría definen los dominios de ocurrencia de distintos tipos de formas de fondo en función de dos o tres parámetros. En general es posible identificar al menos tres parámetros adimensionales que gobiernan las formas de fondo, estos son:

- Parámetro de Shields τ^* (ecuación 21). Compara la fuerza que provoca el movimiento del fluido con la fuerza estabilizadora, se observa en la.

$$\tau^* = \sqrt{\frac{\gamma R_h S}{\gamma' D}} \quad [21]$$

- Número de Reynolds del grano (ecuación 22).

$$R_* = \frac{u_* D}{\nu} \quad [22]$$

- Número de Froude (ecuación 23).

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gH}} \quad [23]$$

Donde

γ : peso específico del fluido;

R_h : radio hidráulico;

S : pendiente de fondo;

γ' : peso específico sumergido del sedimento (ecuación 24);

$$\gamma' = \gamma_{sed} - \gamma \quad [24]$$

D : diámetro característico del sedimento;

u^* : velocidad de corte (ecuación 25);

$$u^* = \sqrt{g R_h S} \quad [25]$$

ρ : densidad del agua;

ν : viscosidad cinemática del agua;

V : velocidad media del flujo;

H : profundidad media.

Un predictor de formas de fondo popular en la comunidad geológica fue el propuesto por Boguchwal & Southard, adaptado en 1990 por Ashley, que se muestra en la Figura 7. Es un gráfico donde se sintetizan resultados de observaciones de laboratorio de la velocidad media del flujo y el tamaño medio del sedimento, abarcando el rango de arena fina y gruesa, y profundidades entre 0,20 y 0,40 m.

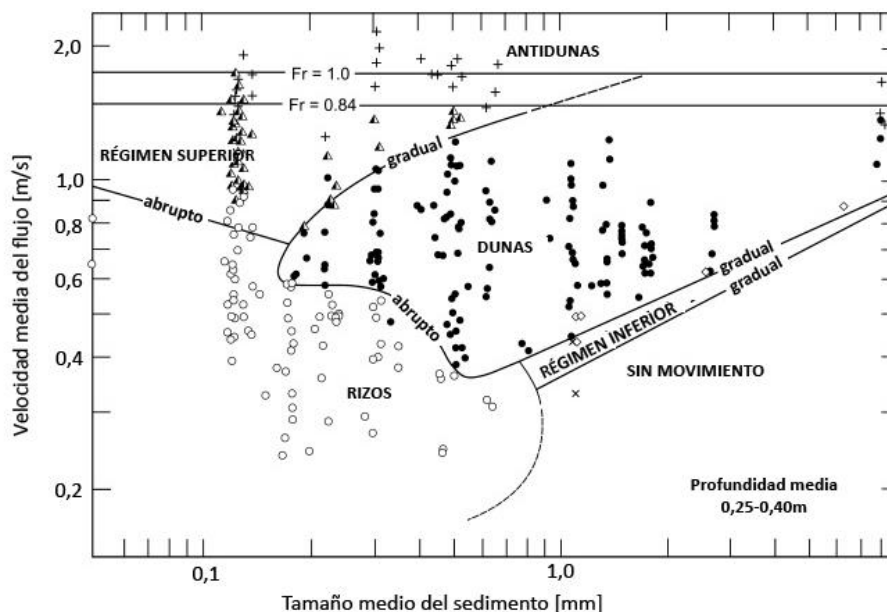


Figura 7.- Predictor de formas de fondo de Boguchwal & Southard (adaptado por Ashley, 1990)

Otro predictor es el propuesto por Chabert & Chauvin (1963), que se puede observar en la Figura 8. Estos autores graficaron el parámetro de Shields (τ^*) y el número de Reynolds del grano (Re^*).

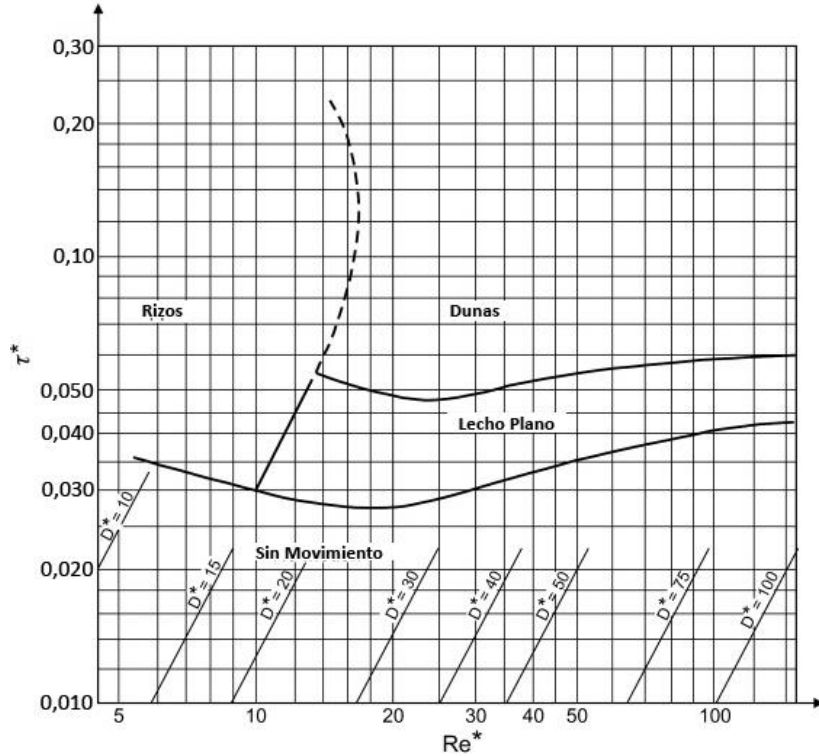


Figura 8.-Diagrama de clasificación de formas de fondo de Chabert & Chauvin (1963)

Por último, se presenta el diagrama de sedimentación en ríos de Shields & Parker, el cual es una modificación del diagrama de Shields original que incluye datos de laboratorio y de campo de ríos de lecho de grava y de arena. En la Figura 8 se puede observar este gráfico, en donde se distinguen tres curvas que permiten conocer, para diferentes valores de τ^* y Re^* , si un sedimento de fondo dado se moverá, y si ese es el caso, si el modo de transporte que prevalece es en suspensión o de fondo. Este gráfico puede ser utilizado también para estimar el tipo de formas de fondo que pueden esperarse para distintas condiciones de flujo y características del sedimento.

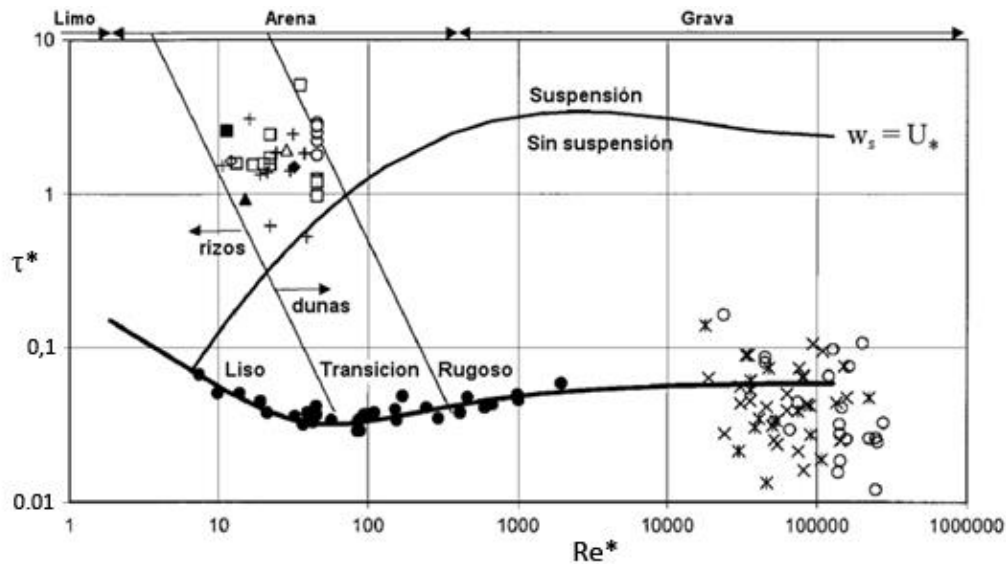


Figura 9.- Diagrama de sedimentación en ríos de Shields & Parker (García, 2000)

2.5 Métodos convencionales de medición de distintos tipos transporte de sedimentos

La medición directa del transporte de sedimentos dependerá del tipo de transporte que se quiera medir, ya sea en suspensión o de fondo. La tecnología convencional utilizada para la medición de sedimentos en suspensión consiste en sumergir un recipiente (muestreador) como el que se observa en la Figura 10. Estos muestreadores pueden ser promediados en la profundidad o puntual. El muestreador integrado en profundidad se desplaza desde la superficie hasta el fondo y se vuelve a la superficie recogiendo la muestra en forma continua. El muestreador puntual está diseñado para tomar una muestra en un punto definido de la corriente durante un tiempo determinado ya que cuenta con una válvula que permite abrir y cerrar el tomador de muestras a voluntad desde la superficie, eléctricamente o por medio de cables. Finalmente, el sedimento contenido en el volumen de agua se filtra, se seca y se pesa. Así se obtiene una medida de la concentración del sedimento.

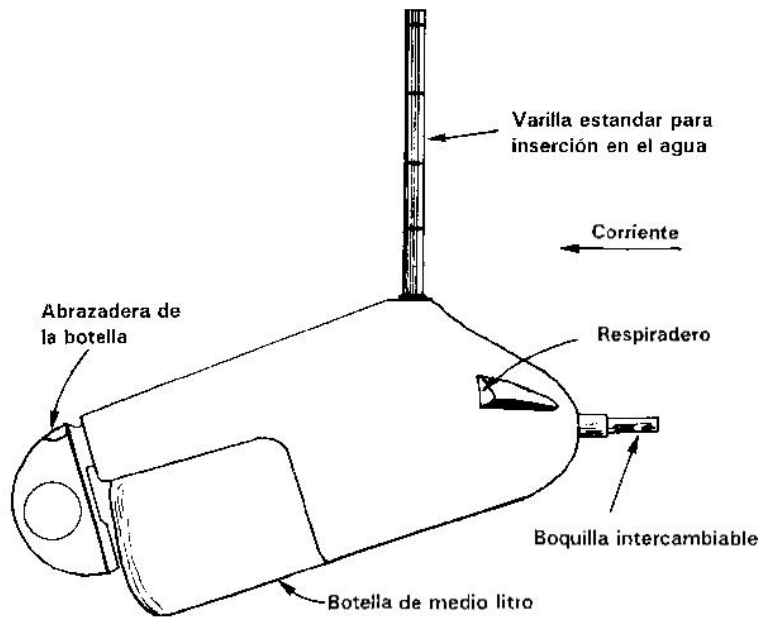


Figura 10.- Muestreador de sedimentos en suspensión integrado en la vertical (Hudson, 1993)

Otro método para obtener muestras a diversas profundidades del curso de agua es el empleo de muestreadores automáticos, que toman una muestra a una profundidad predeterminada. Estos pueden ser pasivos o por bombeo. Los pasivos se utilizan en ríos donde la ubicación y los cambios rápidos de régimen hacen imposible utilizar los muestreadores convencionales integrados en profundidad. Debe ser considerado como un muestreador puntual y su principal objetivo es coleccionar la muestra en forma automática. Consisten en una botella en donde se insertan dos tubos doblados a través de un tapón, ajustado y sellado a la boca del recipiente, como se observa en la Figura 11. Hay dos tipos generales de este muestreador, uno con ingreso vertical y otro con entrada horizontal. El primero es utilizado para ríos con sedimentos más finos que 0,062mm, mientras que el horizontal es para corrientes que transportan sedimentos más gruesos que 0,062 mm.

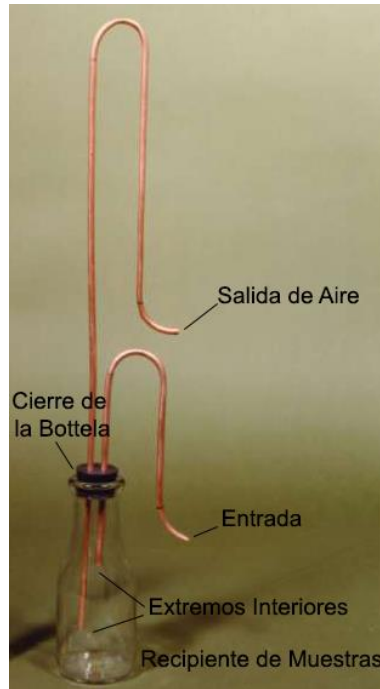


Figura 11.- Muestreador pasivo de sedimentos en suspensión

Los muestreadores automáticos por bombeo consisten en general en una bomba para extraer el sedimento en suspensión, un contenedor de la muestra, un sistema de distribución de las muestras para enviar cada una a la botella correcta, un sistema de activación que comienza o finaliza el ciclo de muestreo, y un sistema de admisión a través del cual se extraen muestras de un punto en la sección transversal determinada (Figura 12). Son útiles para recolectar muestras de sedimentos en suspensión durante períodos de cambios rápidos causados por la escorrentía provocada por la lluvia, reduciendo la necesidad de operarios para una recolección de sedimentos intensiva. Sin embargo, muchas veces requieren más horas hombre y son más costosos, por su complejo mecanismo, los requerimientos de energía, y la capacidad de muestreo limitada.

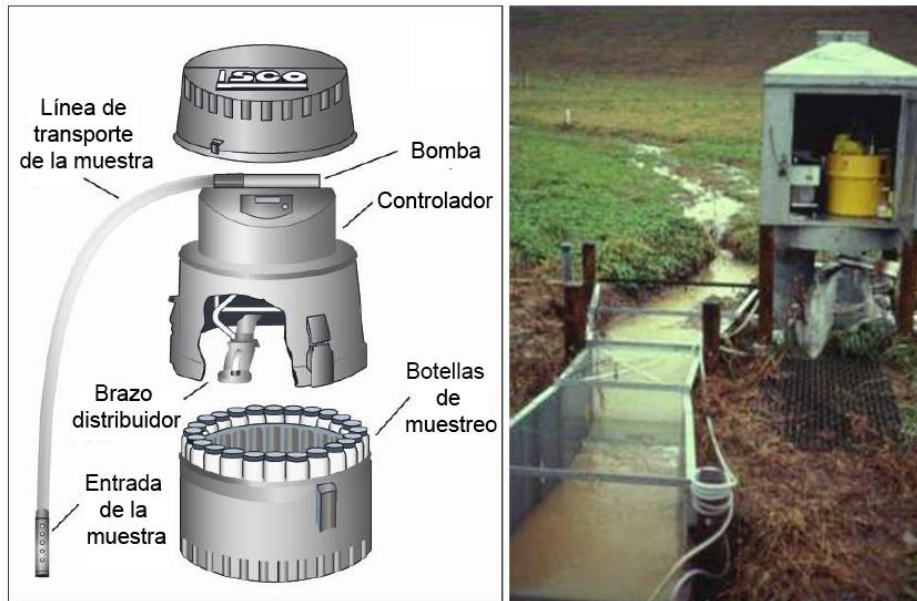


Figura 12.- Muestreador de sedimentos en suspensión por bombeo (modificado de Morris y Fan, 1997)

La cuantificación del transporte de fondo más sencilla consiste en cavar un agujero en el lecho de la corriente, como se ve en la Figura 13, y luego retirar y pesar el material que cae en él. En los lugares con grandes cargas de arrastre, este procedimiento puede necesitar mucho tiempo y resultar engorroso.

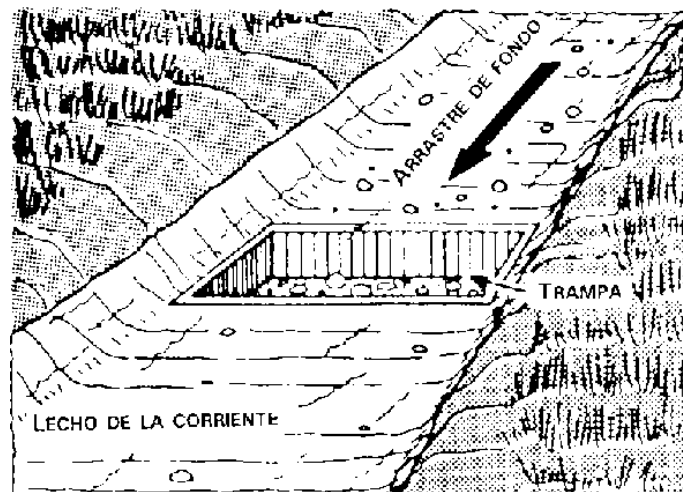


Figura 13.- Cuantificación del transporte de fondo (Hudson, 1993)

Otra forma es por medio de muestras recogidas por un dispositivo que está situado sobre el lecho del río durante un tiempo determinado, del que luego se extrae el material para pesarlo. En la Figura 14 se pueden ver algunos tipos de muestreadores de fondo.



Figura 14.- Muestreadores utilizados para cuantificar el transporte de fondo

La medición de transporte de sedimentos (en suspensión y de fondo) con técnicas tradicionales tiene una serie de desventajas, entre las que se pueden nombrar:

- Consumen mucho tiempo;
- Costosos;
- Implican un trabajo intensivo;
- Resolución espacial y temporal limitadas;
- Mediciones complejas de efectuar y riesgosas.

2.6 Nuevas tecnologías de medición de distintos tipos de transporte de sedimentos

Ante los inconvenientes enunciados en la sección anterior es que distintos grupos de investigación están evaluando tecnologías alternativas para la cuantificación de sedimentos, tanto de fondo como en suspensión, que utilizan instrumentos acoplados a metodologías analíticas y operaciones que permiten la adquisición de información de transporte de sedimentos temporal y espacialmente sin la necesidad de una recolección rutinaria y del análisis de muestras físicas, más que con fines de calibración (Gray et al., 2010).

2.6.1 Nuevas tecnologías para el sedimento en suspensión

Algunos de los instrumentos y técnicas alternativas utilizadas en la actualidad para medir la concentración de sedimentos en suspensión (CSS) son: turbidímetro, difracción laser (LISST), instrumentos ópticos multifrecuencia, diferencia de presión, y tecnología hidroacústica (que se implementa en esta tesis, y será explicado en los capítulos siguientes). A continuación, se describen brevemente estas nuevas tecnologías.

a) Turbidímetro

La turbiedad es una expresión de las propiedades ópticas de una muestra que causa que los rayos de luz se dispersen y sean tanto absorbidos como transmitidos en líneas rectas a través de la muestra. Las mediciones de turbiedad son la forma más común de determinar la claridad del agua y computar la concentración de sólidos en suspensión (CSS). En la Figura 15 se muestra este instrumento.



Figura 15.- Turbidímetro digital DTS-12 (catálogo de especificaciones técnicas FTS inc.)

Uno de los inconvenientes de este instrumento es que se puede acumular material biológico (microorganismos, plantas, algas, etc.) en los sensores (fenómeno conocido por su nombre en inglés: 'biofouling'). Esto altera la curva de calibración, resultando las salidas valores ilógicos; También pueden aparecer problemas cuando los niveles de turbiedad superan el límite máximo del instrumento, saturándose el sensor.

b) Difracción láser (LISST)

Los instrumentos de difracción láser (LISST) miden el tamaño de las partículas a través de la variación angular de la intensidad de la luz dispersada a medida que el rayo láser pasa a través de las partículas en la muestra. Partículas grandes provocan pequeños ángulos, mientras que las partículas pequeñas producen grandes ángulos. La intensidad del ángulo de dispersión es luego analizada para calcular el tamaño de las partículas (Gray y Gartner, 2010). En la Figura 16 se puede observar el estimador de sedimentos láser (LISST).



Figura 16.- Estimador de sedimentos por difracción láser (LISST) (de Sequoia Scientific Inc.: <http://www.sequiasci.com/>)

La mayor ventaja de la tecnología láser es que permite la medición en tiempo real y estos instrumentos no requieren calibración cuando son utilizados para determinar la concentración de sedimentos en suspensión (CSS). Sin embargo, tiene algunas limitaciones: la medición es puntual; la concentración está en unidades de volumen, por lo tanto requiere la estimación de la densidad del sedimento para convertir en unidades de masa; utilizado in situ es susceptible de que se tapen los sensores con material biológico; puede ocurrir la reducción en los datos debido a la presencia de partículas no esféricas y perder de información por la saturación de la señal. Finalmente, es un instrumento costoso, es entre dos o seis veces mayor que un equipo completo de turbiedad.

c) Instrumentos ópticos multifrecuencia

Los instrumentos ópticos multifrecuencia sirven para estimar la cantidad de sedimentos en suspensión sobre la superficie del agua a partir de la radiación solar incidente en el área de medición medida con un radiómetro (Figura 17). Es un método no intrusivo, y uno de sus inconvenientes es que se necesita conocer la relación entre la concentración superficial y la concentración media, sumado a que depende de la luz del ambiente (Gray, 2012).

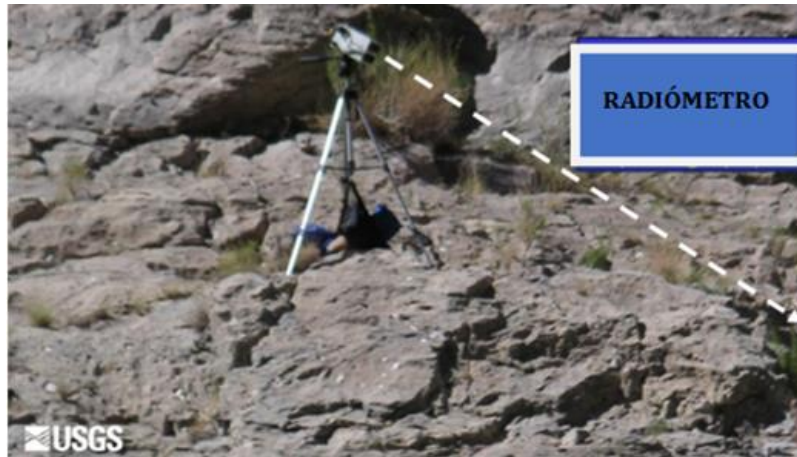


Figura 17.- Radiómetro (Instrumento óptico multifrecuencia) apuntado al río (fuera de la fotografía) (Gray, 2012)

d) Imágenes ópticas digitales

Esta tecnología se basa en el análisis y seguimiento de patrones en imágenes ópticas digitales de muestras de agua para la cuantificación de CSS y tamaños de parátículas presentes. Computa la estadística de los tamaños basada en mediciones automatizadas de partículas individuales y se pueden inferir valores de CSS volumétricos. Esta tecnología aún se halla en fase de desarrollo y testeo de laboratorio en un observatorio del USGS (Anderson et al. 2010), donde planean a su vez promover una versión de campo. Los componentes principales del sistema de muestreo (Figura 18) son hasta tres cámaras de escaneo progresivo (cada una con un lente específico) y una plataforma de celdas sobre la que se montan las cámaras y corre la muestra, además del software de procesamiento y cálculo. Cada lente está unido a la plataforma mediante tubos de extensión que mantienen una alineación óptica precisa entre las cámaras, los lentes, el área objetivo y la iluminación del fondo.

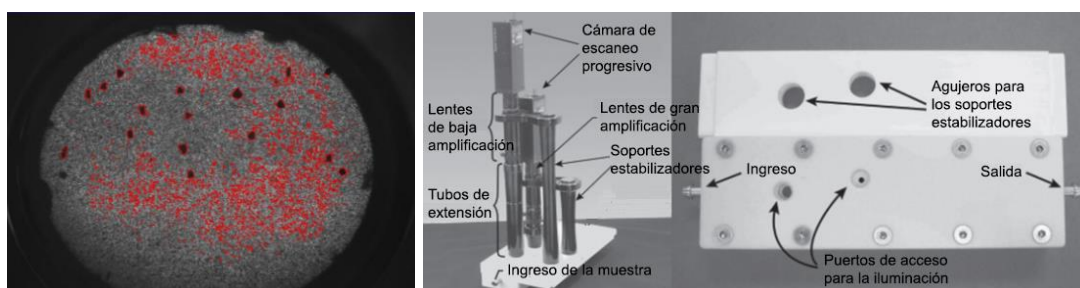


Figura 18.- Ejemplo del método de estimación de sedimentos por imágenes ópticas digitales, (Gray y Gartner, 2010).

El cómputo de la concentración de los sedimentos en suspensión está basado en cuatro atributos derivados de las imágenes: la población de partículas, la forma de la partícula, la escala de grises en relación a la turbiedad, y la cantidad de luz pasante a través de la imagen.

Algunas dificultades halladas con esta técnica tienen que ver con la nitidez de las imágenes y la incapacidad del software de diferenciar entre dos o más partículas superpuestas, ocultas por otras o agregadas entre sí en situación de altas CSS o presencia de material orgánico o coloidal. Además, esta tecnología puede ser afectada por los mismos inconvenientes que la laser y los turbidímetros sumado a que se requiere la densidad de las partículas para convertir el volumen CSS en valores de masa.

e) Diferencia de presiones

La técnica de diferencia de presiones para el monitoreo de la concentración de sedimentos en suspensión se basa en las mediciones de dos sensores de presión precisión (transductores) colocados a diferentes elevaciones, fijas en la columna de agua. La diferencia de presión leída es convertida en un valor de densidad del fluido, del cual se deduce la concentración luego de corregir por la temperatura del agua (ya que la densidad del agua se incrementa con la concentración de sedimentos en suspensión, la densidad puede ser usada para obtener la concentración de sedimentos). En la Figura 19 se puede observar un estimador de sedimentos por diferencia de presiones.



Figura 19.- Estimador de sedimentos en suspensión por diferencia de presiones (Gray, 2012)

Esta técnica ha sido aplicada tanto en laboratorio como en campo (Lewis y Rasmussen, 1999). En laboratorio ha dado buenos resultados para determinar la

concentración de microesferas de vidrio en suspensión. Sin embargo, aplicaciones de en campo pueden resultar complicadas por la turbulencia (debido a la fluctuación de presión), por concentraciones altas de sólidos disueltos, para grandes cambios de temperatura, y ante la variación en la densidad del material en suspensión (Gray y Gartner, 2010).

f) Acústica Doppler

La tecnología acústica Doppler, en especial el ADCP, es una de las más recurrentes en el intento de medir CSS in situ. Su principal atractivo se halla en la capacidad de obtener datos en todo el haz acústico, esto es prácticamente toda la profundidad del flujo o el ancho de la sección, dividido en celdas de determinado tamaño, sin una intrusión importante del instrumento en la columna del agua. Esto, sumado a la posibilidad de realizar mediciones en movimiento, permite obtener mediciones en una sección transversal con una gran resolución espacial cuando se utiliza una configuración vertical hacia abajo de los haces acústicos.

Estos instrumentos a partir de los sensores acústicos de retrodispersión (backscatter por su denominación en inglés) envían una señal acústica al medio y al rebotar con las partículas en él presentes (Figura 20) se modifica la intensidad de la señal de retorno. A partir del cambio de fase entre la señal emitida y la de retorno se calcula la velocidad del fluido, asumiendo que es igual al de las partículas. Dado que la señal de retorno depende de las características del sedimento es posible aplicar esta técnica, diseñada inicialmente para medición de caudales, para la medición de concentración de sedimentos en suspensión y la cuantificación del transporte de fondo.

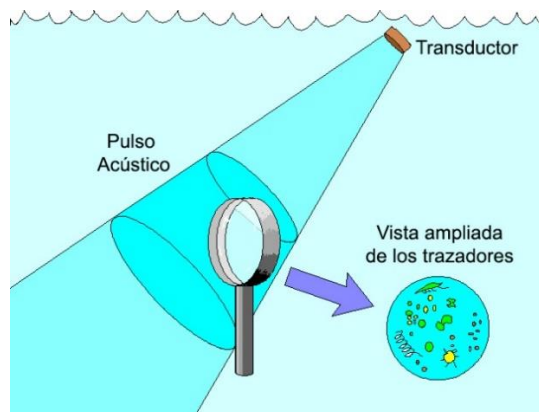


Figura 20.- Sensor acústico de retrodispersión

Para la aplicación de esta técnica es necesario la calibración empírica para convertir la señal de retorno en concentración de sedimentos en suspensión (CSS) y un complejo post procesamiento, para la corrección de las propiedades físicas del agua (temperatura, salinidad y presión) y la compensación según las características del instrumento (frecuencia, potencia, diseño de los transductores, etc.). La ventaja con este tipo de instrumentos es que una vez calibrado, se puede obtener un perfil de la concentración de sedimentos, luego de procesar la señal de retorno del instrumento (backscatter por su nombre en inglés), como se observa en la Figura 21.

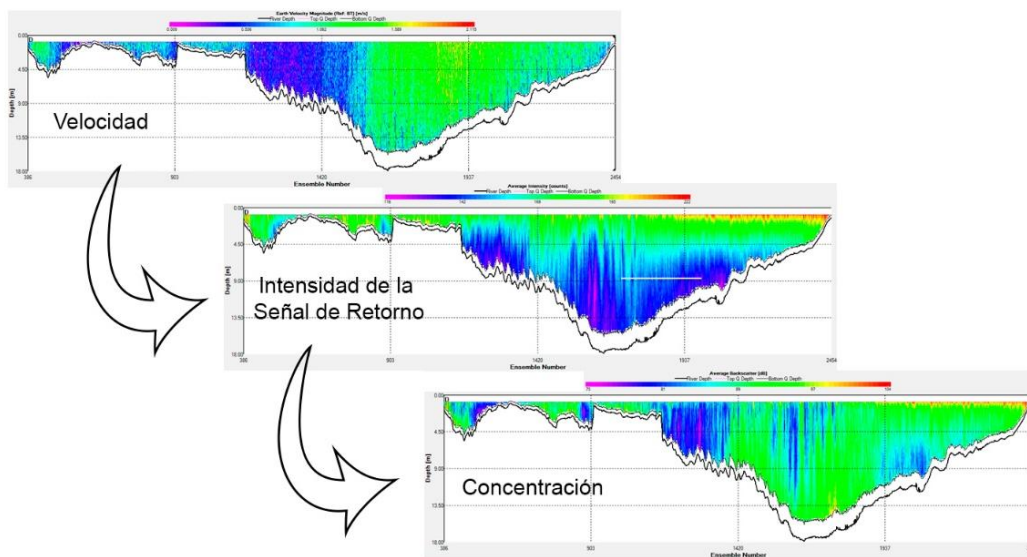


Figura 21.- Perfil de concentración de sedimentos en suspensión estimado con un perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP)

Una de las limitaciones asociadas al uso de la tecnología Doppler para la estimación de CSS se da cuando se utiliza una única frecuencia acústica, pues de este modo es imposible determinar si los cambios registrados en la señal de retorno se deben realmente a cambios en CSS o en la distribución de tamaño de sedimento. La hipótesis en estos casos es que la distribución del sedimento en suspensión es uniforme y constante. Este inconveniente es superado cuando se utilizan instrumentos o disposiciones (con varios equipos) multi-frecuencia.

Mayores especificaciones sobre el uso de esta tecnología para la cuantificación de las concentraciones de material suspendido y su transporte se presentan en mayor detalle en el capítulo 3 de esta tesis.

2.6.2 Nuevas tecnologías para el sedimento transportado por fondo

A continuación se describen las tecnologías útiles para la determinación del transporte de material de fondo que se presentan como posibles alternativas a los métodos tradicionales, los cuales poseen eficiencias de medición muy bajas (Rennie et al. 2002, entre otros) y algunas dificultades en cuanto su implementación en campo, que implican la ejecución de maniobras riesgosas.

a) Hidroacústica activa

La hidroacústica activa se refiere al uso de un sistema de emisión y recepción acústica para inferir el movimiento del fondo. El caso particular es el de un ADCP y la utilización de una función de detección y seguimiento de fondo, denominado Bottom Track (BT) por su denominación en inglés, conformada por un pulso de sonido extra e independiente al utilizado para medir la velocidad del agua. Cuando es colocado en una plataforma móvil se puede obtener la velocidad de desplazamiento de fondo a partir de la diferencia entre la velocidad del bote registrada con un GPS de precisión y la velocidad del bote registrada con la señal del seguimiento de fondo (Bottom Track) del ADCP. También puede fijarse el ADCP a una estructura inmóvil para realizar mediciones sin la necesidad de contar con un GPS. El trabajo con este tipo de calibraciones consiste en confeccionar gráficos donde se contrastan la velocidad de fondo medida con el ADCP con valores de transporte de fondo obtenidos por distintos métodos tradicionales, bajo la forma de regresiones lineales (Jamieson et al. 2011, Gaeuman y Jacobson 2007, Kostaschuk et al. 2005, Villard et al. 2005, Rennie y Villard 2004, Rennie y Millar 2004, Rennie et al. 2002). También suelen contrastarse con tensiones de corte de flujo calculadas con modelos semiempíricos clásicos (como el de Van Rijn, 1894 por ejemplo) alimentados con datos hidráulicos recolectados en la misma experiencia de campo de la cual se obtuvieron los datos de velocidad de fondo.

Los errores en la determinación de la velocidad de fondo representan una limitación para esta tecnología y están dados principalmente por el mismo instrumento. Los valores de velocidad obtenidos poseen ruido y deben ser promediados, siendo los resultados para mediciones móviles señales ruidosas.

b) Hidroacústica pasiva

La hidroacústica pasiva está relacionada con la recepción de la acústica del movimiento del material de fondo a través de distintos dispositivos o sensores específicos. Algunos ejemplos son los hidrófonos (miden fluctuaciones de la presión acústica en el agua), micrófonos (miden las fluctuaciones de la presión acústica en el aire), acelerómetros (miden la aceleración de una masa), transductores de velocidad (miden la velocidad de una masa), y platos de presión (miden la presión de impacto).

En estos casos, el trabajo a desarrollar es similar a la hidroacústica activa, recolectando datos acústicos y relacionándolos de algún modo con valores de transporte de fondo medidos tradicionalmente para obtener una calibración. Otras veces, sólo pueden obtenerse datos cualitativos.

Una descripción más detallada de las técnicas que utilizan estos dispositivos acústicos puede hallarse en Barton et al. (2010). Sin embargo tanto para la hidroacústica pasiva como activa es necesario realizar calibraciones para aplicaciones in situ, y a su vez, aun mayores esfuerzos para obtener una estimación confiable y verificada del transporte de sedimentos de fondo (Latosinski, 2014).

Capítulo III:
METODOLOGÍA Y TÉCNICAS
EXPERIMENTALES UTILIZADAS PARA
CUANTIFICAR EL TRANSPORTE DE
SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN

*Caracterización del Transporte de Sedimentos en un tramo del Río Tercero (Ctalamochita)
utilizando Tecnología Acústica Doppler*

HEREDIA LIGORRIA, ANA INÉS

3.1 Introducción

En este capítulo se desarrolla la metodología experimental utilizada para cuantificar el transporte de sedimentos en suspensión en el Río Tercero (Ctalamochita) con un instrumento acústico. Previamente se presentan los principios básicos de la formulación acústica que relaciona la concentración de sedimentos en suspensión con la señal de retorno de un perfilador acústico.

La cuantificación de los sedimentos en suspensión se realizó en dos etapas: a) definición y calibración de la herramienta en laboratorio y b) la validación en campo. Para la primera etapa se implementó una de las nuevas tecnologías de estimación de sedimentos, que es el uso de instrumentos hidroacústicos, inicialmente desarrollados para medir velocidad de flujo. Se utilizaron un velocímetro acústico Doppler (conocido como ADV por sus siglas en inglés), y un perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP por su denominación en inglés) para determinar la concentración de sedimentos en suspensión a partir de las mediciones con estos instrumentos.

Luego se presentan los resultados de la aplicación de esta metodología en el sitio de estudio y se validan con los datos de concentración determinados por el área *Preservación del Recurso* de la *Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba*. Finalmente se discuten los resultados y las limitaciones de esta técnica.

3.2 Formulación acústica

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 dado, asumiendo un tipo constante de sedimento y distribución de tamaño de las partículas, 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.

El modelo acústico de dispersión producida por las partículas en suspensión es presentado por diferentes autores (Thorne y Hanes 2002, Gartner 2004, Wall et al. 2006,

Wright et al. 2010, Guerrero et al. 2012, Hanes 2012, entre otros). A continuación, se presentan las ecuaciones básicas de dicho modelo, para sustentar la metodología propuesta. El punto de partida del modelo es la ecuación que describe la raíz cuadrada media de la presión de la señal de retorno producida por las partículas en suspensión como una función del rango (Thorne y Hanes, 2002). Luego de un análisis algebraico y realizando sustituciones, se obtiene la ecuación del sonar (típicamente referida de esa manera) que relaciona la señal de retorno con la concentración de sedimentos en suspensión, expresada comúnmente en la escala logarítmica del Decibel (ecuación 26).

$$RL = SL - 2TL + 10 \text{Log}_{10} \left(f_s^2 \frac{\pi c}{\alpha_s} \frac{M}{\rho_s} \right) + k_T \quad \text{Ec. [26]}$$

Donde:

RL: nivel de reverberancia (i.e. el nivel de sonido recibido por el transductor en un ambiente no isotrópico). También corresponde al registro del ADCP en unidades de counts, las cuales son proporcionales a los decibeles (dB).

SL: nivel de fuente

k_T: constante de sistema específica del instrumento

TL: pérdidas de transmisión

α_s: radio de la partícula

π: longitud del pulso acústico

M: concentración másica

ρ_s: densidad de la partícula

f_s: función de forma que describe las propiedades dispersivas de las partículas

El término asociado a la presencia del sedimento involucra el radio de la partícula y la función de forma. Thorne y Hanes (2002) empíricamente estiman la relación entre *f_s* y el producto entre el número de onda y el radio de la partícula $x=k \alpha_s$, usando mediciones del retorno acústico de suspensiones de sedimento del tamaño de las arenas, donde $k=2\pi/\lambda$ es el número de onda y λ la longitud de onda. Para una frecuencia acústica de 3MHz (frecuencia acústica del ADCP SonTek S5), partículas con diámetros

mayores a 0,45 mm (Figura 22) presentan el máximo valor de f_s , mientras que para valores menores f_s decrece progresivamente.

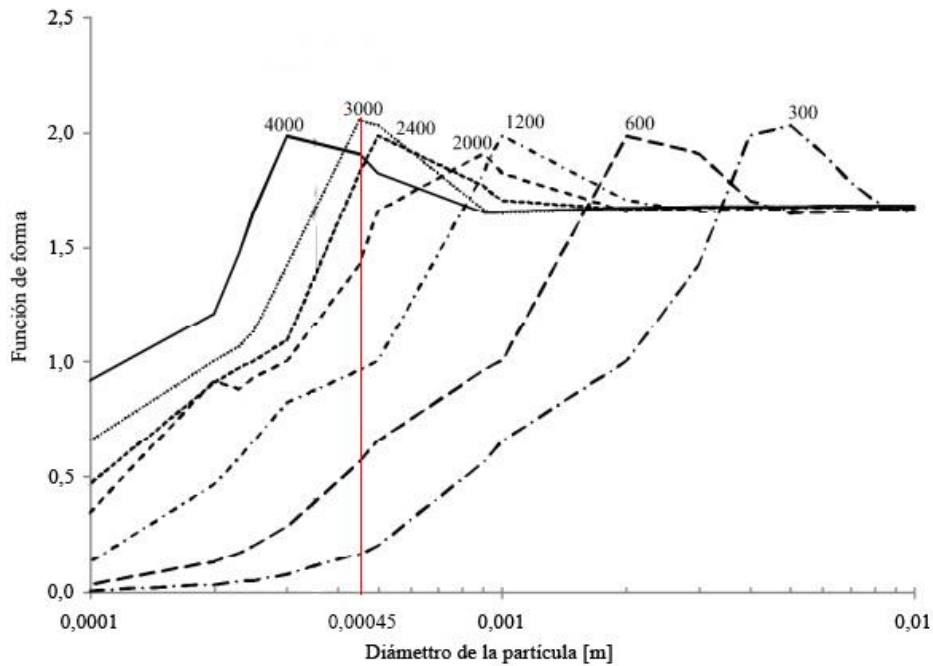


Figura 22: función de forma de retrodispersión para diferentes frecuencias acústicas y tamaño de partículas promedio (modificado de Latosinski et al., 2017)

Dado un instrumento específico, y asumiendo un radio constante de partícula y velocidad del sonido, los parámetros SL , k_t , α_s , f_s , ρ_s , y τ_c pueden ser incluidos en una nueva constante K_T , simplificando así la ecuación 26 en la ecuación 27 (Thevenot et al. 1992):

$$\text{Log}_{10}(M) = 0,1 (RL + 2TL) + K_T \quad \text{Ec. [27]}$$

El término $RL + 2TL$ es la suma del registro de la señal de retorno del ADCP, la dispersión esférica del haz de sonido y la atenuación del sonido a través de la columna de agua. La pendiente y el valor de intercepción de la relación lineal en la ecuación 27 pueden ser estimadas por ajuste lineal de los valores en escala semi-logarítmica de concentraciones muestreadas y los de señal acústica corregida ($RL + 2TL$). El valor de pendiente obtenido puede compararse al de 0,1, no obstante, K_T es dependiente del sitio y de las propiedades del instrumento, por lo que debe ser calibrada (Latosinski et al. 2014).

3.3 Instrumental Utilizado

3.3.1 Perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP)

Tanto para el trabajo de campo como los ensayos realizados en laboratorio para la calibración, se utilizó un perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP) “RiverSurveyor S5”, fabricado por YSI/SonTek diseñado especialmente para aguas poco profundas. El ADCP provee información batimétrica (profundidad) de la sección y de las velocidades del flujo en tres direcciones ortogonales, lo que permite definir el caudal con un error general del orden de 2 o 3%. Este instrumento mide la velocidad del agua utilizando el principio físico llamado cambio de frecuencia Doppler. Un transductor genera un pulso de sonido a una frecuencia conocida que se propaga a través del agua. Este se refleja en todas las direcciones por las partículas que se encuentran en suspensión (sedimento, materia orgánica, etc.). Una porción de la energía reflejada vuelve hacia el transductor donde es recibida por éste y el ADCP mide el cambio de frecuencia de la señal de retorno (Figura 23). Este cambio de frecuencia, medido por cada transductor, se traduce en la velocidad del agua en la dirección radial del mismo, a través de la ecuación 28 (Simpson, 2001).

$$f_{Doppler} = 2 f_{fuente} \left(\frac{V}{c} \right) \cos(\theta) \quad \text{Ec. [28]}$$

Donde $f_{Doppler}$ es la frecuencia registrada en el receptor, f_{fuente} es la frecuencia transmitida por el emisor, V es la velocidad relativa entre el emisor y el receptor, c la velocidad del sonido y θ el ángulo entre el vector de velocidad relativa y la línea entre en ADCP y los transductores.

El corrimiento de frecuencias Doppler $f_{Doppler}$ en los flujos usuales es tres órdenes de magnitud menor que la frecuencia de sonido utilizado (f_{fuente}). Esto hace que para poder capturar el corrimiento sea necesario hacer registros largos, perdiendo resolución temporal. En los sistemas Doppler coherente este problema se evita mediante la emisión de una secuencia de pulsos acústicos cortos cuya fase de emisión se mantiene. Entonces la determinación del corrimiento de frecuencia es implementada evaluando el cambio de fase del retorno de estos pulsos, como se presenta en la ecuación 29. Con $d\phi$

cambio de fase entre dos pulsos acústicos reflejados, d_t : incremento diferencial para el intervalo entre tiempo de pulsos.

$$V = \frac{\lambda}{4\pi} \frac{d\phi}{dt} \quad \text{Ec. [29]}$$

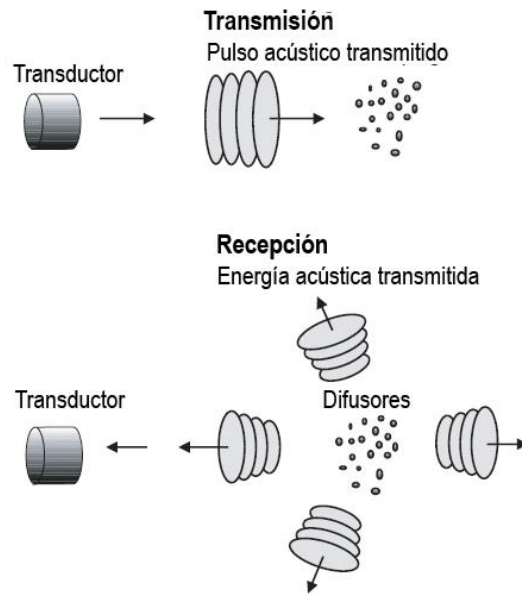


Figura 23.- Colisión del pulso acústico con las partículas (Simpson, 2001)

El ADCP SonTek RiverSurveyor S5 tiene un conjunto de cuatro sensores inclinados 25° con respecto a la vertical (Figura 24) en una configuración denominada “Janus” (mirando en direcciones opuestas) que emiten pulsos acústicos mediante los cuales puede medirse la velocidad en tres direcciones (el sistema de cuatro rayos provee información redundante en una dirección, generalmente la vertical, que permite determinar la calidad de la medición). A continuación, se presentan las ecuaciones para obtener las velocidades en las tres direcciones x, y y z, para una configuración típica de cuatro haces, donde el número 3 se encuentra dirigido hacia adelante (Muller y Wagner, 2007).

$$V_y = \frac{B_4 - B_3}{2 \operatorname{sen} \alpha} \quad \text{Ec. [30]}$$

$$V_x = \frac{B_1 - B_2}{2 \operatorname{sen} \alpha} \quad \text{Ec. [31]}$$

$$V_z = \frac{B_1 + B_2 + B_3 + B_4}{4 \operatorname{cos} \alpha} \quad \text{Ec. [32]}$$

Donde V_y es la velocidad en la dirección del flujo, V_x es la velocidad transversal, V_z es la velocidad vertical, B_1 , B_2 , B_3 y B_4 es la velocidad radial medida por el rayo 1, 2, 3 y 4, respectivamente y θ es el ángulo de inclinación del rayo respecto a la vertical.

El ADCP RiverSurveyor S5 opera con una señal acústica de 3.0 MHz. Además, este equipo posee un rayo acústico vertical que envía señales a una frecuencia menor (1.0 MHz) lo que le permite tener un mayor alcance en profundidad. Su función es medir las profundidades y obtener la batimetría y topografía del fondo de la sección. En la Tabla 3 se adjuntan las especificaciones técnicas del ADCP utilizado en esta tesis. Este instrumento puede ser comandado desde una computadora personal o bien con un teléfono celular, ambos dispositivos capaces de registrar los datos medidos. Para realizar la medición y visualizar los resultados obtenidos con el ADCP se utiliza el programa computacional llamado RiverSurveyor Live. Este programa permite configurar el instrumento y registra toda la información enviada por el equipo, generando resultados en forma de tablas, gráficos e imágenes, permitiendo además exportar los resultados a otros programas para un análisis más detallado, tales como Microsoft Excel o Matlab.

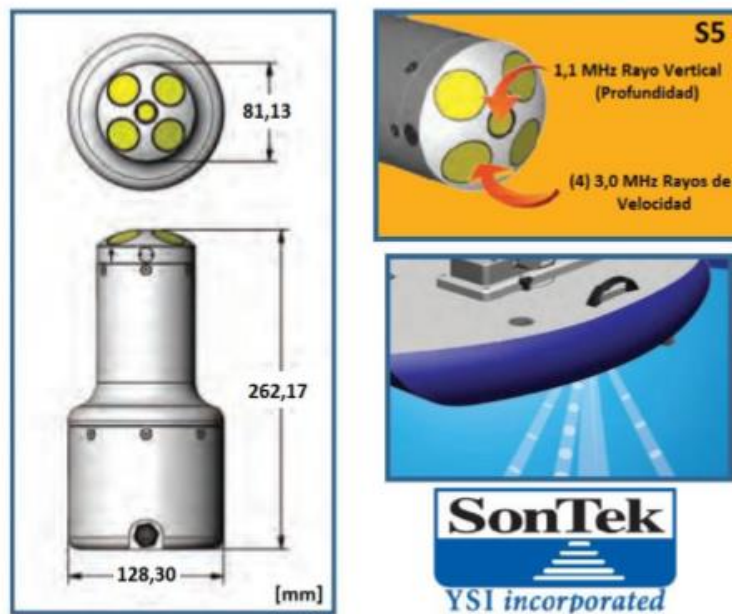


Figura 24.- Descripción del instrumento utilizado: ADCP SonTek S5 (SonTek, 2013)

Tabla 3.- Características ADCP RiverSurveyor S5 (SonTek, 2013)

ESPECIFICACIONES "S5"		
Medición de velocidad	Rango de mediciones	0,06 a 5m
	Velocidades	+/- 20m/s
	Precisión	Hasta +/- 0,25% de la velocidad media
	Resolución	0,001m/s
	Nº de celdas	Hasta 128
	Tamaño de celda	0,02 a 0,5m
Configuración del transductor	Cinco (5) transductores	4 rayos de 3,0MHz inclinados a 25° Rayo vertical de 1,0MHz
Profundidad	Rango de mediciones	0,20 a 15m
	Precisión	1%
	Resolución	0,001m
Medición de flujos	Rango con Bottom-track (seguimiento de fondo)	0,30 a 5m
	Rango con RTK GPS	0,30 a 15m
	Cálculos	Internos

3.3.2 Velocímetro acústico Doppler (ADV)

El velocímetro acústico Doppler, ADV por sus siglas en inglés, mide localmente velocidades tridimensionales del flujo, utilizando el principio de corrimiento de fase Doppler. El emisor de sonido genera una señal acústica en una frecuencia conocida que se propaga a través del agua a lo largo de su eje, y es reflejada por partículas presentes en el agua (sedimento, organismos pequeños, burbujas), que se asume se desplazan a la velocidad del agua y deben tener inercia muy pequeña. Una cierta porción de la energía reflejada vuelve a lo largo de los ejes de los receptores, la señal es registrada y procesada por los distintos componentes del ADV para determinar el cambio de frecuencia debido al efecto Doppler (ecuación 39) (Herrero et al. 2007).

El ADV mide localmente las velocidades del flujo en un pequeño volumen de medición localizado entre 5 y 10 cm del instrumento, dependiendo del modelo de ADV. El rango de velocidad que el instrumento es capaz de monitorear es programable por el usuario, y los valores máximos de ese rango pueden alcanzar el valor de ± 400 cm/s. Las muestras de velocidad de flujo pueden ser adquiridos con frecuencias de registro de hasta 200 Hz en los instrumentos más modernos. La máxima velocidad y frecuencia de registro posibles varían de acuerdo con el modelo de ADV utilizado. El modelo de ADV utilizado (Figura 25) está compuesto de tres elementos básicos: la sonda, donde se encuentran los emisores y receptores de la señal acústica el módulo de acondicionamiento de la señal y el módulo de procesamiento de la señal.

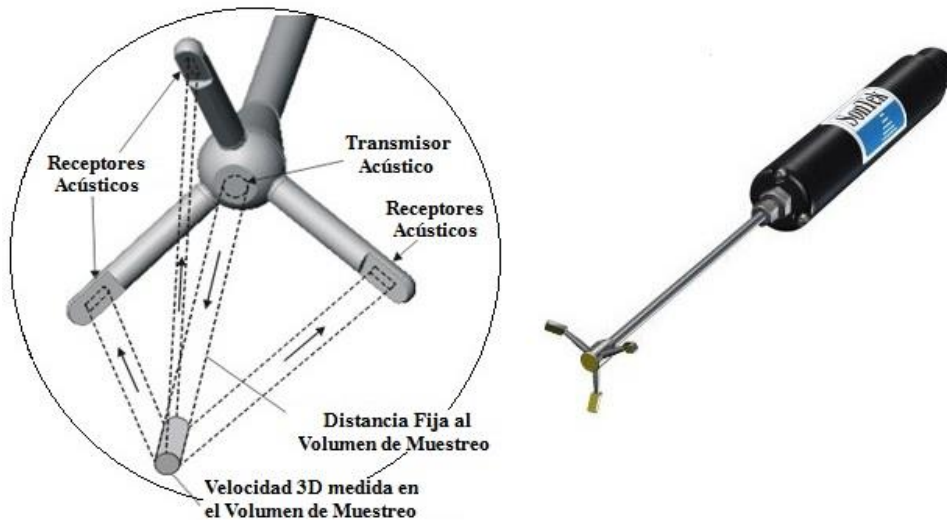


Figura 25.- Micro ADV YSI SonTek 16MHz utilizado en los experimentos de esta tesis (adaptado de Rusello, 2009)

En este trabajo se utilizó el Micro ADV SonTek de 16MHz, cuyas características se observan en la Tabla 4. Durante el proceso de medición de velocidades de flujo con ADV, dos parámetros son generalmente reportados por el instrumento, los cuales sirven para cuantificar la calidad de la señal de velocidad que se está registrando: el coeficiente de correlación y el cociente entre amplitudes de señal y ruido percibido (SNR por sus siglas en inglés). El SNR es el cociente de la energía de la señal y el nivel de ruido acústico, estos valores se expresan en decibels (dB). Cocientes de SNR bajos son causados generalmente por una concentración baja de partículas en suspensión en el flujo, (Herrero et al. 2007) mientras que valores altos de SNR están asociados a concentraciones altas de partículas en suspensión. La relación señal ruido (SNR) junto con la amplitud de la señal (también de decibels) fueron las cantidades utilizadas en este estudio.

Tabla 4.- Características del Micro ADV SonTek 16Mhz (<http://www.sontek.com>)

ESPECIFICACIONES MICRO ADV SONTEK	
Tasa de muestreo	0,1 a 50 Hz
Volumen de muestreo	0,09 cm ³
Distancia al volumen de muestreo	5 cm
Resolución	0,01 cm/s
Rango de velocidad programable	3, 10, 30, 250 cm/s
Precisión	1% de la velocidad medida, 0,25 cm/s
Máxima profundidad	60 m
Sensor de temperatura	0,1°

Sensor de inclinación (heading)	±2°
Sensor de inclinación (pitch, roll)	±1°
Sensor de presión - Precisión	0,10%
Potencia de entrada	12-24 VDC
Consumo de energía típico	2,5 a 4,0 en funcionamiento

Tanto el ADCP como el ADV son instrumentos acústicos utilizados comúnmente para medir la velocidad del flujo, aplicando el efecto Doppler. Entre sus diferencias, se destaca principalmente que el ADCP mide un perfil mientras que el ADV mide en un determinado volumen. El ADCP está formado por un conjunto de perfiladores acústicos (transductores) ubicados en forma divergente, funcionando cada uno como emisor y receptor de pulsos de ultrasonido, los cuales viajan a lo largo de la columna de agua. El ADV, en cambio, está formado por un único emisor acústico (que envía pulsos acústicos) y un conjunto de receptores (tres para el Micro ADV SonTek) que registran (“escuchan”) las señales acústicas reflejadas, integrando la información proveniente de un volumen de medición cuyo tamaño es de 0,09 cm³ y está ubicado a 5 cm del emisor. Otra diferencia está dada por la frecuencia acústica, el ADCP SonTek S5 tiene una frecuencia de 3 MHz, mientras que el ADV 16 MHz, lo que permitiría a este último reconocer partículas de menor tamaño (Thorne y Hanes (2002)).

En esta tesis se trabajó con el ADCP SonTek S5 3 MHz y el Micro ADV SonTek 16 MHz para comparar el comportamiento de estos instrumentos, de diferente frecuencia acústica, frente a la variación de la concentración de sedimentos en suspensión, con sedimentos de diferentes tamaños. Además se determinaron expresiones para cada instrumento que relacionan la señal acústica con la concentración de sedimentos en suspensión.

3.4 Metodología experimental desarrollada

3.4.1 Calibración en laboratorio

La primera actividad realizada para implementar el uso de los instrumentos acústicos descritos en el apartado 3.3.1 y 3.3.2 para estimar el transporte de sedimentos en suspensión fue la calibración mediante ensayos en laboratorio, de los

cuales los primeros se realizaron en el marco de una Práctica Supervisada de la carrera de Ingeniería Civil (Sandoval, 2016). Los ensayos consistieron en registrar simultáneamente los valores de rebote acústico con ambos instrumentos bajo distintas concentraciones de sedimento conocidas. Para el caso del ADCP la variable de interés utilizada para cuantificar el rebote acústico fue la relación señal-ruido (*SNR*), ya que tanto el valor de *RL* (ecuación 27), como las constantes de conversión para cada transductor no están disponibles a los usuarios para los ADCP de la marca SonTek. Para el ADV además del *SNR* se utilizó la amplitud de la señal acústica (*AMP*), medida también en decibels.

Para los ensayos se colocaron el ADV y el ADCP en un tanque de asbesto cemento de 0,9 m de diámetro y 1 m de profundidad. El ADCP se colocó en el centro del tanque, y el ADV a 22 cm por encima del ADCP (visto en planta) y a 35 cm de profundidad, como se puede observar en las Figura 26 y Figura 27. Los ensayos se realizaron en un tanque para asegurar la profundidad mínima de medición del ADCP (mayor a 30 cm) y el ancho suficiente para evitar que los haces (divergentes) del ADCP peguen a las paredes. Para cada ensayo se llenó inicialmente el tanque con agua proveniente de la red (la cual se asume tiene baja concentración de sedimentos) el día anterior al experimento, con el objetivo de minimizar la cantidad de micro burbujas de aire que pudieran formarse durante el llenado y modificar así los niveles de rebote acústico. El ensayo en sí mismo consistió en agregar al tanque una cantidad conocida de sedimento en suspensión, luego mezclar intensamente durante 60 segundos (para lograr una mezcla homogénea) e inmediatamente a continuación medir con el ADCP y el ADV en forma simultánea durante 60 segundos. Este procedimiento se siguió para cada incremento de sedimento, que fueron de 5, 10, 25 y 50 g, lo que permitió alcanzar concentraciones desde 0 hasta 900 mg/L.

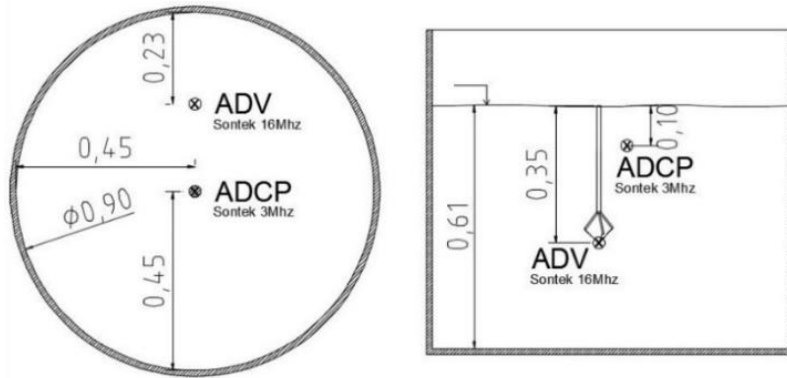


Figura 26.- Planta y Corte del Tanque de los Ensayos



Figura 27.- Instrumentos de Medición en el Tanque

El sedimento utilizado consistió en diferentes fracciones granulométricas de suelo loessico, perteneciente a la zona cercana al Laboratorio de Hidráulica de la Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional de Córdoba, y arcilla. Esta última para evaluar la respuesta acústica de los instrumentos ante un sedimento de diferente origen y similar tamaño. Para los ensayos 1, 2 y 3 se utilizó la fracción pasante del tamiz 200 del material loésico, para los ensayos 6 y 11 arcilla (pasante tamiz 200), y para los ensayos 7, 8 y 9 la fracción de suelo pasante del tamiz 100 y retenido en el tamiz 200 (Tabla 5). Previo a iniciar cada medición se efectuó la mezcla en el tanque durante un minuto para asegurar que la concentración sea homogénea.

Tabla 5.- Resumen de los ensayos realizados en laboratorio

Nombre Ensayo	Sedimento	Rango Concentración [CSS]
Ensayo 1	Suelo Fracción Pasante Tamiz 200	0-906mg/L
Ensayo 2	Suelo Fracción Pasante Tamiz 200	0-839mg/L
Ensayo 3	Suelo Fracción Pasante Tamiz 200	0-897mg/L
Ensayo 6	Arcilla	0-880mg/L
Ensayo 7	Suelo Fracción Pasante 100 Retenido Tamiz 200	0-325mg/L
Ensayo 8	Suelo Fracción Pasante 100 Retenido Tamiz 200	0-890mg/L
Ensayo 9	Suelo Fracción Pasante 100 Retenido Tamiz 200	0-917mg/L
Ensayo 11	Arcilla	0-853mg/L

Las mediciones con ADCP se efectuaron utilizando dos modos de medición de velocidad de flujo diferentes que tiene el ADCP: coherente (“SmartPulse®” activado) e incoherente (“SmartPulse®” desactivado). Para el modo incoherente el ADCP calcula las velocidades relativas entre el instrumento y el flujo a partir de la diferencia de fase entre dos muestras diferentes de un único pulso de retorno de larga duración en cada celda, mientras que para el modo coherente lo hace a partir de la diferencia de fase entre dos pulsos acústicos cortos sucesivos (Szupiany y Oberg, 2016). Esto implica un tamaño de celda diferente para cada modo de medición: para las profundidades adoptadas en los experimentos, los tamaños de celda fueron de 0,02m para el modo coherente y 0,20m para el incoherente. En lo que se refiere a la configuración del ADV, este mide velocidades de flujo sólo en modo coherente, es decir compara dos pulsos acústicos cortos sucesivos.

3.5 Resultados

3.5.1 Resultados con ADV

Los resultados con el ADV se obtuvieron a partir de la comparación de la amplitud de la señal acústica (A) y la relación ruido señal (SNR) del ADV con la concentración de sedimentos.

En la Figura 28 y la Figura 29 se muestran los valores registrados de rebote acústico con ADV. En el primer caso se grafica la evolución de relación señal ruido (SNR por sus siglas en inglés) reportada con el ADV con la concentración de sedimento en

suspensión para cada tipo de sedimento, mientras que en la Figura 29 se muestra la evolución de la amplitud de la señal respecto a la concentración.

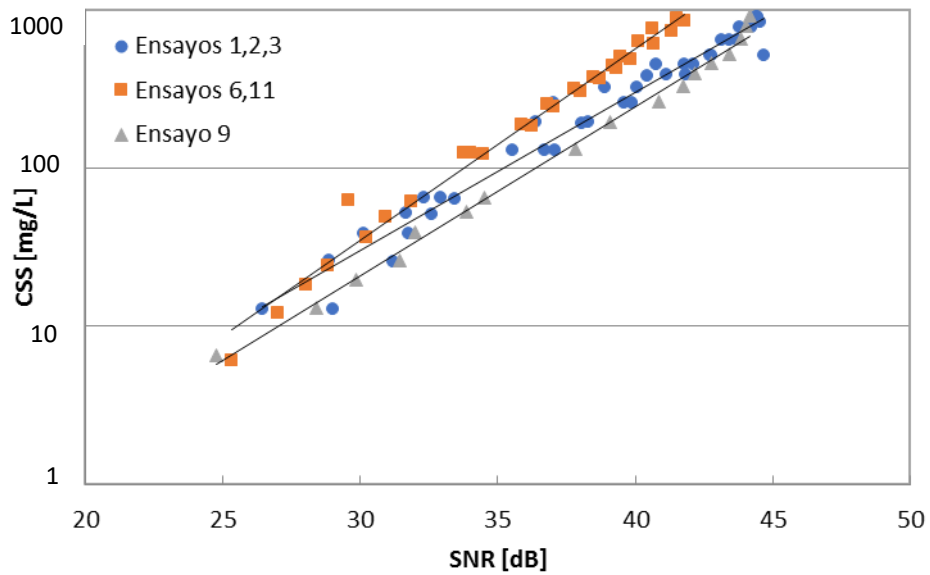


Figura 28.- Evolución de SNR (ADV) y la concentración de sedimentos en suspensión (CSS)

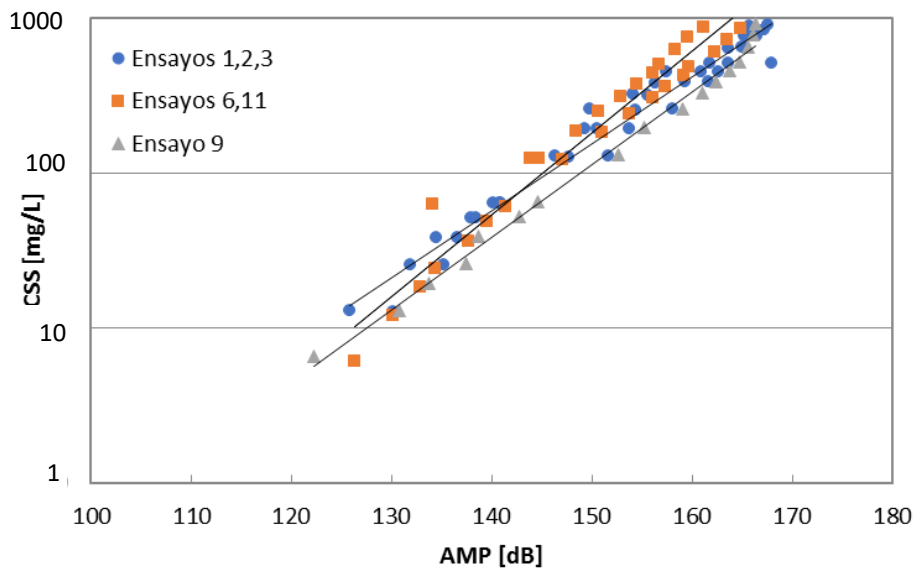


Figura 29.- Evolución de AMP (ADV) con la concentración de sedimentos en suspensión (CSS)

Tanto los valores de SNR como con la amplitud (AMP) la función que mejor ajusta con la concentración de sedimento en suspensión es una logarítmica, resultando en coeficientes de determinación mayores a 0,95 (Tabla 6). Las unidades de la

concentración de sedimentos en suspensión (CSS) es mg/L mientras que el SNR y la amplitud (AMP) están en decibeles.

Tabla 6.- Funciones ajustadas describiendo la evolución de AMP (ADV) con la concentración de sedimentos en suspensión (CSS)

Tipo de Sedimento	SNR [dB]	AMP [dB]
Suelo fracción pasante Tamiz 200 (Ensayos 1,2,3)	Log $CSS = 0,099 \times SNR - 1,519$ $R^2 = 0,969$	Log $CSS = 0,043 \times AMP - 4,272$ $R^2 = 0,968$
Arcilla (Ensayos 6, 11)	Log $CSS = 0,121 \times SNR - 2,091$ $R^2 = 0,982$	Log $CSS = 0,053 \times AMP - 5,654$ $R^2 = 0,957$
Suelo fracción pasante Tamiz 100 y retenido Tamiz 200 (Ensayo 9)	Log $CSS = 0,107 \times SNR - 1,899$ $R^2 = 0,994$	Log $CSS = 0,047 \times AMP - 4,980$ $R^2 = 0,993$

Comparando las funciones resultantes que relacionan la concentración de sedimentos en suspensión con el SNR se puede notar que para los tres casos la pendiente de la recta es similar, con diferencias porcentuales de la pendiente menor al 15%, con un valor promedio de 0,109 próximo al dado por la ecuación 27. Respecto a la concentración y la amplitud de la señal la relación también es de tipo logarítmica, con una pendiente promedio de 0,048 y diferencias menores al 15% para los distintos tipos de sedimento evaluados, lo que implica que la frecuencia acústica de este instrumento permite reconocer partículas de tamaño menor a 0,075 mm

3.5.2 Resultados con ADCP

En las mediciones con ADCP se adoptó un valor de SNR promedio entre las celdas 12 a la 21 para el modo coherente (tamaño de celda de 0,02 m) y el SNR promedio de a segunda celda para el modo incoherente (tamaño de celda de 0,10 m), zona identificada con un recuadro color rojo en la Figura 30. Se descartó la primera celda del modo incoherente (más cercano a la superficie) debido a la cercanía con la fuente del pulso acústico, que produce interferencias entre la señal emitida y la recibida que afectan al valor medido. Para el modo coherente, esto es equivalente a descartar las celdas 1 a la 11. Este promedio se efectuó así para poder comparar valores medidos a igual profundidad, considerando el diferente tamaño de celdas de cada modo. En la Figura 30 se pueden observar los resultados arrojados por el programa *RiverSurveyor Live* para cada concentración evaluada en el ensayo N° 9. En la columna de la izquierda se

presenta el modo coherente, con celdas de menor tamaño y en la columna derecha los resultados del modo incoherente, con un tamaño de celda de 0,10 m. Por medio de la escala cromática se puede ver que al aumentar la concentración, también lo hace el SNR, notándose (principalmente para el modo coherente) la atenuación que produce el sedimento en la señal acústica, dando como resultado SNR menores a mayor profundidad.

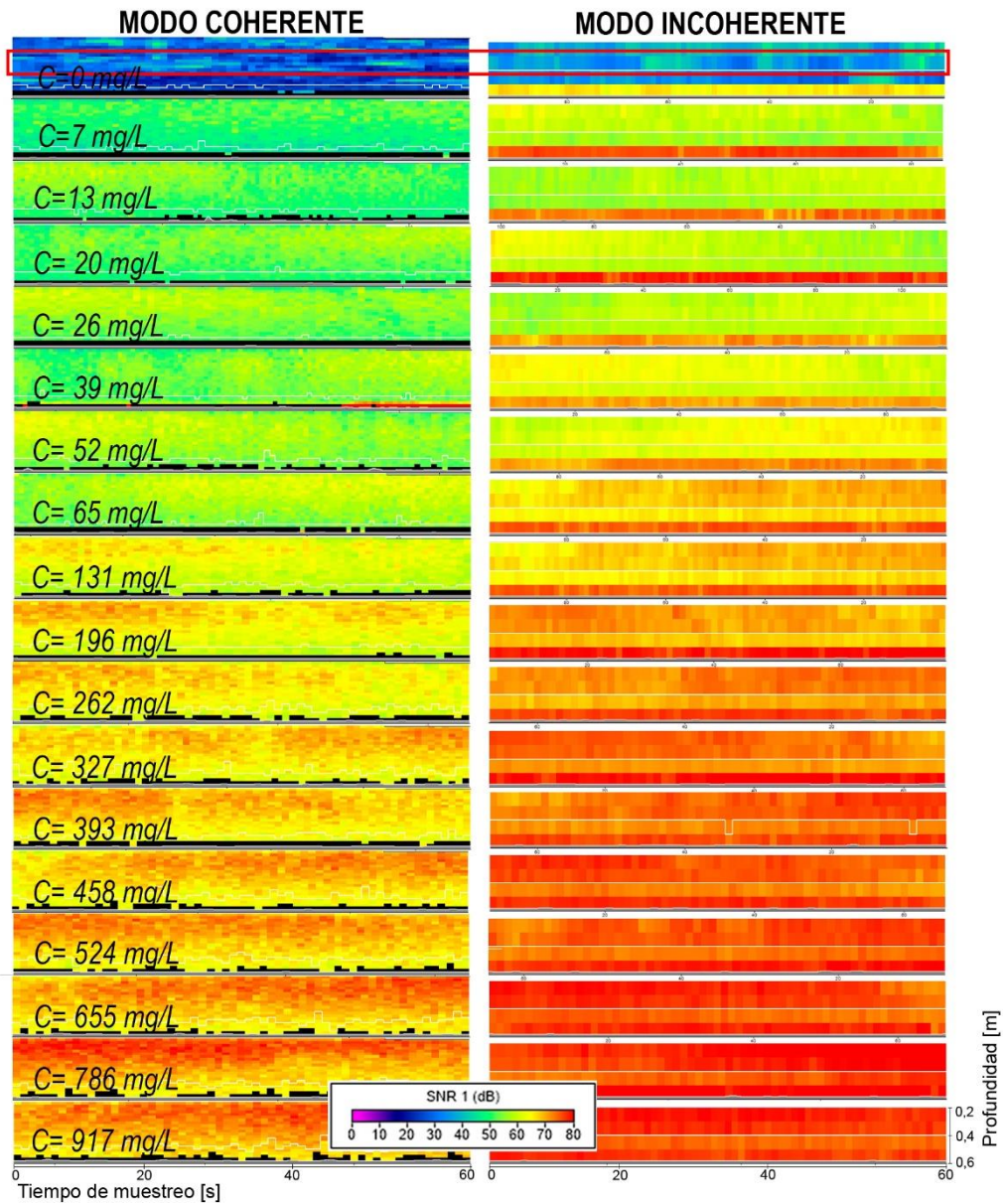


Figura 30.- Resultados del programa RiverSurveyor Live para cada concentración evaluada en el ensayo N° 9

A modo de ejemplo, en las Figura 31 y Figura 32 se muestra la evolución de la señal medida con ADCP para el modo coherente (promedio entre las celdas 12 a 21) y para el modo incoherente (segunda celda) durante el tiempo de medición del ensayo N° 9. Se puede observar claramente que para el modo incoherente los valores de SNR medidos son mayores que los del modo coherente para igual concentración.

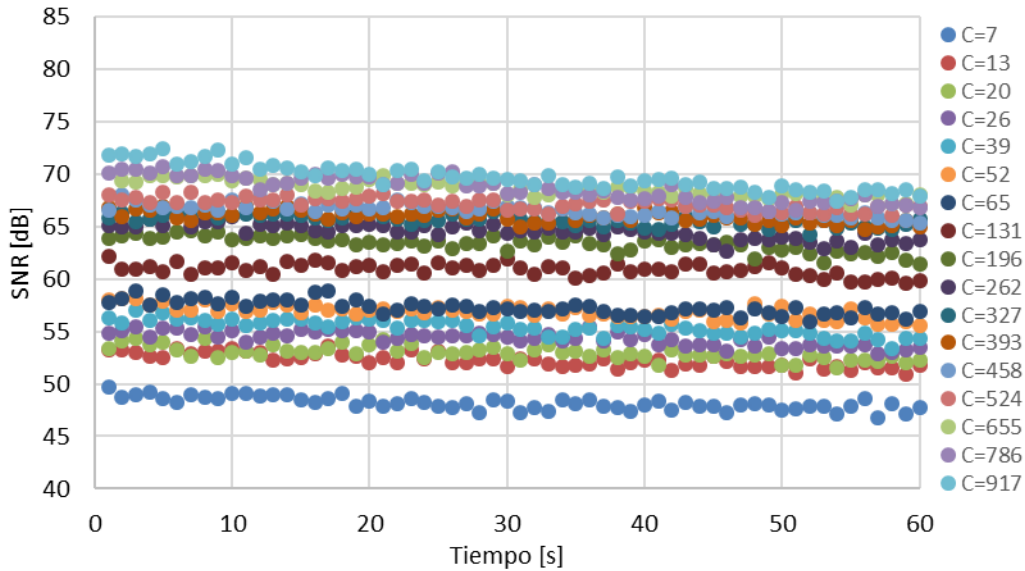


Figura 31.- Evolución de los valores de SNR en el tiempo para el modo coherente en el ensayo N°9

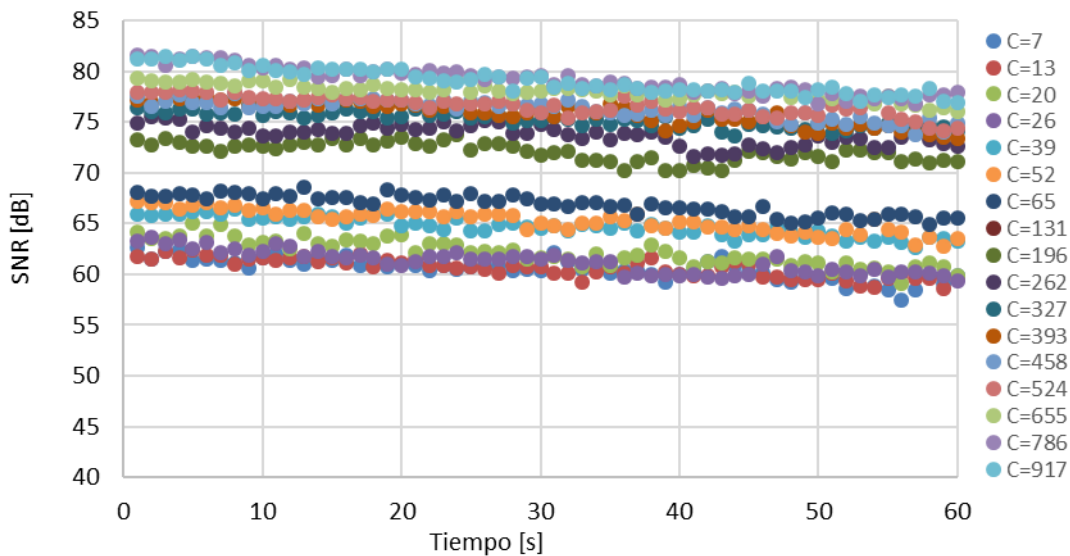


Figura 32.- Evolución de los valores de SNR en el tiempo para el modo incoherente en el ensayo N°9

En la Figura 33 y la Figura 34 se grafican la evolución del valor de SNR con la concentración de sedimentos en suspensión (CSS) para las mediciones efectuadas con

ADCP para las diferentes fracciones granulométricas, para el modo coherente y el incoherente respectivamente.

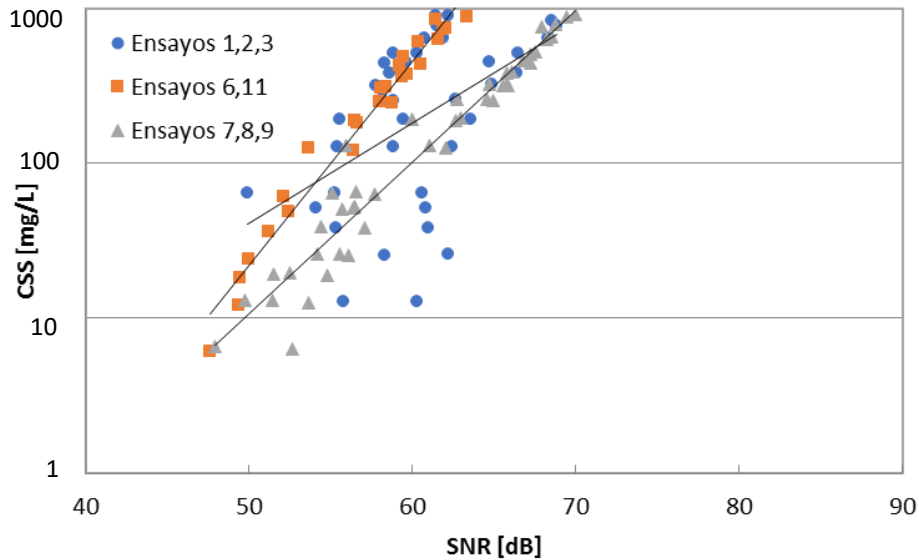


Figura 33.- Curvas que muestran la evolución de los valores de SNR (ADCP en modo coherente) con la concentración de sedimentos en suspensión

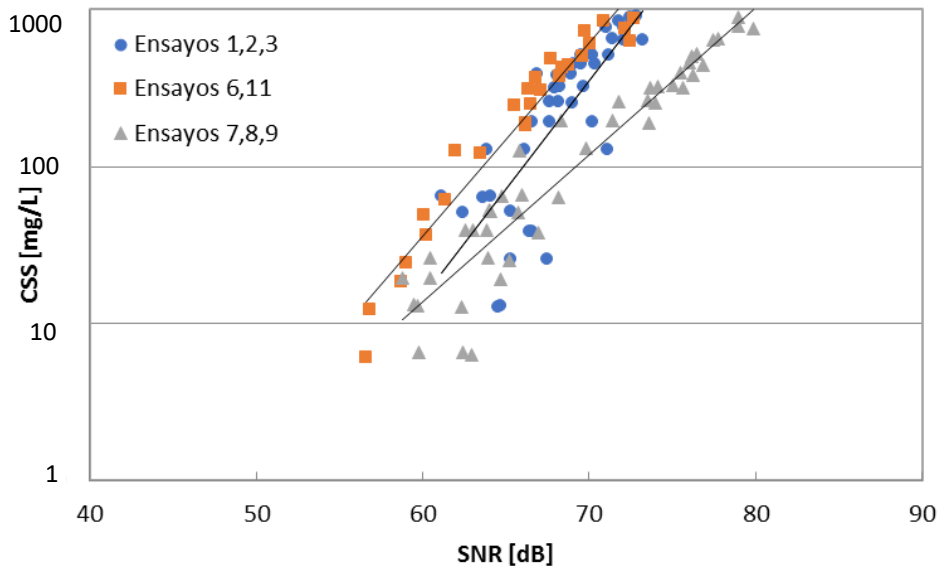


Figura 34.- Curvas que muestran la evolución de los valores de SNR (ADCP en modo incoherente) y la concentración de sedimentos en suspensión

Para los ensayos 1, 2 y 3 (suelo pasante tamiz 200) se observa, tanto para el modo coherente como el incoherente, una gran dispersión en los resultados, principalmente para bajas concentraciones donde para una misma concentración se dan valores de la

relación señal-ruido muy diferentes. Para los ensayos 6 y 11 (arcilla) se aprecia una menor dispersión, y la función aproximada se ajusta mejor a los datos.

Ajustando una función logarítmica a cada tipo de sedimento se obtuvieron las expresiones de la Tabla 7, con la concentración de sedimentos en suspensión (CSS) es mg/L y el SNR en decibeles.

Tabla 7.- Funciones ajuste de la evolución de SNR (ADCP) con la concentración de sedimentos en suspensión

Tipo de Sedimento	Modo Coherente	Modo Incoherente
Suelo fracción pasante Tamiz 200 (Ensayos 1,2,3)	Log $CSS = 0,065 \times SNR - 1,631$ $R^2 = 0,250$	Log $CSS = 0,138 \times SNR - 7,107$ $R^2 = 0,629$
Arcilla (Ensayos 6 y 11)	Log $CSS = 0,132 \times SNR - 5,246$ $R^2 = 0,968$	Log $CSS = 0,123 \times SNR - 5,817$ $R^2 = 0,943$
Suelo fracción pasante Tamiz 100 y retenido Tamiz 200 (Ensayos 7,8,9)	Log $CSS = 0,098 \times SNR - 3,858$ $R^2 = 0,941$	Log $CSS = 0,094 \times SNR - 4,472$ $R^2 = 0,901$

Para el suelo pasante del tamiz 200 el coeficiente de determinación entre la concentración de sedimentos en suspensión y el SNR es menor a 0,7 para el modo incoherente e inferior a 0,30 para el coherente. Esta baja correlación se adjudica a que el tamaño de sedimento utilizado para estos ensayos (< 0,075 mm) es mucho menor que el diámetro que mejor reconoce el ADCP de acuerdo a su frecuencia acústica (0,45 mm determinado en la Figura 22).

Para los ensayos 6 y 11, que se realizaron con arcilla, la correlación da valores mayores a 0,9, siendo éstos los máximos de todos los ensayos realizados con ADCP. Si bien el tamaño medio del sedimento utilizado en estos ensayos es menor al que reconoce el ADCP (como en el caso anterior) por sus características este material tiende a agruparse y formar flóculos que resultan en partículas de mayor tamaño, lo que permite al instrumento reconocerlas mejor.

Por último, con el material pasante tamiz 100 y retenido tamiz 200 se alcanzaron coeficientes de correlación superiores a 0,9, tanto para el modo coherente como el incoherente. Las funciones aproximadas ajustaron mejor que la de los ensayos 1, 2 y 3 porque el tamaño de sedimento (entre 0,15 y 0,075 mm) es más próximo al determinado en la Figura 22, dando valores de función de forma f_s mayores a 1.

Comparando los resultados del modo coherente con el incoherente se encontró que para igual concentración de sedimentos en suspensión el valor de SNR del modo

incoherente es mayor que el del modo coherente, entre un 7 y 21% más alto. Esto ocurrió en todos los ensayos, como se puede observar en los valores promedios de los ensayos incluidos en la Tabla 8.

Tabla 8.- Relación promedio entre SNR (ADCP) del modo incoherente y el coherente

Cociente SNR Incoherente y SNR Coherente	
Ensayo 1	1,19
Ensayo 2	1,07
Ensayo 3	1,19
Ensayo 6	1,15
Ensayo 7	1,21
Ensayo 8	1,14
Ensayo 9	1,17
Ensayo 11	1,18
Promedio	1,16

3.5.3 Comparación de resultados ADV y ADCP

Finalmente se comparó el rebote acústico registrado con el ADV con el del ADCP para cada tipo de sedimento evaluado. Esto se puede ver en la Figura 35 y en la Figura 36. Los diferentes rangos de la relación señal ruido (SNR por sus siglas en inglés) cambia según el instrumento debido a la frecuencia acústica de éstos, que es diferente: por un lado el ADV con 16MHz y por otro el ADCP con 3Mhz.

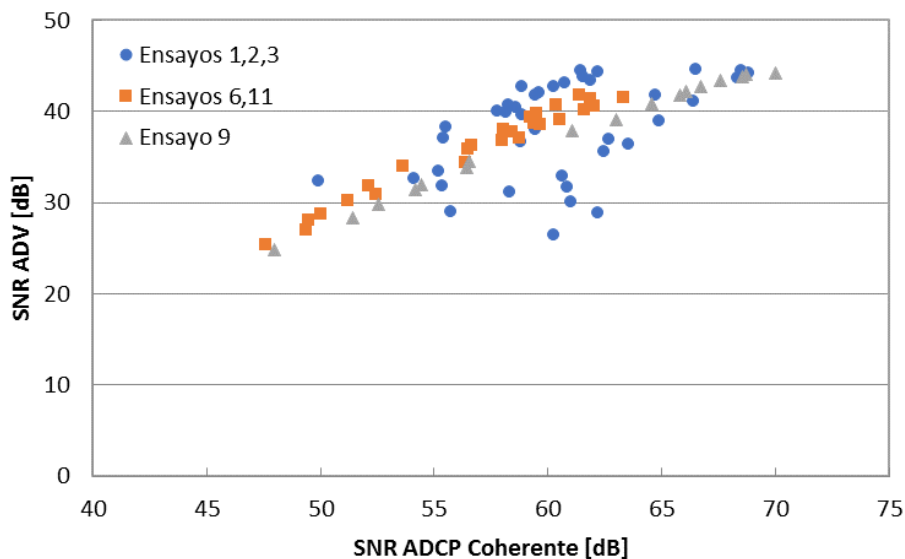


Figura 35.- Curvas que muestran el acuerdo entre los valores SNR del ADCP en modo coherente y los valores de SNR del ADV

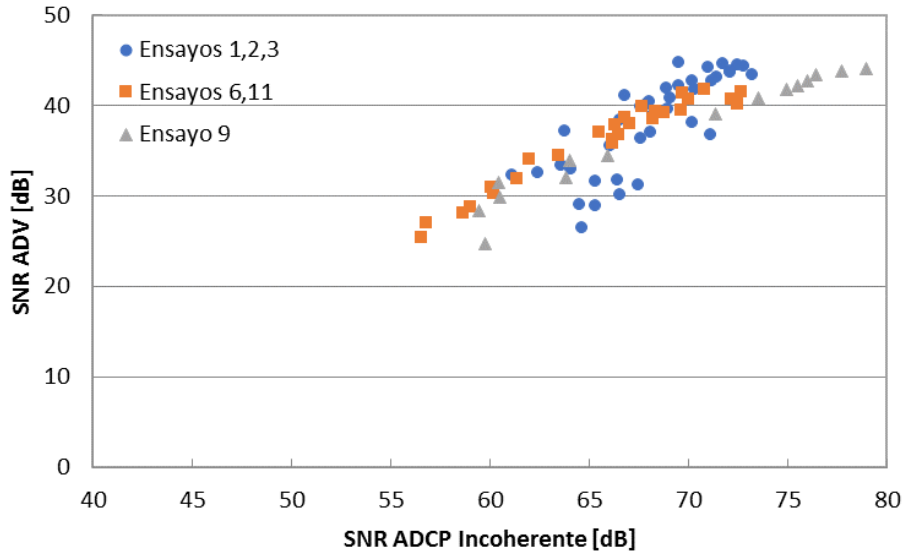


Figura 36.- Curvas que muestran el acuerdo entre los valores SNR del ADCP en modo incoherente y los valores de SNR del ADV

En la Tabla 9 se pueden ver las ecuaciones lineales ajustadas entre el SNR del ADV y el SNR del ADCP para modo coherente y modo incoherente. Para la fracción de suelo pasante el tamiz 200 la correlación es baja, principalmente para el modo coherente, con un coeficiente de determinación menor a 0,30. Para el resto de los ensayos el coeficiente de determinación resultó superior a 0,9. Considerando un intervalo de confianza del 95% para la fracción de suelo pasante tamiz 100 y retenido del 200 la pendiente de la recta resulta estadísticamente diferente de uno, mientras que la ordenada al origen es estadísticamente igual a cero.

Tabla 9.- Funciones ajuste del SNR del ADCP y SNR del ADV

Tipo de Sedimento	Modo Coherente	Modo Incoherente
Suelo fracción pasante Tamiz 200 (Ensayos 1,2,3)	$SNR_{ADV} = 0,619 \times SNR_{ADCP} + 0,727$ $R^2 = 0,234$	$SNR_{ADV} = 1,384 \times SNR_{ADCP} - 56,162$ $R^2 = 0,652$
Arcilla (Ensayo 6)	$SNR_{ADV} = 1,058 \times SNR_{ADCP} - 24,197$ $R^2 = 0,974$	$SNR_{ADV} = 0,655 \times SNR_{ADCP} - 6,513$ $R^2 = 0,934$
Suelo fracción pasante Tamiz 100 y retenido Tamiz 200 (Ensayo 9)	$SNR_{ADV} = 0,886 \times SNR_{ADCP} - 16,664$ $R^2 = 0,992$	$SNR_{ADV} = 0,854 \times SNR_{ADCP} - 22,316$ $R^2 = 0,958$

3.5.4 Validación en campo

La validación en campo de las herramientas desarrolladas consistió en aplicar las expresiones encontradas en la etapa de calibración (Tabla 7) con los datos de SNR registrados durante las mediciones de caudal líquido realizadas en el Río Tercero

(Ctalamochita) con el ADCP para estimar la concentración de sedimentos en suspensión correspondientes a la carga de lavado. La fórmula utilizada es la ecuación 33, obtenida del ajuste de los datos registrados en los ensayos en modo incoherente y para sedimento pasante del tamiz 100 y retenido del 200. La concentración de sedimentos en suspensión (CSS) está expresada en mg/L mientras que el SNR en decibeles.

$$CSS = 10^{(0,094 \times SNR - 4,47)} \quad [33]$$

El valor de SNR que se usó resultó del promedio de los valores registrados por los cuatro rayos (beams por su nombre en inglés) en cada la sección transversal en todas las transectas realizadas para la medición de caudal líquido, es decir que se definió un único valor SNR para cada sección en cada campaña. Las concentraciones, resultantes en mg/L, se compararon con la cantidad de sólidos suspendidos totales medidos simultáneamente por colegas de la Secretaría de Recursos Hídricos y Coordinación de la Provincia de Córdoba, también expresados en mg/L, definido como la porción de sólidos retenidos por un filtro de fibra de vidrio que posteriormente se seca a 103-105°C hasta peso constante.

Las muestras para determinar los sólidos suspendidos totales se sacan en la línea central del río, a aproximadamente a 40 cm de profundidad. Este muestreo se realiza en forma estacional (cada cuatro meses) y el mismo día se realiza la medición de caudal. El procedimiento consiste en pasar una muestra bien mezclada a través de un filtro estándar de fibra de vidrio, previamente pesado, y el residuo retenido se seca a 103-105°C hasta peso constante. El incremento de peso del filtro representa el total de sólidos suspendidos.

Tabla 10.- Cálculo de la concentración de sedimentos en suspensión con mediciones del ADCP

Fecha	Q [m ³ /s]	SNR promedio [dB]	Concentración Calculada [mg/L]	Sólidos Suspendidos Totales [mg/L]	Diferencia
10/09/13	14,97	63,59	32	25	28%
19/11/13	9,64	57,35	8	8	4%
10/06/14	25,64	68,21	87	72	21%
09/09/14	22,81	63,27	30	62	-52%
18/11/14	17,22	64,27	37	29	28%

28/04/15	29,20	67,74	79	81	-3%
09/06/15	24,35	65,16	45	58	-23%
17/11/15*	50,27	59,74	14	170	-92%
08/03/16	91,91	66,09	55	136	-60%

*Medición de caudal realizada con un ADCP SonTek M9

En la Tabla 10 se pueden ver los valores de SNR de cada campaña y los resultados de la concentración aplicando la ecuación 33, junto con la diferencia porcentual respecto a los sólidos en suspensión de la Secretaría de Recursos Hídricos y Coordinación de la provincia de Córdoba. En la Figura 37 se grafican las concentraciones calculadas y las determinadas a partir del análisis de muestras físicas, junto a una recta a 45°. Para concentraciones de sólidos suspendidos totales de hasta 100mg/L las diferencias entre los valores calculados y los de referencia son entre el 3 y 50%, mientras que para concentraciones más altas esta diferencia se hace mayor, ya que el SNR medido disminuye por la atenuación que producen los sedimentos en la señal acústica, subestimando los valores de las muestras físicas. La mayor diferencia se dio para la campaña del día 17-11-15 ($Q=50,27 \text{ m}^3/\text{s}$), alcanzando un valor superior al 92%. Cabe destacar que ese día se utilizó un instrumento diferente al empleado en los ensayos de calibración. El caudal se midió con un ADCP SonTek M9, el cual opera con una frecuencia acústica de 3 o 1 MHz según las condiciones de flujo (con 3 MHz mide velocidades hasta 5 m, mientras que con 1 MHz mide hasta 40 m).

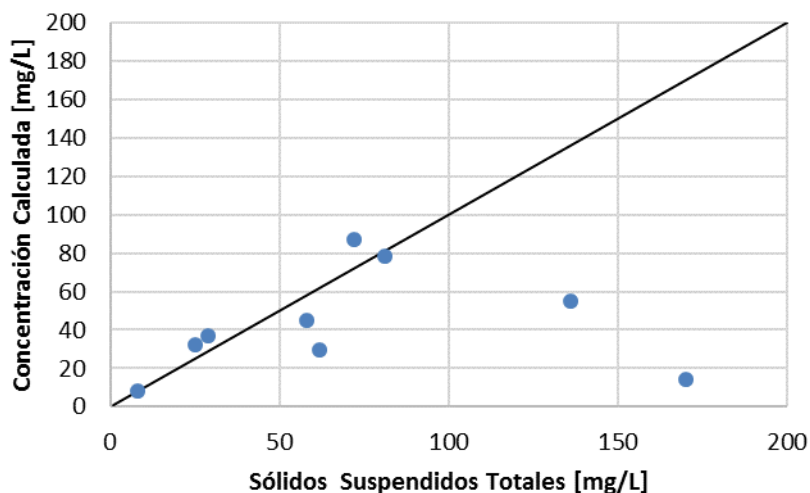


Figura 37.- Contraste de la concentración de sedimentos en suspensión (CSS) estimada con la ecuación 33 y la concentración de sólidos suspendidos totales medidos

3.6 Discusión

El trabajo realizado en esta tesis con respecto al transporte de sedimentos en suspensión constó de dos etapas. La primera consistió en la calibración de un perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP) y un velocímetro acústico Doppler (ADV) para estimar la concentración de sedimentos en suspensión (CSS). La segunda etapa consistió en la aplicación en la zona de estudio la metodología desarrollada, con el objetivo de poder estimar la concentración de sedimentos en suspensión (de lavado) en base a una medición de caudal líquido realizado con un instrumento acústico. De la primera etapa se lograron muy buenos resultados con el ADV, instrumento utilizado comúnmente de laboratorio, cuya relación entre el rebote acústico y la concentración de sedimentos no cambió apreciablemente con el tipo de sedimentos. Se recomienda ampliar los resultados con nuevos experimentos similares, evaluando por ejemplo la influencia de otras variables como ser el voltaje del instrumento acústico, la temperatura del agua, otras granulometrías. Además, se debería evaluar la influencia de la velocidad del agua en la determinación de la concentración de sedimentos en suspensión.

De la etapa de aplicación en campo, con el perfilador acústico se obtuvieron resultados de la carga de lavado con errores del orden del 50% (sin considerar el dato del ADCP SonTek M9I, lo cual resulta prometedor, considerando que las mediciones con los métodos tradicionales también presentan errores de este orden e incluso superior. Sumado a que esta metodología resulta más segura que el uso de los muestreadores convencionales, principalmente para condiciones de crecida, cuando mayor cantidad de material se transporta en suspensión.

Si bien la metodología presentada se encuentra aún en desarrollo, es importante destacar el gran avance logrado para estimar un valor de concentración de sedimentos en suspensión (con su error asociado) por medio de mediciones de caudal realizadas con ADCP. De esta manera, en un futuro, se podrá armar una base de datos completa, no sólo de caudales líquidos sino también de transporte de sedimentos en suspensión, con la importancia ingenieril de disponer no simplemente datos sino de una serie de datos, continua y completa.

Capítulo IV:
METODOLOGÍA Y TÉCNICAS
EXPERIMENTALES UTILIZADAS PARA
CUANTIFICAR EL TRANSPORTE DE
SEDIMENTOS DE FONDO

*Caracterización del Transporte de Sedimentos en un tramo del Río Tercero (Ctalamochita)
utilizando Tecnología Acústica Doppler*

HEREDIA LIGORRIA, ANA INÉS

4.1 Introducción

En los últimos años se han utilizado perfiladores acústicos Doppler para cuantificar el transporte de sedimentos de fondo. La mayoría de los trabajos se hicieron en canales de laboratorio o ríos pequeños de grava o grava arenosa. Rennie et. al (2002), Rennie & Villard (2004) y Rennie & Millar (2004) son los primeros en postular que se puede obtener una velocidad de fondo móvil aparente con ADCP, restando la velocidad del instrumento (Velocidad BT) a la velocidad real del barco, que se obtiene con algún sistema de referencia (por ejemplo, DGPS) o manteniendo el barco completamente quieto. Según estos autores, para la caracterización del transporte de fondo se estima una velocidad aparente de las partículas del fondo (V_{mb}) obtenido a través de mediciones estacionarias, dada por la ecuación 34 (Latosinski et al. 2017), donde V_{DGPS} es la velocidad relativa del ADCP respecto al fondo del río, V_{BT} es la velocidad por seguimiento de fondo (Bottom Track por su nombre en inglés).

$$v_{mb} = v_{DGPS} - v_{BT} \quad [34]$$

En así que en este capítulo se presentan las metodologías y técnicas experimentales utilizadas para cuantificar el transporte de sedimentos de fondo en una sección del Río Tercero (Ctalamochita), aledaña a la ciudad de Villa María. Se realizaron un conjunto de cinco campañas de transporte de sedimentos para diferentes condiciones hidráulicas. En la primera se tomaron muestras del material de fondo, lo que permitió analizar su granulometría, y también se utilizó una de las técnicas convencionales de estimación del transporte de sedimentos de fondo mencionada en el apartado 2.4, que es la trampa Helley-Smith. En las cuatro campañas restantes se aplicaron dos metodologías de medición del transporte de fondo con formas de fondo utilizando el ADCP. Por un lado, un método estacionario en donde el instrumento se deja fijo midiendo en paso de una duna completa, y por otro, mediciones dinámicas aplicando la técnica de seguimiento de dunas. Con estas mediciones además de calcular el transporte de fondo se caracterizaron las formas de fondo, definiendo la altura, longitud, velocidad y factor de forma de las dunas.

Finalmente se evaluaron las tasas de transporte estimadas con las fórmulas empíricas de transporte de sedimentos de fondo en esta sección y se compararon con los obtenidos con el ADCP en las campañas realizadas. Además, ante la presencia de formas de fondo en el cauce del Río Tercero (Ctalamochita) se evaluó el tipo de forma de fondo utilizando los gráficos de predicción de formas de fondo presentes en la bibliografía.

4.2 Técnicas experimentales utilizadas

4.2.1 Muestreadores convencionales del transporte de sedimentos de fondo

Para medir el transporte de fondo en el Río Tercero (Ctalamochita) se utilizó una trampa del tipo Helley-Smith. Este instrumento consiste en tres partes diferenciadas, la primera, un cuerpo metálico rectangular de acero inoxidable con una boca abierta en dirección del flujo que recibe el agua y el material que transporta, inmediatamente después se produce una expansión hacia atrás de la caja metálica lo que funciona como un tubo Venturi acelerando el flujo en la entrada disminuyendo el efecto de la pérdida de carga producido por la entrada y por la bolsa colectora que se encuentra detrás de todo el conjunto que es la que almacena los sólidos colectados. Como se puede observar en la Figura 38 hay dos tipos de trampa Helley Smith, una para crecidas (93,98 cm de largo) y una de menor tamaño para caudales bajos. Ambas tienen abertura de entrada de 7,62 x 7,62 cm, una cámara con radio de expansión de 3,22 y una bolsa colectora de nylon con una excelente resistencia a la abrasión.



Figura 38.- Trampa de sedimentos de fondo Helley-Smith. Arriba para estiaje y abajo para crecida

4.2.2 *Perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP)*

Los ADCP's pueden medir la velocidad del bote con una técnica llamada seguimiento de fondo (Bottom tracking por su nombre en inglés), que computa el cambio Doppler en los pulsos acústicos reflejados por el lecho del río. Esta técnica asume que el fondo es estacionario, sin embargo, el transporte de sedimento sobre o cerca del lecho puede afectar el cambio Doppler de los pulsos de seguimiento de fondo. Estos sedimentos cercanos al lecho se transportan típicamente en la dirección aguas abajo. Si el seguimiento del fondo es afectado por el transporte de sedimentos, la velocidad medida del barco estará sesgada en la dirección opuesta al movimiento del sedimento, lo que haría que una embarcación estacionaria estuviera moviéndose hacia aguas arriba. De esta manera, el barco tendrá una velocidad aparente aguas arriba, a partir de la cual se puede calcular una velocidad media de fondo (V_{mb}) según la ecuación 34. A partir de esta velocidad y estimando el espesor de la capa activa (δ_a) se puede calcular el transporte de fondo q_b , por ejemplo, a través de la expresión de Varn Rijn (1984 a) dada por la ecuación 35, donde c_b es la concentración volumétrica del sedimento. Sin embargo, para no acumular los errores por la estimación de este espesor, en este trabajo se utilizaron nuevas metodologías para obtener el transporte de fondo q_b utilizando un ADCP, que consistieron en mediciones estacionarias y dinámicas de formas de fondo que se detallan en el siguiente apartado.

$$q_b = c_b v_{mb} \delta_b \quad [35]$$

4.3 Metodologías experimentales desarrolladas

Se realizaron un total de cinco campañas de estimación de transporte de sedimentos en el Río Tercero (Ctalamochita). En la primera, realizada el 23/10/2016, se utilizó la trampa de fondo tipo Helley-Smith. En las restantes, al reconocer la presencia de formas de fondo se utilizó el ADCP para calcular el transporte de fondo utilizando diferentes tipos de medición: método del lazo, mediciones estacionarias y mediciones dinámicas, las cuales se detallan a continuación.

4.3.1 Medición de transporte de fondo con la trampa Helley-Smith

La metodología de trabajo con este instrumento responde al método por vadeo, el cual consiste en seleccionar puntos equidistantes sobre una sección de río y tomar una muestra de sedimento durante un tiempo determinado. El tiempo de muestreo es entre 30 y 60 segundos (Edwards & Glysson, 1999), y cada muestra recolectada requiere entre 2 y 3 minutos para bajar, muestrear, levantar, vaciar y mover a una nueva ubicación. Este procedimiento permite determinar el transporte de fondo de fondo medio de la sección. El principal problema que tiene este método es su peligrosidad ya que requiere que el operario ingrese en el río, y cuando el río presenta forma de fondo el caudal sólido obtenido varía notablemente según en qué sitio de la forma de fondo el instrumento se localice (si la trampa está en el valle es el sedimento recolectado será menor que si la trampa está en la cresta o el lomo).

4.3.2 Mediciones de transporte de fondo con el método del lazo (Loop Method) con el ADCP

El método del lazo (conocido comúnmente por su nombre en inglés “Loop Method”) es una metodología utilizada en las mediciones de caudal con ADCP para reconocer la presencia (o no) de transporte de fondo, para luego realizar la corrección correspondiente al caudal cuando no se dispone de GPS (SonTek, 2013). La aplicación de este método consiste en realizar el recorrido de la sección midiendo con el ADCP de una margen a la otra del río y así de vuelta, volviendo exactamente al mismo punto de salida. En caso de existir un movimiento del fondo el punto de inicial y final reportado por el instrumento será diferente, cuando realmente no lo es. Luego se calcula la velocidad de fondo móvil a través del cociente entre la distancia entre la posición inicial y final reportada por el instrumento (“ D_{up} ”, Figura 39), dividido el tiempo que tardo el equipo en efectuar el recorrido (ecuación 36).

$$V_{mb} = \frac{D_{up}}{T} \quad [36]$$

Donde:

V_{mb} : velocidad de fondo móvil media para la sección de medición;

D_{up} : es el error de cierre del lazo (distancia en línea recta hacia aguas arriba desde el punto de inicio hasta el punto final).

T : tiempo de medición para completar los dos cruces.

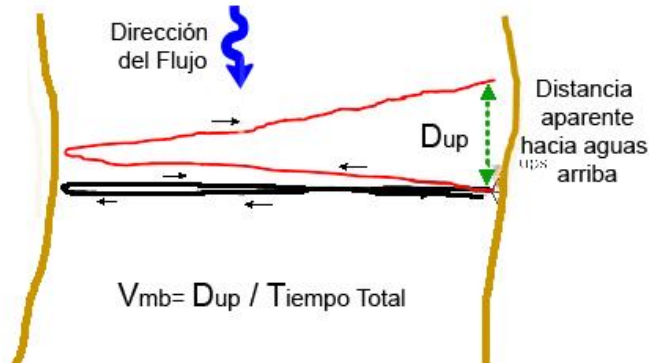


Figura 39.- Esquema del método del lazo con ADCP

En la Figura 40 y Figura 41 se puede ver el resultado de la aplicación del método del lazo en la campaña del día 23/10/2015 según el software *RiverSurveyor Live*. En color amarillo se presenta la trayectoria del instrumento según el GPS (coinciden el inicio y el final de la medición), mientras que en color azul la trayectoria según referencia de fondo (Bottom Track) (no coincide el inicio con el final). La trayectoria en forma de 'V' que se observa en color azul indica la existencia de transporte de fondo. Como se muestra en la Figura 41, la velocidad promedio resultante del fondo es $V_{mb} = 0,06$ m/s. Además de la distancia aparente recorrida hacia aguas arriba (D_{up}), el tiempo de medición (T) y la velocidad media de fondo V_{mb} , se puede ver la advertencia por la pérdida del seguimiento de fondo y la recomendación de realizar nuevamente la medición o bien implementar otra metodología, como por ejemplo estacionarios.

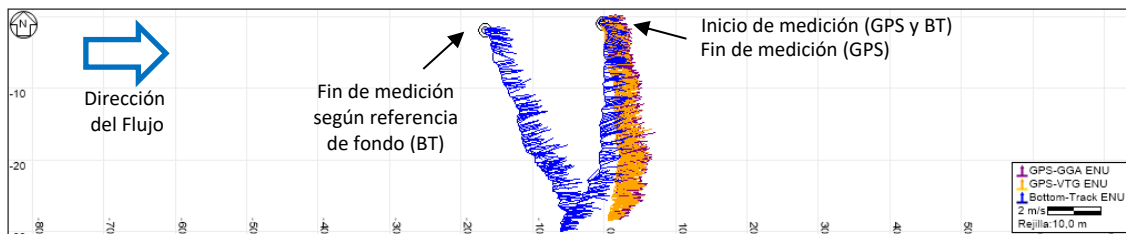


Figura 40.- Método del lazo en la campaña del día 23/10/2015 en Río Tercero (Ctalamochita), sección Villa María

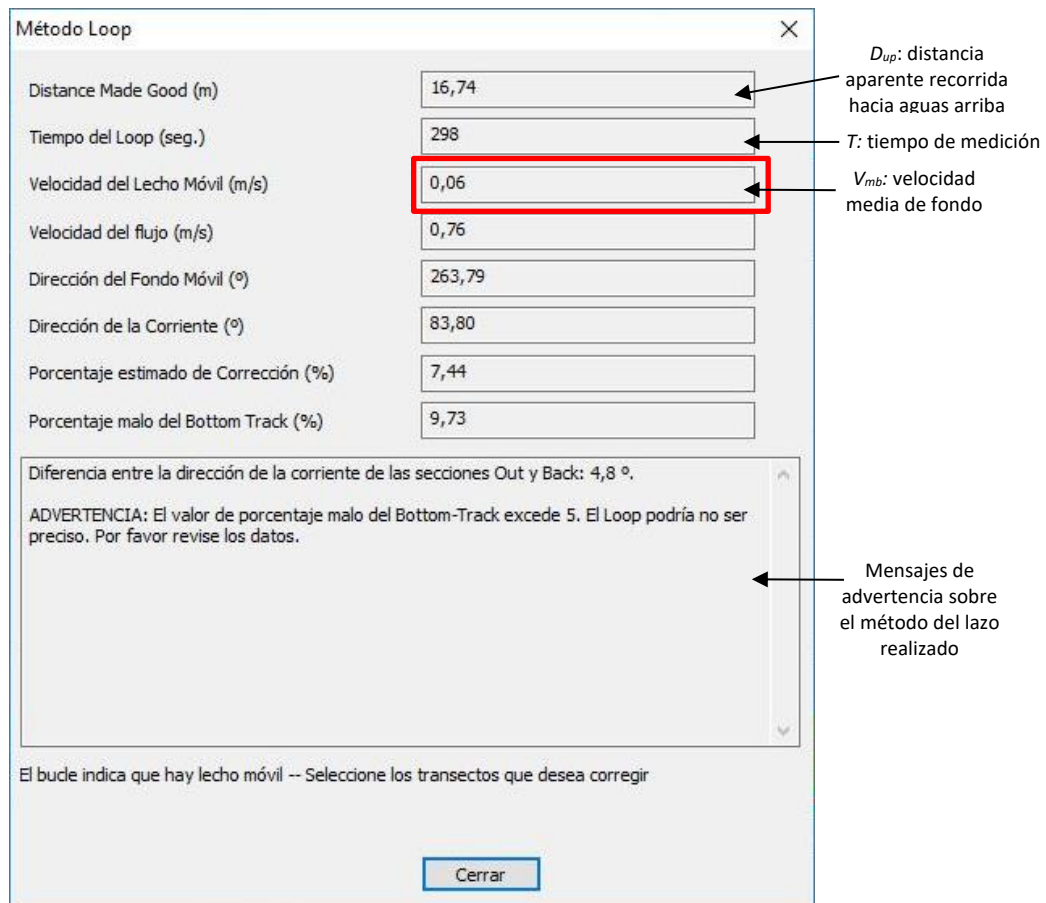


Figura 41.- Detalle de los resultados del método del lazo en la campaña del día 23/10/2015 en Río Tercero (Ctalamochita), sección Villa María

El método del lazo (Loop Method) se caracteriza porque no utiliza GPS, lo que representa una ventaja ya que permite utilizar el ADCP en aquellas condiciones con fondo móvil donde el sistema GPS no funciona. Por ejemplo en zonas con densa arboleda, en valles profundos o cañones, y en algunos casos, cerca de puentes debido a los problemas de recepción de señal de los satélites. Además este método considera el transporte de fondo en toda la sección de medición. Entre las desventajas se pueden mencionar la precisión requerida en el punto de partida y el de llegada, requiere calibración de la brújula, y se debe evitar la pérdida del sistema de referenciación de fondo (Bottom Track) en toda la sección. Otra desventaja es que para aplicar esta metodología al cálculo del transporte de sedimentos se debe asumir un espesor de la “capa activa”, altura respecto al fondo en donde se asume que se desplazan los sedimentos. En la literatura se encuentran diferentes expresiones que permiten determinar el espesor de esta capa ecuación 37 (Dietrich y Whiting (1989), ecuación 48

(Van Rijn (1984a)), sin embargo, es un parámetro que tiene elevada incertidumbre en el transporte de sedimentos de fondo.

$$\delta_b = \frac{1,2 D (1 - \cos\phi) \left[\frac{\tau_b}{\tau_c}\right]}{1 + 0,2 \left[\frac{\tau_b}{\tau_c}\right]} \quad [37]$$

Con:

δ_b : espesor de la capa activa

D : diámetro característico del sedimento

ϕ : ángulo de fricción de los granos

τ_b : tensión de corte de fondo

τ_c : tensión de corte crítica de fondo

$$\delta_b = 0,3 D_*^{0,7} T^{0,5} D \quad [38]$$

Donde

D_* : diámetro de la partícula adimensional (ecuación 39)

$$D_* = D \left[\frac{(s-1)g}{\nu^2} \right]^{1/3} \quad [39]$$

T : parámetro de transporte (ecuación 40)

$$T = \frac{(u'_*)^2 - (u_{*cr})^2}{(u_{*cr})^2} \quad [40]$$

s : densidad específica

g : aceleración de la gravedad

ν : viscosidad cinemática

u'_* : velocidad de corte de fondo

u_{*cr} : velocidad de corte crítica de Shields

4.3.3 Mediciones de transporte de fondo estacionarias con ADCP

Las mediciones estacionarias consisten en dejar el instrumento en una posición fija midiendo durante un tiempo determinado. Ya que el instrumento tiene dos formas diferentes de referenciarse, GPS y por seguimiento de fondo (Bottom Track), cuando hay transporte de fondo aparece una diferencia en la trayectoria según estos dos modos. El GPS muestra que el ADCP está fijo mientras que la referencia por seguimiento de fondo (Bottom Track) muestra que el instrumento recorre una distancia hacia aguas arriba. Conociendo esta distancia y el tiempo de medición se calcula una velocidad de las partículas cercanas al fondo, denominada " V_{mb} " ('Moving bed velocity' por su

denominación en inglés). En la Figura 42 se puede ver una medición de tipo estacionaria, en donde la línea azul corresponde a la trayectoria según la referencia por seguimiento de fondo (Bottom Track) (la cual avanza hacia aguas arriba) y la línea amarilla la posición del GPS (aproximadamente fija). Para el ejemplo mostrado en la figura, la distancia recorrida con Bottom Track es de 155 m y el tiempo de medición 1400 segundos, lo que genera una $V_{mb} = 0,11$ m/s. Esta metodología puede ser aplicada para calcular la velocidad de fondo móvil en distintos puntos de una sección, y a partir de allí calcular el transporte de fondo a través de la ecuación 45, con la ventaja de que permite reconocer las zonas donde se da el mayor transporte dentro de la sección de estudio.

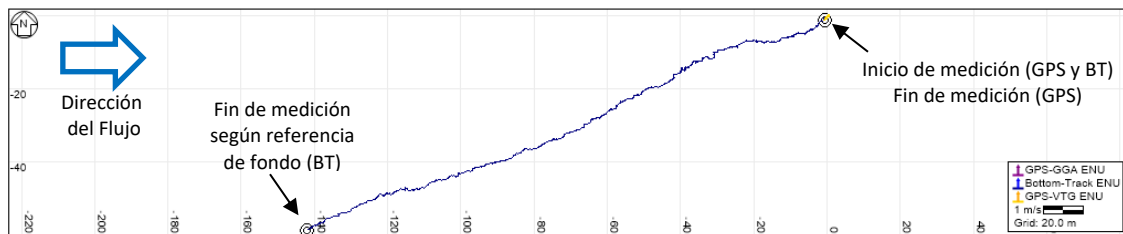


Figura 42.- Medición estacionaria con ADCP en la campaña del día 23/10/2015 en Río Tercero (Ctalamochita), sección Villa María

Por otro lado, se utilizó esta metodología de medición para monitorear el paso de una duna, con la diferencia de que ya el tiempo de medición no son minutos sino horas. Este tipo de medición consiste en colocar el instrumento en una posición fija y medir el tiempo suficiente para registrar el desplazamiento de una duna completa mientras se registra el campo de velocidades y la batimetría. Este tiempo de paso depende del caudal y de las características de la duna, por ejemplo, a mayor caudal, mayor velocidad de desplazamiento de la duna (mayor tasa de transporte), por lo tanto, el tiempo de medición será menor. La ventaja de esta metodología es que además de obtener la batimetría del fondo se mide en forma simultánea la velocidad del flujo, contando con el dato adicional de los perfiles de velocidad en cada punto sobre la duna (en el caso del ADCP RiverSurveyor S5, 1 perfil completo de velocidades por segundo). Una desventaja de esta metodología a considerar es que el transporte de fondo estimado se obtiene evaluando una única forma de fondo.

A través de estas mediciones se caracterizó geoméricamente cada duna estableciendo su altura (diferencia entre la profundidad de la cresta y la profundidad del

valle), longitud (diferencia entre la progresiva de dos valles consecutivos) y el factor de forma (cociente entre el área real de la duna y el área de un triángulo equivalente). También se calculó la velocidad de desplazamiento de la duna (cociente entre la longitud de la forma de fondo y el tiempo en recorrer esa distancia), y finalmente el transporte de fondo con la ecuación 41 y la ecuación 42 (Maza Álvarez y Flores, 1996).

$$g_{sf} = \frac{(1-P) \times Vol_d}{t} \quad [41]$$

$$q_b = g_{sf} \times \rho \quad [42]$$

Donde

g_{sf} : carga de fondo por unidad de ancho en m^2/s

P : porosidad del sedimento (considerada igual a 0,4, valor típico para las arenas)

Vol_d : volumen de la duna

t : tiempo de paso de la duna

q_b : tasa de transporte de fondo por unidad de ancho en $Kg/m s$

ρ : densidad del sedimento

4.3.4 Mediciones de transporte de fondo dinámicas con el ADCP

Las mediciones dinámicas realizadas con el ADCP se utilizaron para aplicar la técnica de seguimiento de duna con la hipótesis de que este método requiere un tiempo de medición relativamente menor que el método estacionario descrito previamente. Este método, comúnmente utilizado para el cálculo del transporte sólido de fondo, consiste en comparar el desplazamiento de un conjunto de formas de fondo a través del relevamiento de dos perfiles longitudinales del lecho relevados durante sucesivos períodos de tiempo. Asume que la migración de dunas puede asimilarse a la traslación sin cambio de forma de una duna, y luego por comparación se obtiene una relación que vincula la carga fondo g_{sf} con la celeridad de migración de la duna y su altura, que se muestra a continuación, en la ecuación 43 (Van Rijn, 1993).

$$g_{sf} = \alpha(1 - P)H_d u_d \quad [43]$$

Donde

α : factor de forma (0,5 para dunas regulares y 0,6 para dunas irregulares)

P : porosidad del sedimento (considerada igual a 0,4, valor típico para las arenas)

H_d : altura de la duna

u_d : velocidad de la duna

Cabe aclarar que la ecuación 53 también puede aplicarse a las dunas relevadas con el método estacionario (apartado 4.3.3). Sin embargo, a los fines de comparar las dos metodologías se utilizaron expresiones diferentes.

Las mediciones dinámicas se realizaron recorriendo longitudinalmente el río en sentido del flujo (ida) y contrario al flujo (vuelta), desplazando el instrumento desde el puente Alberdi de la localidad de Villa María una distancia aproximada de 50 metros. Luego, se proyectaron dos longitudinales próximas a una dirección definida arbitraria para luego comparar el desplazamiento de cada duna, como se ve en la Figura 43. La proyección de los perfiles longitudinales se realiza debido a que las trayectorias de la embarcación en ida y vuelta no son exactamente iguales.



Figura 43.- Proyección de las mediciones longitudinales con ADCP

Una vez proyectadas las mediciones en una misma dirección se identificaron las dunas en los dos perfiles, para después calcular la velocidad de avance de cada duna (cociente entre el desplazamiento promedio y el intervalo de tiempo en el que se

produjo), obteniendo finalmente con la expresión antes mencionada el transporte de sedimento de fondo. La ventaja de este método con respecto al método estático es que permite obtener el transporte de fondo mediante la cuantificación el desplazamiento de una serie de formas de fondo en un determinado tiempo, mientras que el método estático obtiene dicho transporte a través de la caracterización de una sola forma de fondo.

Tabla 11.- Comparación de técnicas de ADPC para evaluar el transporte de fondo

Método	Espacio	Tiempo	Condición para aplicación
Lazo (Loop)	Promedio	Varias dunas	$h < 2m$
Estacionario	Local	Una duna	$h \approx 10m$
Dinámico	Local	Varias dunas (relación entre distancia recorrida y longitud de duna)	$h \approx 10m$

En la Tabla 11 se observa una tabla comparativa de las tres metodologías utilizadas para evaluar el transporte de fondo con el ADCP.

4.4 Resultados

4.4.1 Resultados de muestreo de material de fondo

En la primera campaña, realizada el 23/10/2015 se tomaron muestras del lecho del río que permitieron trazar la curva granulométrica del lecho y obtener el diámetro característico d_{50} . En la Tabla 12 se observan los parámetros hidráulicos medidos en cada campaña: caudal (Q), profundidad media (h), ancho (b), radio hidráulico (R_h), área (A) y velocidad media del flujo (V).

Tabla 12.- Parámetros hidráulicos medidos en las campañas en el Río Tercero (Ctalamochita) con ADCP

Campaña	Q [m ³ /s]	h [m]	b [m]	R _h [m]	A [m ²]	V [m/s]
1) 23/10/2016	13,18	0,59	31,65	0,52	17,21	0,77
2) 16/03/2016	113,85	1,97	41,04	1,80	80,84	1,23
3) 08/04/2016	65,84	1,43	36,26	1,33	51,86	1,15
4) 05/09/2016	24,90	0,80	37,95	0,79	31,16	0,80
5) 07/11/2016	18,89	0,74	37,29	0,67	26,03	0,73

Para el análisis granulométrico se utilizó el método mecánico del tamizado con diferentes diámetros (T4, T10, T16, T30, T40, T100 y T200). En la parte superior, donde se encuentra el tamiz de mayor diámetro, se agrega el material original (suelo o sedimento mezclado) y la columna de tamices se somete a vibración y movimientos rotatorios intensos mediante una máquina destinada a tal fin o agitación manual, la cual es menos eficiente. Luego de algunos minutos de agitación, se separa la columna de tamices cuidando de no derramar la muestra retenida en cada uno de ellos. Luego se toman los pesos de material retenido en cada tamiz con una balanza de precisión y se los registra en una planilla. Conociendo el peso total de la muestra y el peso del material retenido en cada tamiz, se puede determinar el porcentaje pasante por cada uno de ellos mediante la ecuación 44, donde P_T es el peso total de la muestra y R_i es el peso retenido en cada tamiz de abertura de malla superior a la abertura sobre la cual se quiere obtener el porcentaje pasante.

$$\%P = 100 - \frac{\sum R_i}{P_T} \cdot 100 \quad [44]$$

En la Figura 44 se presentan los puntos en la sección de medición donde se tomaron las muestras de material de fondo. En la Tabla 13 y Figura 45 se pueden ver los resultados del análisis granulométrico realizado. Se puede observar que el material de fondo cerca de la margen es de mayor tamaño que la del tramo central.

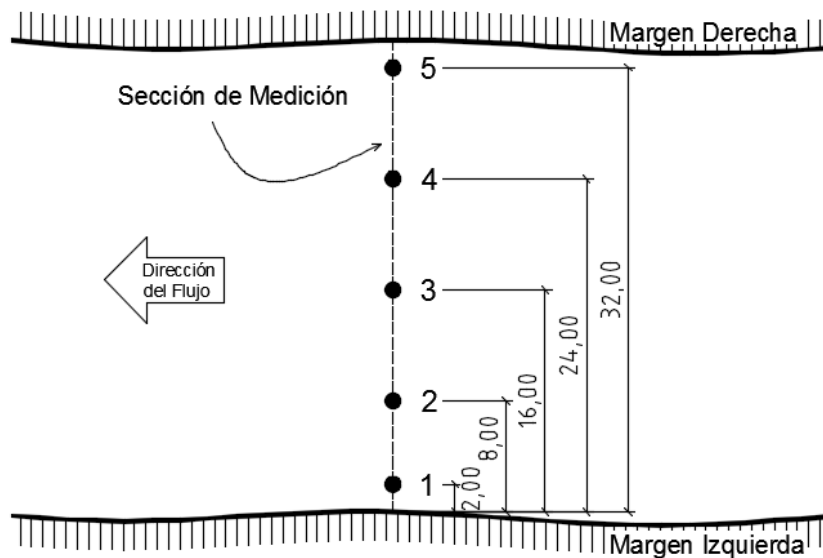


Figura 44.- Puntos de muestreo equidistantes en la sección de medición

Tabla 13.- Granulometría del material de fondo para distintas progresivas

Abertura Tamiz [mm]	Punto de muestreo					Promedio
	1	2	3	4		
	% Pasante Acumulado	% Pasante Acumulado	% Pasante Acumulado	% Pasante Acumulado	% Pasante Acumulado	
4,75	86,93	97,31	89,85	94,93	93,05	92,41
2	59,59	74,47	38,29	45,60	39,67	51,52
1,18	29,04	44,63	4,02	13,71	10,79	20,44
0,6	11,98	17,92	0,00	0,00	2,07	6,39
0,425	0,00	7,46	0,00	0,00	0,00	1,49
0,15	0,00	0,90	0,00	0,00	0,00	0,18
0,075	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

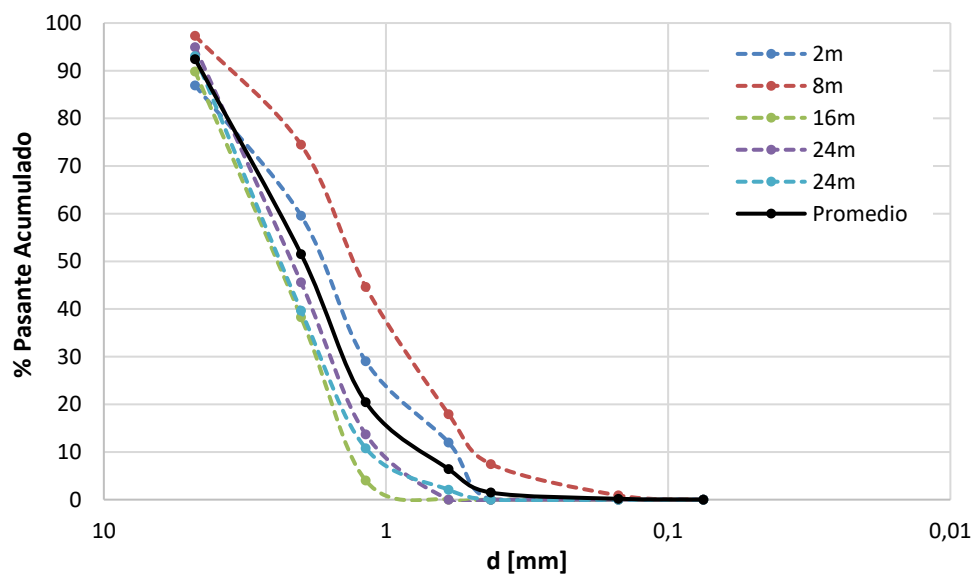


Figura 45.- Curva granulométrica del material de fondo de Río Tercero (Ctalamochita)

En la Tabla 14 se presentan los diámetros correspondientes a cada percentil de la curva granulométrica promedio. Se puede ver que el material del cauce del Río Tercero (Ctalamochita), en la sección de Villa María está formado principalmente por arena gruesa, con un d_{50} de 1,95mm, próximo a las gravas.

Tabla 14.- Diámetros característicos del material de fondo de Río Tercero (Ctalamochita)

Diámetro	[mm]
d_{10} =	0,75
d_{16} =	1,03
d_{20} =	1,17
d_{30} =	1,42
d_{35} =	1,54
d_{50} =	1,95

d_{60} =	2,37
d_{65} =	2,65
d_{84} =	3,95
d_{90} =	4,55

4.4.2 Resultados de expresiones empíricas para la predicción de formas de fondo

Para reconocer el tipo de forma, se utilizaron los gráficos de predicción de formas de fondo presentados en la sección 2.4 con los datos observados durante las campañas de mediciones realizadas. Según el predictor propuesto por los autores Boguchawl & Southard, y adaptado por Ashley (1990) el tipo de formas de fondo que se producen en el Río Tercero (Ctalamochita) son dunas, como se puede observar en la Figura 46.

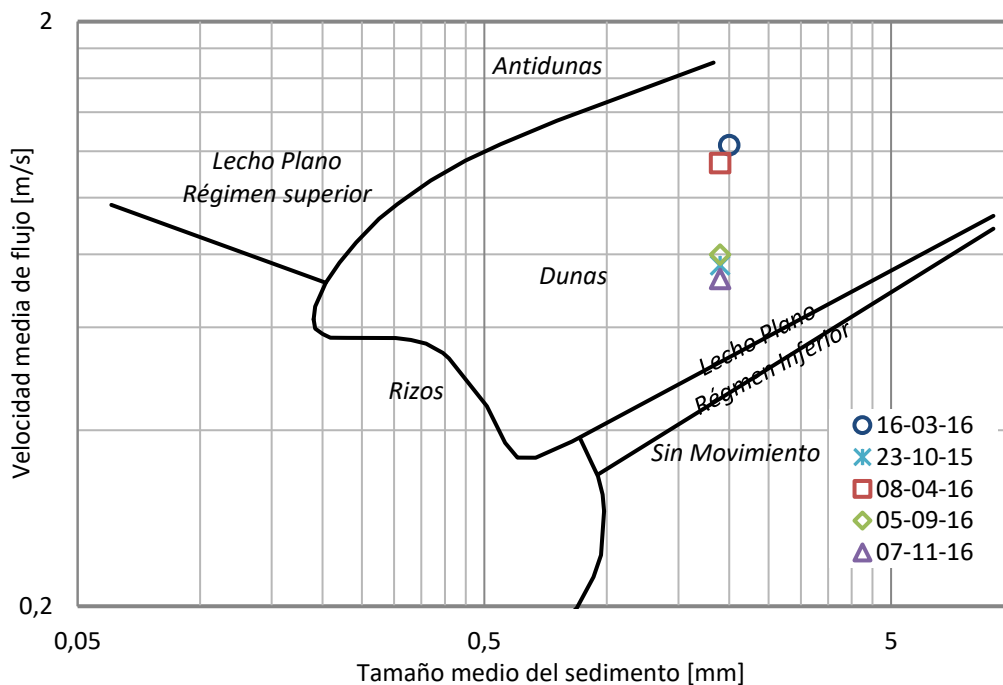


Figura 46.- Predictor de formas de fondo propuesta por Boguchawl & Southard, adaptado por Ashley (1990)

En la Figura 47 se pueden ver los puntos de las mediciones de transporte de fondo realizadas en el Río Tercero (Ctalamochita), en el gráfico predictor propuesto por Chabert & Chauvin (1963).

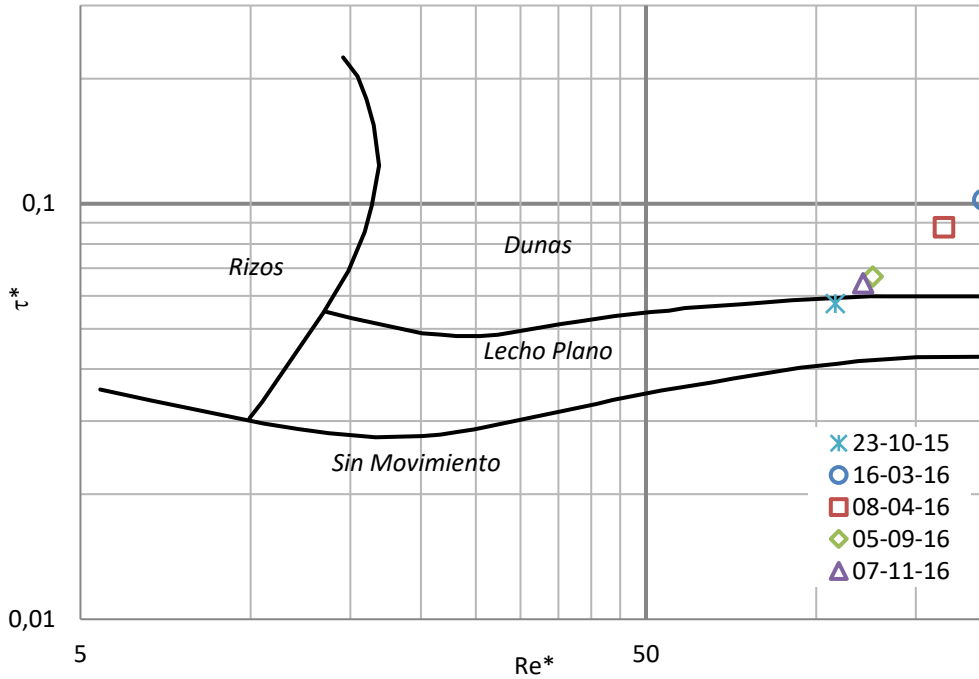


Figura 47.- Predictor de formas de fondo de Chabert & Chauvin (1963)

Por último, en la Figura 48 se pueden observar los datos experimentales en el diagrama de sedimentación en ríos de Shields-Parker. Similar al resto de los gráficos, el tipo de transporte en el Río Tercero (Ctalamochita) es de fondo, sin suspensión y con dunas.

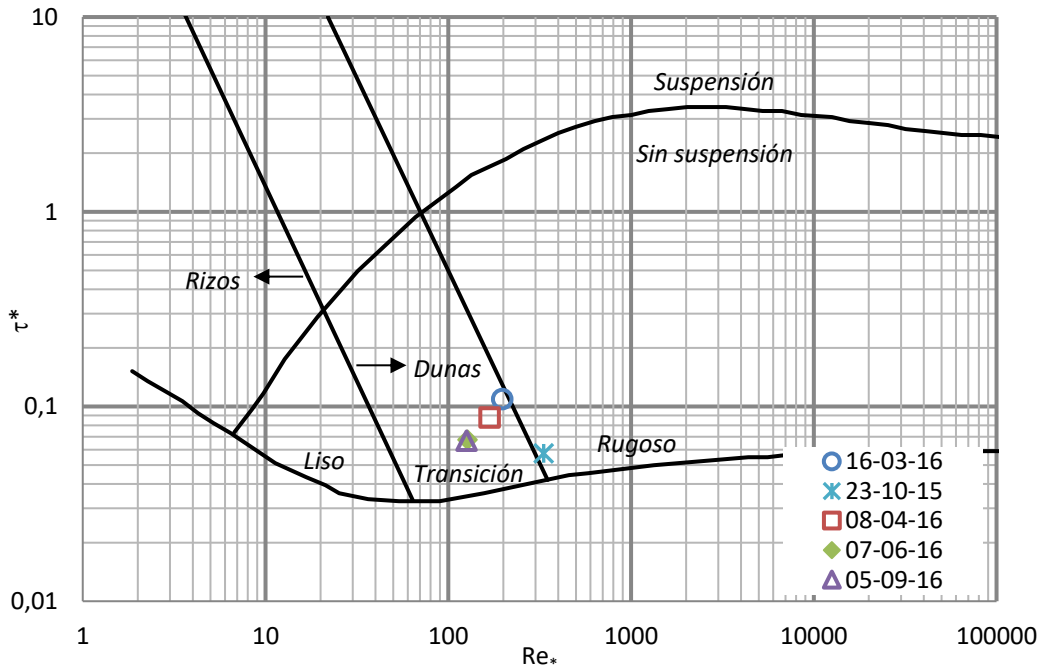


Figura 48.- Diagrama de sedimentación en ríos de Shields-Parker (García 2000)

4.4.3 Resultados de medición de transporte de fondo con la trampa Helley-Smith

En cuanto a la medición del transporte de sedimento de fondo, por la seguridad del operador se tomaron muestras con la trampa Helley-Smith sólo en dos puntos de la sección: el número uno (ubicado a 8 m respecto a la margen izquierda) y el número tres (a 16 m), Figura 44. La presencia de dunas dificultó esta tarea, ya que la cantidad de material recogido en la bolsa dependía de la ubicación respecto a la forma de fondo: en el valle el transporte era prácticamente nulo, mientras que en la cresta era máximo. Finalmente se optó por tomar las muestras en la cresta de las formas de fondo ya que se asume se da el máximo transporte de sedimentos. En la Tabla 15 se muestran los resultados del uso de la trampa.

Tabla 15.- Resultado del transporte de sedimento de fondo con la trampa Helley-Smith

Ubicación	Tiempo [min]	Peso [g]	q_b [g/m.s]	q_b promedio [Kg/m.s]
2	3	397,1	25,36	
2	8	440,0	10,54	0,02
2	6	660,6	21,09	
3	6	867,8	27,71	
3	6	1178,9	37,64	0,03

4.4.4 Resultados de transporte de fondo a partir de mediciones con el método del lazo con ADCP

Las mediciones con el método del lazo (Loop Method) permitieron reconocer la presencia de transporte de fondo, representado por la trayectoria con forma de “V” del sistema de referenciación por seguimiento de fondo (Bottom Track), que se puede ver en la parte superior de las Figura 49, Figura 50, Figura 51, Figura 52, Figura 53, que corresponden a cada campaña de sedimentos realizada. En la parte inferior de estas imágenes se presenta la batimetría de la sección, junto con la velocidad del agua en escala cromática. Cuando el instrumento pierde la referencia por fondo (Bottom Track), por ejemplo en la Figura 50 para la campaña del 16/03/2016 con $Q=113,85 \text{ m}^3/\text{s}$, no mide velocidades ni batimetría, por eso la sección se presenta cortada.

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES UTILIZADAS PARA CUANTIFICAR EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DE FONDO

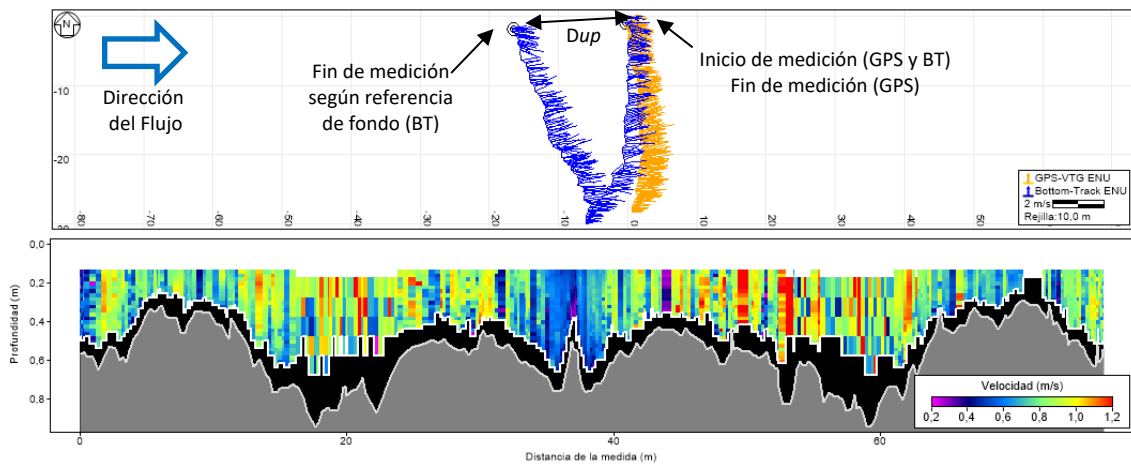


Figura 49.- Resultado del método del lazo de la campaña del 23/10/2015, $Q=13,18 \text{ m}^3/\text{s}$

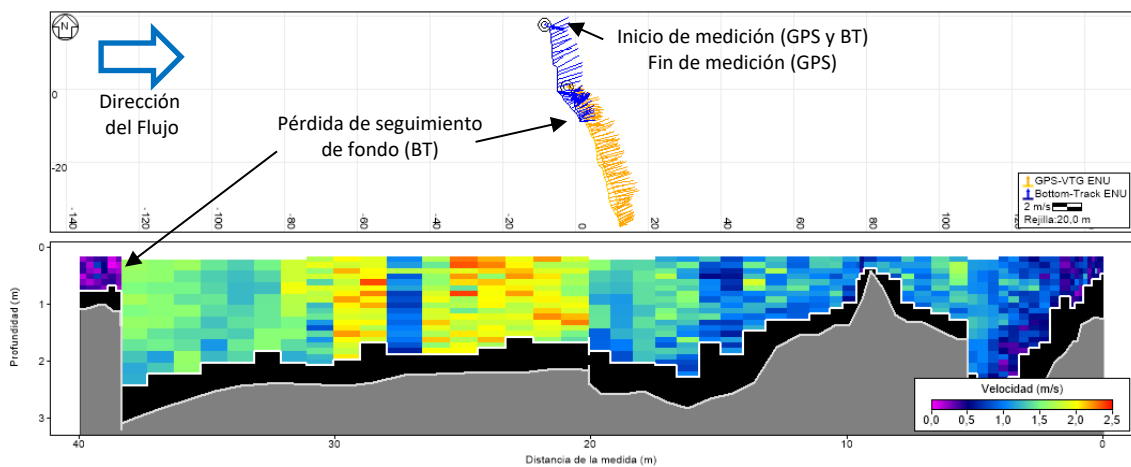


Figura 50.- Resultado del método del lazo de la campaña del 16/03/2016, $Q=113,85 \text{ m}^3/\text{s}$

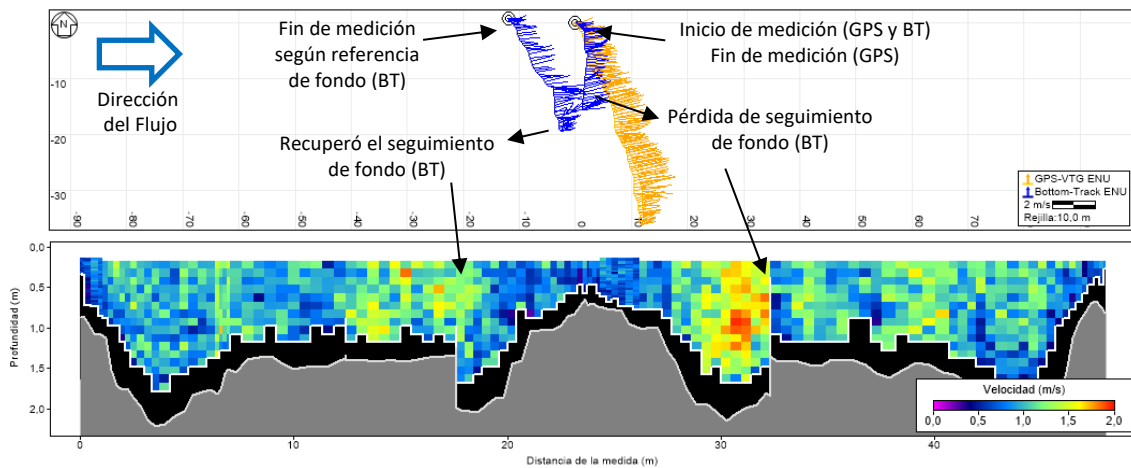


Figura 51.- Resultado del método del lazo de la campaña del 08/04/2016, $Q=65,84 \text{ m}^3/\text{s}$

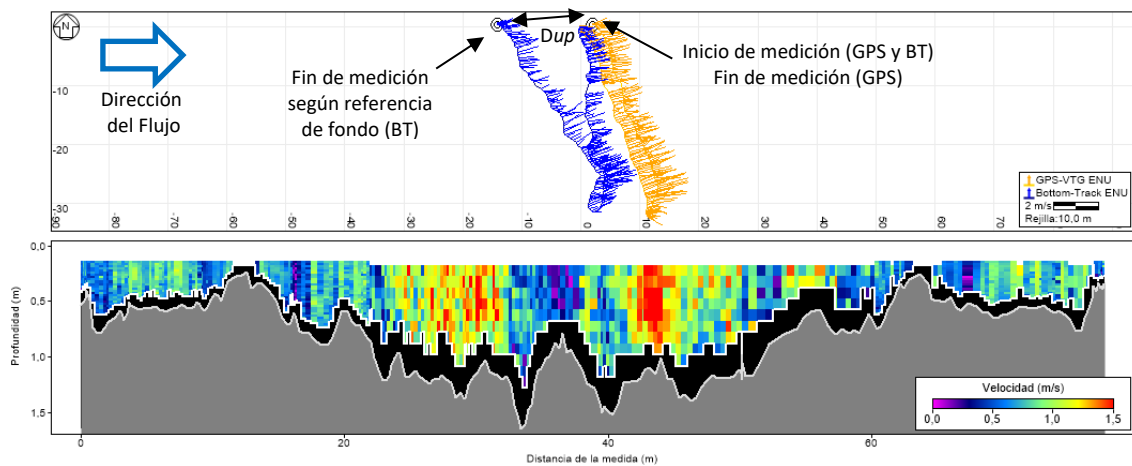


Figura 52.- Resultado del método del lazo de la campaña del 05/09/2016, $Q=24,90 \text{ m}^3/\text{s}$

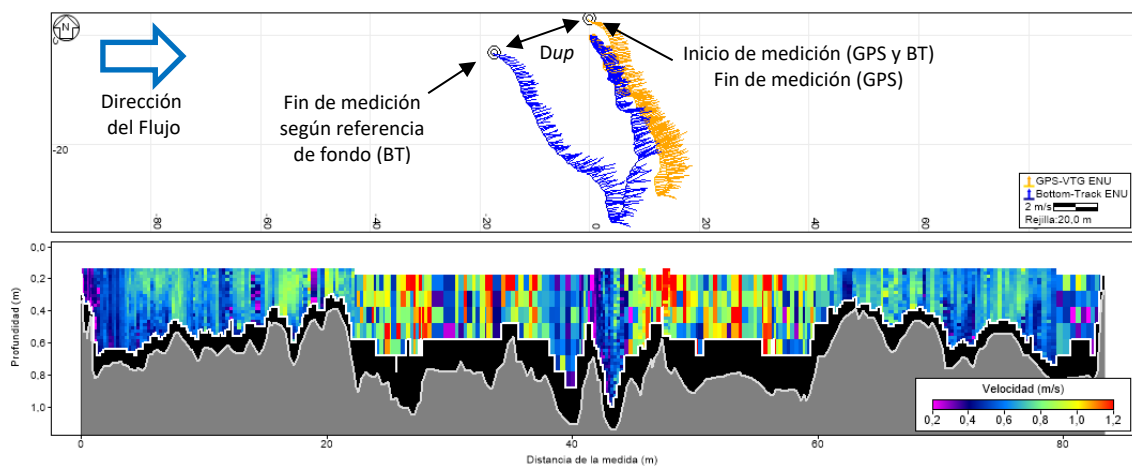


Figura 53.- Resultado del método del lazo de la campaña del 07/11/2016, $Q=18,89 \text{ m}^3/\text{s}$

En la medición del día 16/03/2016, para un caudal de $113 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 50) no pudo aplicarse el método del lazo ya que se perdió la referencia del instrumento por seguimiento de fondo (Bottom Track) en más del 20% de la sección, como indica la comparación del recorrido registrado con GPS (en color amarillo). Si bien la profundidad de la sección estaba dentro del rango de medición del instrumento, es probable que no pudo reconocer el fondo por la presencia de transporte de fondo a una alta velocidad. También en la campaña del 08/04/2016 se perdió el seguimiento de fondo (Bottom Track), por eso la trayectoria color azul (Figura 51) es más corta y no hace el recorrido completo de la sección.

En la Tabla 16 se muestran los resultados generados con este método. En la mayoría de los casos (salvo la campaña del 07/11/2016) el porcentaje de pérdida de referenciación por seguimiento de fondo (Bottom Track) supera el 5%, por la causa que

se mencionó anteriormente. Sin embargo, se puede observar que la velocidad del sedimento de fondo es mayor para caudales más altos, alcanzando un valor de 0,16m/s (Tabla 16).

Tabla 16.- Resumen de los resultados del método del lazo

Campaña	Q [m ³ /s]	D _{up} [m]	Tiempo [seg]	V _{mb} [m/s]	Velocidad del Flujo [m/s]	% Malo de seguimiento de fondo (BT)	Comentarios
23/10/2015	13,18	16,74	298	0,06	0,76	9,73	Porcentaje de mal seguimiento de fondo (Bottom Track) excede el 5%. El método del lazo indica la existencia de fondo móvil.
16/03/2016	113,85	19,71	122	0,16	1,30	83,47	Porcentaje inválido de seguimiento de fondo (Bottom Track) excede el 20%.
08/04/2016	65,84	11,95	194	0,06	0,97	72,16	Porcentaje inválido de seguimiento de fondo (Bottom Track) excede el 20%.
05/09/2016	24,90	14,17	258	0,05	0,81	19,77	Porcentaje inválido de seguimiento de fondo (Bottom Track) excede el 5%.
07/11/2016	18,89	17,83	295	0,06	0,66	2,03	El método del lazo indica la existencia de fondo móvil.

4.4.5 Resultados de transporte de fondo a partir de mediciones estacionarias con ADCP

De las campañas realizadas, en cuatro se midió el paso de una duna completa, que se muestran en la Figura 54, la Figura 55, la Figura 56, la Figura 57 y la Figura 58. Con los datos de estas mediciones se calcularon las características geométricas de las dunas (altura, longitud y factor de forma), la velocidad del sedimento en cada parte de la duna (cresta, lomo y valle) y finalmente el transporte de fondo para cada condición.

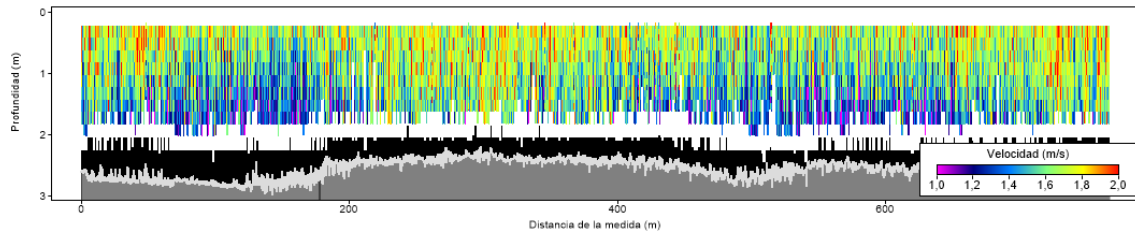


Figura 54.- Medición estacionaria de la campaña del 16/03/2016, $Q=113,85 \text{ m}^3/\text{s}$

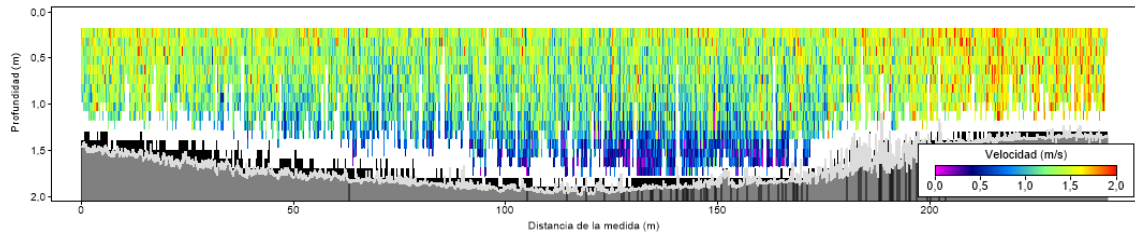


Figura 55.- Medición estacionaria de la campaña del 08/04/2016, $Q=65,84 \text{ m}^3/\text{s}$ (primera parte)

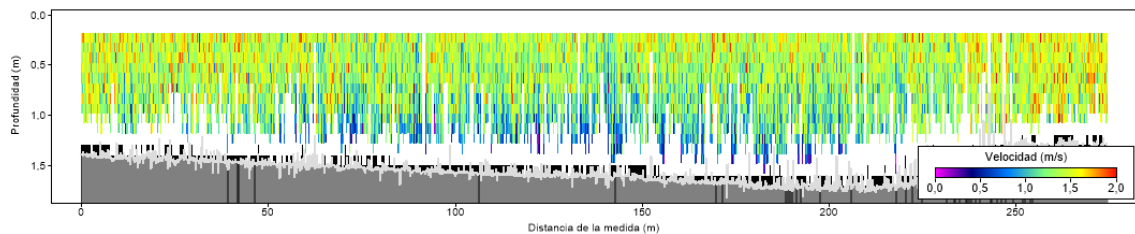


Figura 56.- Medición estacionaria de la campaña del 08/04/2016, $Q=65,84 \text{ m}^3/\text{s}$ (segunda parte)

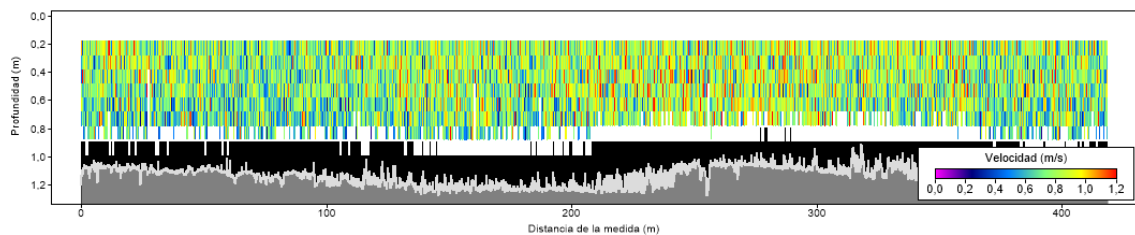


Figura 57.- Medición estacionaria de la campaña del 05/09/2016, $Q=24,90 \text{ m}^3/\text{s}$

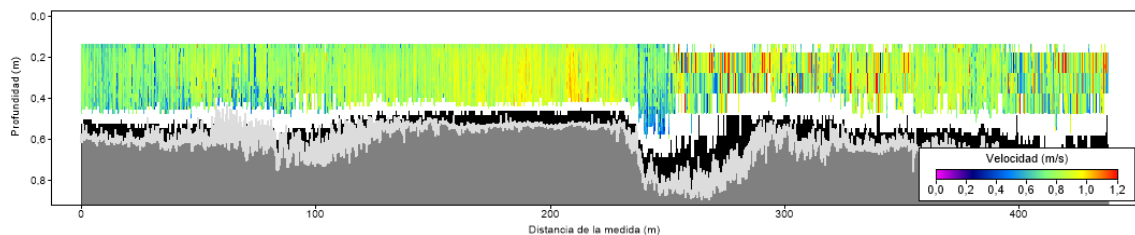


Figura 58.- Medición estacionaria de la campaña del 07/11/2016, $Q=18,89 \text{ m}^3/\text{s}$

A la señal original de la profundidad medida por el ADCP se le realizó un filtrado de banda para las fluctuaciones de frecuencia muy baja aplicando un análisis de Fourier. El espectro de energía del registro completo de datos exhibe por lo general una serie de picos alternados con amplias oscilaciones, lo que hace confusa su interpretación. La

aplicación de filtros permite separar amplitudes de onda de distintas frecuencias reteniendo las variaciones que interesan y eliminando aquellas que perturban la interpretación de los resultados, lo que facilita su análisis. El filtro de banda aplicado funciona como una ventana que permite ver las ondas de un determinado ancho de banda de frecuencias.

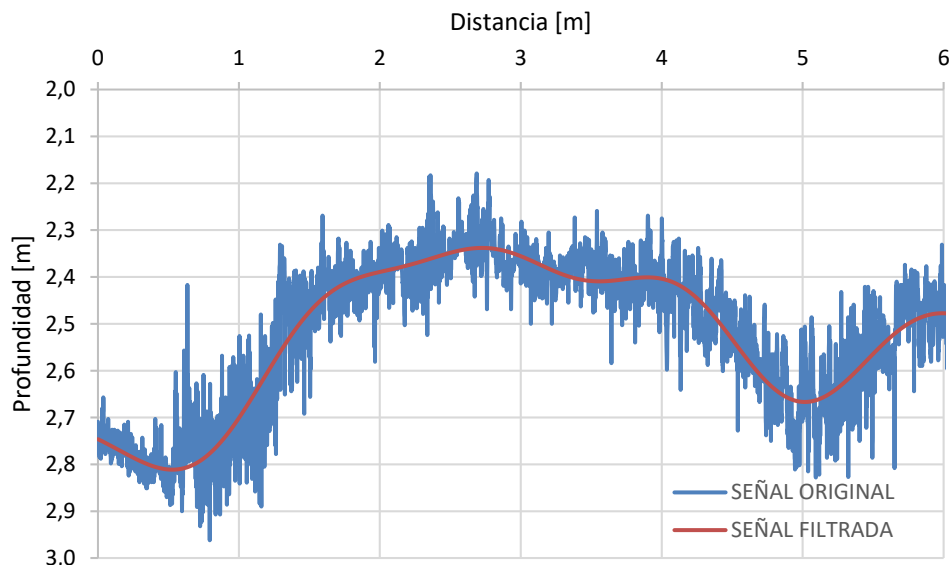


Figura 59.- Señal original y señal filtrada campaña 16/03/2016, $Q=113,85 \text{ m}^3/\text{s}$

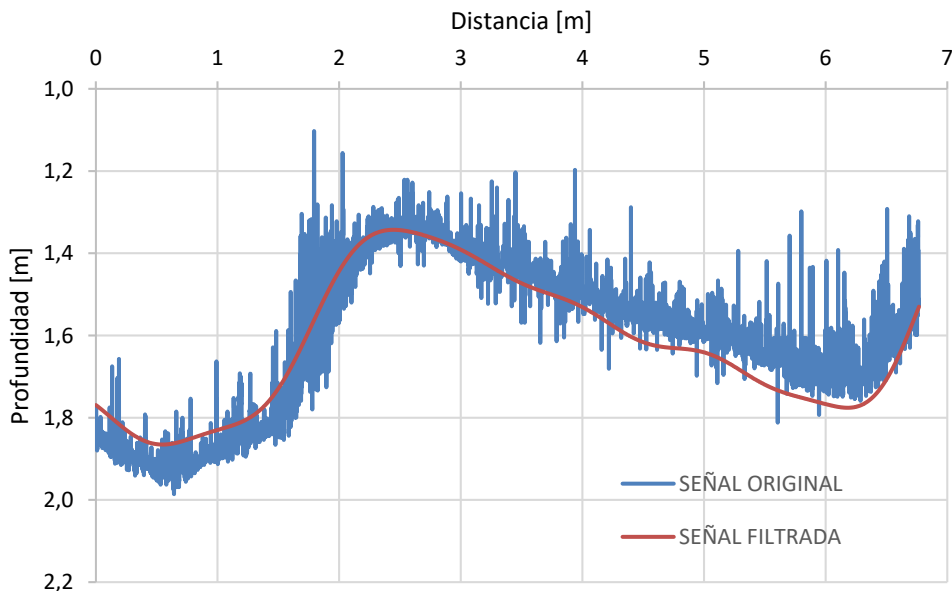


Figura 60.- Señal original y señal filtrada campaña 08/04/2016, $Q=65,84 \text{ m}^3/\text{s}$

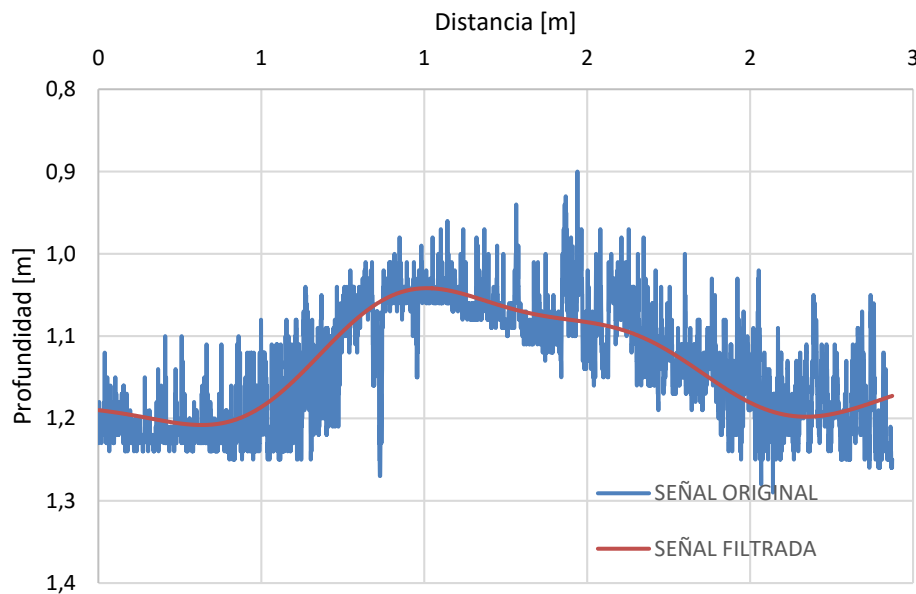


Figura 61.- Señal original y señal filtrada campaña 05/09/2016, $Q=24,90 \text{ m}^3/\text{s}$

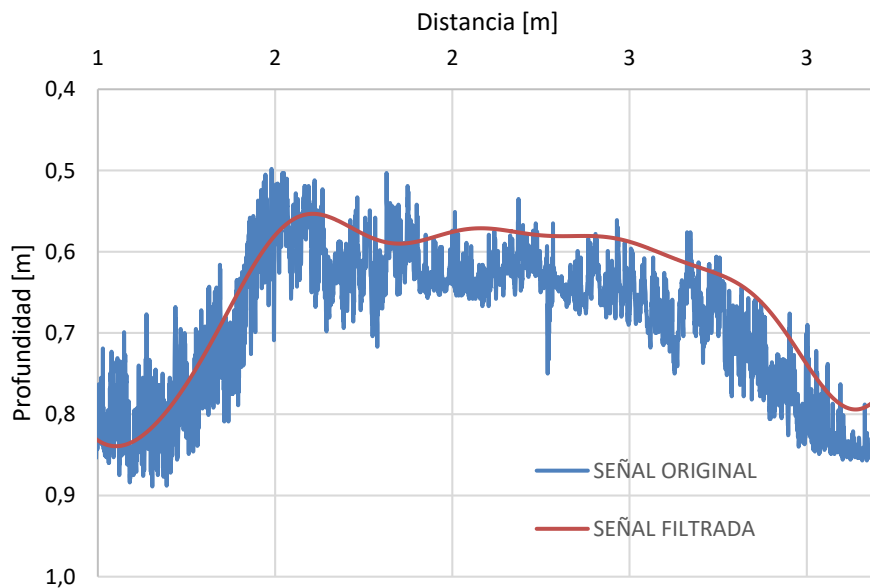


Figura 62.- Señal original y señal filtrada campaña 07/11/2016, $Q=18,89 \text{ m}^3/\text{s}$

En la Figura 59, Figura 60, Figura 61, y Figura 62 se contrasta la señal original registrada y la señal filtrada, la cual se utilizó luego para calcular la altura y longitud de cada duna. En la Tabla 17 se muestran las características del flujo (caudal, velocidad y profundidad media) y la longitud máxima y mínima que definen el ancho de banda, mientras que en la Tabla 18 se pueden observar las características de las dunas, como

altura, longitud y velocidad de duna. Además, se presentan los resultados de la velocidad de la duna y el transporte de fondo por unidad de ancho. En general, para mayor caudal líquido aumenta el transporte de fondo, y la velocidad de desplazamiento de la duna.

Tabla 17.- Características del flujo y longitudes de filtrado de la señal

Campaña	Q [m ³ /s]	V [m/s]	H [m]	Longitud Mínima [m]	Longitud Máxima [m]
1) 16/03/2016	113,85	1,23	1,97	0,40	11,90
2) 08/04/2016	65,84	1,15	1,43	0,93	9,33
3) 05/09/2016	24,90	0,80	0,80	0,08	3,26
4) 07/11/2016	18,89	0,73	0,74	0,08	4,21

Tabla 18.- Características de las dunas medidas

Campaña	Δ H _d [m]	Λ L _d [m]	$\psi = \Delta/\Lambda$	u _d [m/h]	α Factor de Forma	q _b [Kg/m.s]
1) 16/03/2016	0,40	4,49	4,29	4,29	0,64	0,49
2) 08/04/2016	0,48	5,63	0,08	3,36	0,47	0,33
3) 05/09/2016	0,16	1,85	0,09	1,17	0,54	0,05
4) 07/11/2016	0,24	2,07	0,12	1,52	0,75	0,12

4.4.6 Resultados de transporte de fondo obtenidos con mediciones dinámicas con ADCP

Por razones operativas las mediciones dinámicas se realizaron en ida y vuelta, es decir, en el sentido del flujo y luego en sentido contrario de manera consecutiva, en una misma medición del ADCP. Es por eso que en la Figura 63, la Figura 64, y la Figura 65 se observa la batimetría espejada.

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES UTILIZADAS PARA CUANTIFICAR EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DE FONDO

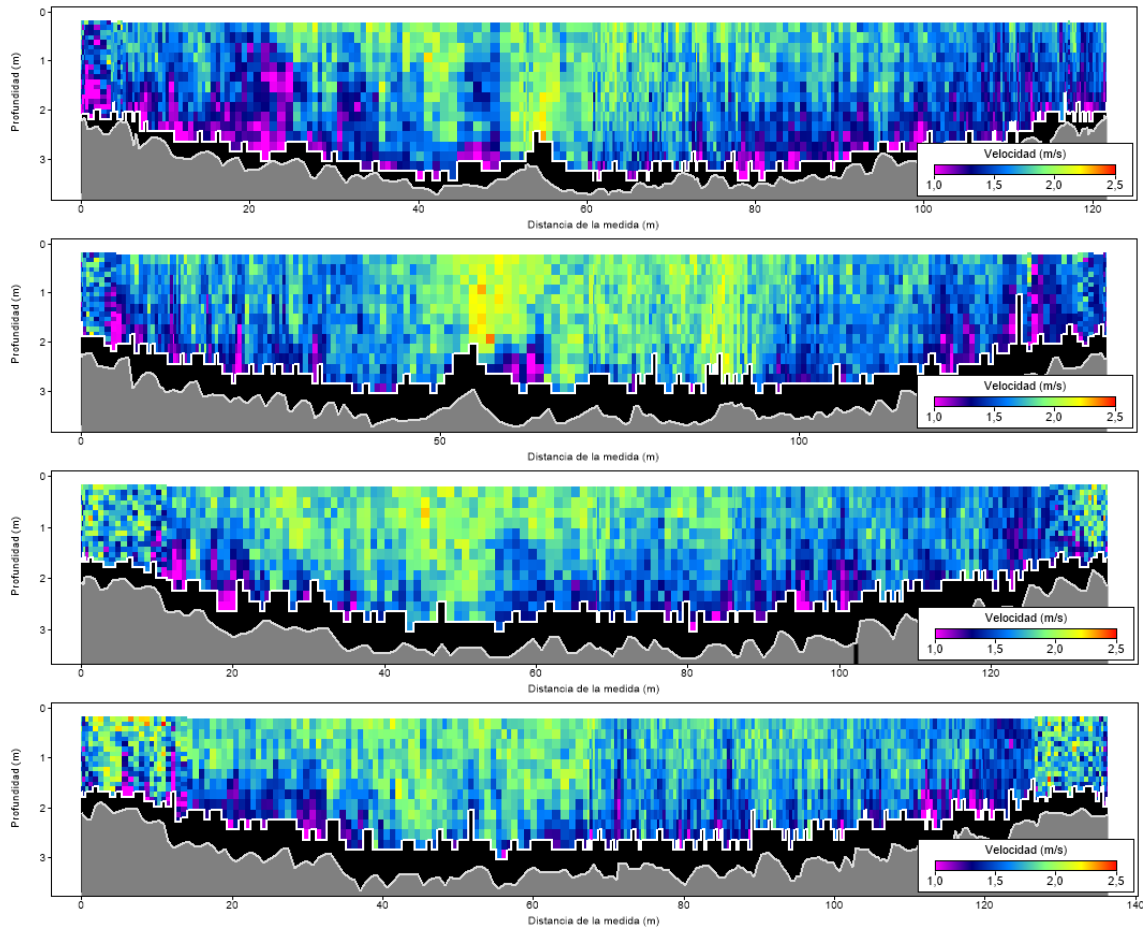


Figura 63.- Mediciones dinámicas realizadas la campaña del 16/03/2016, $Q=113,85 \text{ m}^3/\text{s}$

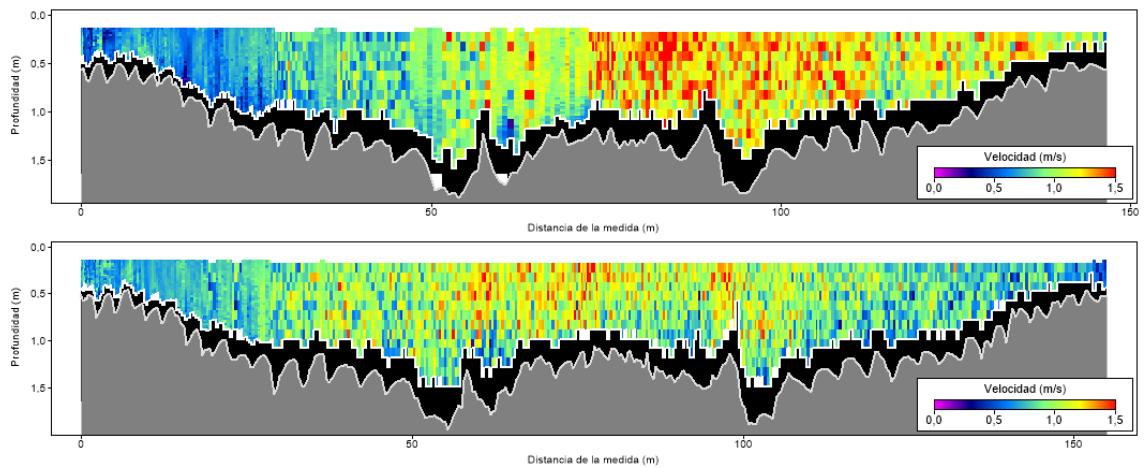


Figura 64.- Mediciones dinámicas realizadas la campaña del 05/09/2016, $Q=24,90 \text{ m}^3/\text{s}$

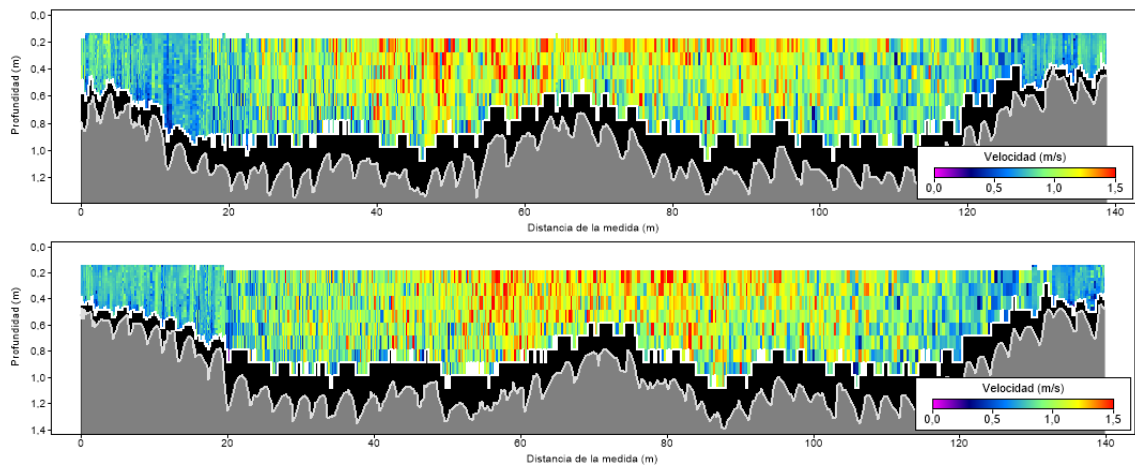


Figura 65.- Mediciones dinámicas realizadas la campaña del 07/11/2016, $Q=18,89 \text{ m}^3/\text{s}$

En la Tabla 19, Tabla 20, y Tabla 21 se presentan los resultados de aplicar el seguimiento de formas de fondo para las dunas de las mediciones dinámicas que se pudieron reconocer en perfiles consecutivos. Se puede ver que en un mismo perfil hay dunas de diferentes alturas y longitudes. Sin embargo, se encontró que en promedio en transporte de fondo calculado con esta metodología es comparable con el resultado de las mediciones estacionarias, en donde se evalúa una única duna. En la Tabla 22 se puede ver la diferencia porcentual entre uno y otro método.

Tabla 19.- Resultados de mediciones dinámicas con ADCP de la campaña del 16/03/2016

Campaña 16/03/2016 - $Q=113,85 \text{ m}^3/\text{s}$							
	Δx [m]	Δt [día]	u_d [m/día]	H_d [m]	L_d [m]	α Factor de Forma	q_b [kg/ms]
Duna 1	2,51	0,01	242,31	0,35	3,84	0,55	0,86
Duna 2	2,51	0,01	239,95	0,23	5,25	0,63	0,64
Duna 3	1,43	0,01	133,68	0,21	4,15	0,49	0,25
Duna 4	1,48	0,01	138,40	0,18	3,35	0,49	0,22
Duna 5	2,13	0,01	198,95	0,23	3,72	0,47	0,39
Duna 6	1,91	0,01	178,44	0,33	3,87	0,51	0,56
Duna 7	1,57	0,01	146,48	0,26	2,91	0,66	0,46
Duna 8	1,66	0,01	146,80	0,28	4,41	0,55	0,41
Duna 9	1,76	0,01	156,10	0,32	3,78	0,68	0,62
Duna 10	1,51	0,01	133,93	0,22	2,63	0,56	0,30
Duna 11	1,91	0,01	170,36	0,17	2,61	0,55	0,30
Duna 12	1,05	0,01	93,82	0,33	3,78	0,55	0,31
	q_b Promedio [kg/ms]						0,44

Tabla 20.- Resultados de mediciones dinámicas con ADCP de la campaña del 05/09/2016

Campaña 05/09/2016 - Q=24,90 m ³ /s							
	Δx [m]	Δt [día]	u_d [m/día]	H_d [m]	L_d [m]	α Factor de Forma	q_b [kg/ms]
Duna 1	0,46	0,02	21,10	0,20	3,61	0,56	0,04
Duna 2	0,69	0,02	32,09	0,08	3,16	0,45	0,02
Duna 3	0,62	0,02	28,75	0,14	2,94	0,62	0,04
Duna 4	0,53	0,02	24,72	0,19	4,13	0,59	0,05
Duna 5	0,81	0,02	37,76	0,30	3,81	0,56	0,12
Duna 6	0,74	0,02	34,58	0,23	4,28	0,63	0,09
Duna 7	0,81	0,02	37,58	0,20	4,16	0,62	0,08
q_b Promedio [kg/ms]							0,06

Tabla 21.- Resultados de mediciones dinámicas con ADCP de la campaña del 07/11/2016

Campaña 07/11/2016 - Q=18,89 m ³ /s							
	Δx [m]	Δt [día]	u_d [m/día]	H_d [m]	L_d [m]	α Factor de Forma	q_b [kg/ms]
Duna 1	0,91	0,02	39,41	0,18	2,65	0,55	0,07
Duna 2	1,19	0,02	51,49	0,24	4,62	0,66	0,15
Duna 3	1,30	0,02	56,05	0,11	2,47	0,69	0,08
Duna 4	1,35	0,02	57,96	0,14	1,74	0,62	0,10
Duna 5	1,30	0,02	55,88	0,15	2,53	0,64	0,10
Duna 6	1,37	0,02	59,18	0,15	1,81	0,66	0,11
Duna 7	0,94	0,02	40,59	0,26	2,29	0,62	0,12
Duna 8	1,30	0,02	55,96	0,29	3,14	0,48	0,15
Duna 9	1,66	0,02	71,53	0,29	2,85	0,36	0,14
Duna 10	1,49	0,02	64,11	0,15	2,32	0,58	0,10
Duna 11	1,71	0,02	73,69	0,22	2,57	0,40	0,12
Duna 12	1,32	0,02	56,91	0,18	2,61	0,56	0,11
Duna 13	1,51	0,02	64,76	0,30	3,77	0,41	0,15
q_b Promedio [kg/ms]							0,11

Tabla 22.- Diferencia del transporte de fondo calculado con el método estacionario y el dinámico

Campaña	Q [m ³ /s]	$q_b^{(a)}$ [Kg/m,s] ESTACIONARIO	$q_b^{(b)}$ [Kg/m,s] DINÁMICO	Diferencia
16/03/2016	113,85	0,49	0,44	-10%
08/04/16	65,84	0,33	-	-
05/09/16	24,90	0,05	0,06	35%
07/11/16	18,89	0,11	0,11	4%

4.4.7 Contraste de resultados experimentales con fórmulas empíricas del transporte de fondo

Como se ha mencionado anteriormente se calculó el transporte de sedimento de fondo con diferentes expresiones empíricas, utilizando los datos de campañas de medición de caudal líquido. Se graficó también el transporte de fondo calculado con las mediciones estacionarias, para contrastar y ver qué expresión ajusta mejor a los valores observados en este río.

Considerado los resultados obtenidos con las mediciones estacionarias como el valor de referencia ($q_b^{(a)}$ en Tabla 22) (valor muy similar obtenido con dos metodologías diferentes), la expresión que más se acerca a estos puntos es la de Meyer Peter & Müller modificada por Wong & Parker (2003), aunque subestima el transporte para las condiciones del 7/11/2016, como se ve en la Figura 66. A continuación se resumen las ecuaciones mencionadas en el apartado 2.3 de esta tesis.

Tabla 23.- Resumen de las ecuaciones empíricas de transporte de fondo

Autor/es	Expresión del transporte de sedimento de fondo (q_b)	Otras expresiones
a) Meyer-Peter y Müller (1948)	$q_b = \phi \gamma_s \sqrt{g \Delta d_{50}^3}$	$\phi = 8 (\bar{\tau}' - 0,047)^{3/2}$
b) Wong y Parker (2006)	$q_b = \phi \gamma_s \sqrt{g \Delta d_{50}^3}$	$\phi = 4,93 (\bar{\tau}' - 0,047)^{1,6}$
c) Ashida y Michue (1972)	$q_b = \phi \gamma_s \sqrt{g \Delta d_{50}^3}$	$\phi = 17(\bar{\tau}' - 0,05) (\sqrt{\bar{\tau}'} - \sqrt{0,05})$
d) Du Boys y Straub (1879, 1935)	$q_b = \frac{0,01003}{d_{50}^{3/4}} \tau_o (\tau_o - \tau_c)$	$\tau_c = 41,8 d_{50}^{0,82} - 0,017 \ln(454 d_{50})$
e) Einstein y Brown (1950)	$q_b = \phi \gamma_s \sqrt{g \Delta (d_{50})^3}$	$\psi = \frac{1}{\tau_*}$ <p>Si $5,5 < \psi < 22$ $0,465 \phi' = e^{-0,391 \psi}$</p> <p>Si $\psi < 5,5$ $\phi' = 40 \left(\frac{1}{\psi}\right)^3$</p> $\phi' = \frac{\phi}{F_1}$ $F_1 = \left(\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{g\Delta D^3}\right)^{0,5} - \left(\frac{36v^2}{g\Delta D}\right)^{0,5}$

$$D_* = d_{50} \left(\frac{\Delta g}{\nu^2} \right)^{1/3}$$

$$T = \frac{(u_*')^2 - (u_{*crit})^2}{(u_{*crit})^2}$$

$$q_b = 0,053 (\Delta g)^{0,5} d_{50}^{1,5} D_*^{-0,3} T^{2,1}$$

$$u_*' = \frac{\sqrt{g}}{C'} \bar{u}$$

$$C' = 18 \log \left(\frac{12 h}{3 d_{90}} \right)$$

f) Van Rijn (1982)

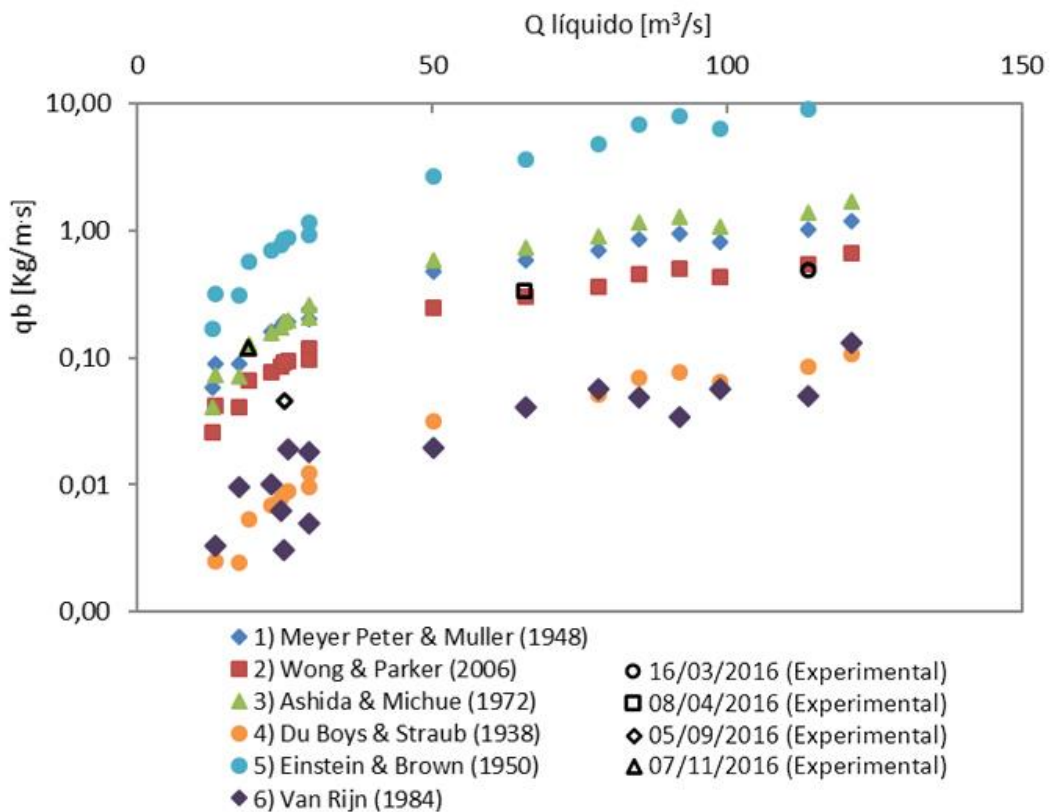


Figura 66.- Expresiones empíricas del transporte de sedimento de fondo aplicadas al Río Tercero (Ctalamochita)

Las diferencias porcentuales obtenidas del contraste con los resultados del método estacionario se pueden observar en la Tabla 24 y en la Tabla 25. Como se mencionó anteriormente, la fórmula de Wong & Parker (2006) es la que da menores diferencias para las primeras campañas, menores al 20%. Teniendo en cuenta que en el transporte de sedimentos los errores pueden ser de órdenes de magnitud, se considera esta expresión la más adecuada a este curso fluvial.

Tabla 24.- Diferencias porcentuales del transporte de fondo con expresiones empíricas (a)

Campaña	EST.		a) Meyer Peter & Muller (1948)		b) Wong & Parker (2006)		c) Ashida & Michue (1972)	
	Q [m ³ /s]	q _b [Kg/m,s]	q _b [Kg/m,s]	Dif.	q _b [Kg/m,s]	Dif.	q _b [Kg/m,s]	Dif.
23-10-16	13,18	0,03	0,09	249%	0,04	61%	0,07	185%
16-03-16	113,85	0,49	1,01	108%	0,55	13%	1,40	186%
08-04-16	65,84	0,33	0,58	76%	0,30	-8%	0,74	122%
05-09-16	24,90	0,05	0,19	211%	0,09	104%	0,19	322%
07-06-16	18,19	0,12	0,14	15%	0,07	-45%	0,13	7%
Promedio				154%		25%		165%

Tabla 25.- Diferencias porcentuales del transporte de fondo con expresiones empíricas (b)

Campaña	EST.		d) Du Boys & Straub (1935)		e) Einstein & Brown (1950)		f) Van Rijn (1984)	
	Q [m ³ /s]	q _b [Kg/m,s]	q _b [Kg/m,s]	Dif.	q _b [Kg/m,s]	Dif.	q _b [Kg/m,s]	Dif.
23-10-16	13,18	0,03	0,003	-90%	0,32	1127%	0,003	-87%
16-03-16	113,85	0,49	0,09	-82%	9,15	1778%	0,05	-90%
08-04-16	65,84	0,33	0,04	-88%	3,67	1007%	0,04	-88%
05-09-16	24,90	0,05	0,01	-81%	0,86	1790%	0,003	-93%
07-06-16	18,19	0,12	0,01	-96%	0,57	372%	0,001	-99%
Promedio				-87%		1317%		-92%

4.5 Discusión

El estudio del transporte de sedimentos de fondo fue el más desarrollado en esta tesis por el tipo de río que se estudia, en el que prevalece este tipo de transporte frente al de suspensión. En esta tesis se realizó una primera campaña en la que se tomaron muestras del material de fondo y se utilizaron los muestreadores convencionales de sedimentos, tanto de fondo como de suspensión. Por medio de esta actividad se reconocieron las problemáticas y limitaciones de estas técnicas, apareciendo la necesidad de una metodología alternativa.

Respecto al material de fondo, a través de las muestras tomadas se pudo caracterizar el material del lecho, obteniendo como resultado una curva granulométrica promedio de la sección. Con el diámetro característico definido a partir de esta curva, y con los datos observados durante campañas de medición realizadas se utilizaron diagramas de predicción de formas de fondo para identificar el tipo. Los diagramas aplicados fueron el de Boguchawl & Southard, adaptado por Ashley (1990), el de Chabert

& Chauvin (1963) y el de Shields-Parker modificado por García (2000). En los tres casos los puntos evaluados cayeron en la zona correspondiente a dunas, como se pudo observar en las Figura 46, Figura 47 y Figura 48, lo que efectivamente se midió en las campañas.

Para la medición de transporte de fondo con la técnica convencional, la principal dificultad radicó en la presencia de formas de fondo, ya que según la ubicación de la trampa respecto a la duna (valle o cresta) el sedimento recolectado era diferente. En este caso las mediciones fueron por vadeo, lo que permitía cierto reconocimiento del fondo por parte del usuario y reconocer las formas de fondo, pero, si se hace desde la superficie (un puente, por ejemplo), es difícil controlar la posición de la trampa. Además, otra de las dificultades fue no saber cómo se ubica la trampa respecto al fondo, si cae apoyada paralela al fondo o si una parte está enterrada. Estos factores tienen gran influencia en los resultados de la tasa de transporte, por ende los errores pueden ser importantes y por eso los valores obtenidos deben ser considerados que dan una idea del orden de magnitud.

La aplicación del método del lazo (Loop Method) para estimar el transporte de sedimento de fondo si bien tiene sus limitaciones, sirvió para reconocer la presencia (o no) de transporte de fondo, y saber la velocidad promedio con que se transportan las partículas de fondo. Entre sus limitaciones se pueden nombrar la pérdida del sistema de referenciación de fondo (Bottom Track) para profundidades mayores a 1,5m (situación observada en dos campañas y se presume que es por la alta velocidad de los sedimentos del fondo y por la escala del tamaño de la forma de fondo comparado con la escala de promediación del ADCP), y la necesidad de volver a un mismo punto, tarea difícil cuando el caudal y la velocidad del flujo son grandes. Sin embargo, teniendo en cuenta que este es un método originalmente creado para la corrección del caudal por transporte de sedimentos, cabe reconocer su potencialidad para estimar el transporte de fondo, una vez que se avance en estudio del espesor de la capa activa para el caso del Río Tercero (Ctalamochita).

Ante los inconvenientes del uso de la trampa Helley Smith se aplicaron dos metodologías de medición del transporte de fondo con ADCP: método volumétrico (con

mediciones estacionarias) y seguimiento de dunas (con mediciones dinámicas). Estos métodos resultaron de implementación rápida y sencilla, no necesitaron la intrusión de un operario el agua, y más seguros, y además e permitir encontrar el caudal sólido transportado en el fondo permitieron el estudio de los perfiles de velocidad sobre las formas de fondo.

Las mediciones estacionarias realizadas sobre las dunas fueron posibles por el tipo de ADCP que se dispone (para aguas poco profundas) y por las características de las formas de fondo del río, lo que permitió medir el desplazamiento completo de una duna, obteniendo así la batimetría y los perfiles de velocidades, lo cual no se ha realizado hasta el momento en un curso fluvial natural. Para realizarlo en el río Paraná, por ejemplo, se requerirían semanas de medición continuas, ya que las dunas de este río tienen una velocidad de desplazamiento baja. Esta metodología empleada, además de posibilitar la caracterización de las formas de fondo de un río de la Provincia de Córdoba y la estimación del transporte de fondo, permitirá en trabajos futuros avanzar en el conocimiento de la influencia de las formas de fondo en el perfil de velocidades del flujo, pudiendo estimar una rugosidad característica de las formas de fondo.

A través de las mediciones dinámicas se logró también una caracterización de un conjunto de formas de fondo, pudiendo establecer la altura, longitud, velocidad, y factor de forma de duna predominante para cada condición hidráulica. También se estimó una carga de fondo q_b promedio (aplicando el método de seguimiento de dunas) el cual resultó en una diferencia menor al 40% con el caudal sólido estimado con el método volumétrico (mediciones estacionarias), lo que validó la aplicación de esta técnica para el Río Tercero (Ctalamochita) cuando no es posible realizar una medición estacionaria de una duna completa.

Finalmente se aplicaron seis ecuaciones empíricas del transporte de fondo con los parámetros hidráulicos relevados durante las campañas de medición de caudal en la sección, para comparar con los resultados del método volumétrico y evaluar la expresión que mejor ajusta este río. Como resultado se obtuvo que el que mejor ajusta es la ecuación de Meyer-Peter & Müller modificada por Wong & Parker, ya que dio las

menores diferencias entre el caudal sólido calculado y el medido con la metodología acústica, con una diferencia promedio (considerando el valor absoluto) del 43%.

En resumen, este trabajo resultó importante porque se implementaron dos metodologías de medición del transporte de sedimentos en ríos de lecho arenoso con un instrumento acústico utilizado comúnmente para la medición de caudal líquido, que permitió obtener una relación caudal líquido-transporte de fondo con una alta correlación (mayor a 0,9) que se grafica en la Figura 67. Esto resulta de suma importancia para la actividad ingenieril, conocer la cantidad de sedimentos que se transporta por el fondo para los estudios fluviales necesarios para obras sobre el cauce, como por ejemplo para el proyecto de puentes, y para conocer la cota mínima de fundación requerida para las pilas del puente.

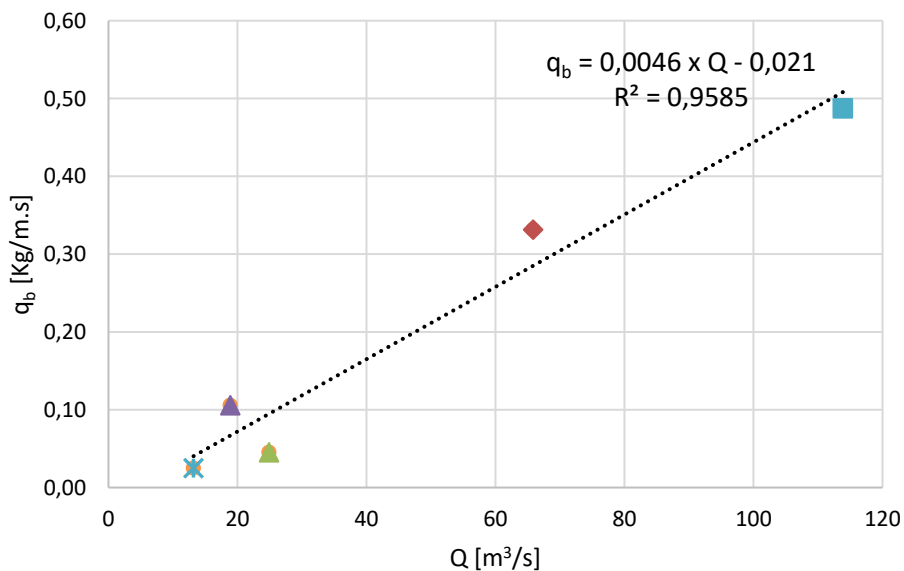


Figura 67.- Evolución del transporte de sedimento de fondo con el caudal líquido

Capítulo V: HIDRODINÁMICA DEL FLUJO SOBRE LAS FORMAS DE FONDO

*Caracterización del Transporte de Sedimentos en un tramo del Río Tercero (Ctalamochita)
utilizando Tecnología Acústica Doppler*

HEREDIA LIGORRIA, ANA INÉS

5.1 Introducción

En este capítulo se estudia la hidrodinámica del flujo sobre las formas de fondo. En primer lugar se presentan dos métodos de estimación de la rugosidad efectiva k_s en cursos fluviales con formas de fondo: el de Van Rijn y el ajuste de la función logarítmica a los perfiles de velocidad. A continuación se muestran los resultados obtenidos en el Río Tercero (Ctalamochita) en las campañas realizadas, junto con el cálculo del coeficiente n de Manning según cada caso. Finalmente se comparan los coeficientes de Manning calculados con ambos métodos, uno promedio y otro particular según la ubicación en la forma de fondo (valle, lomo, cresta).

5.2 Resistencia del flujo en cursos fluviales con formas de fondo

La presencia de formas de fondo afecta a la resistencia del flujo, y por lo tanto al transporte de sedimentos en el cauce. En la mayoría de los casos de interés las dos principales fuentes de tensión de corte efectiva τ_b son la fricción de piel o de grano, que se asocia a la tensión de corte local y el arrastre de forma, que está asociado a la presión, Esto se puede expresar como la ecuación 44.

$$\tau_b \cong \tau_{b \text{ grano}} + \tau_{b \text{ forma}} \quad [44]$$

Donde τ_{bs} es la componente de la tensión de corte debido a la rugosidad de piel y τ_{bf} la componente debido a la rugosidad por forma de fondo. Si bien la rugosidad de forma es excluida para calcular el transporte de sedimentos, esto no implica que no sea importante, frecuentemente es la fuente dominante de rugosidad y juega un papel importante en la determinación de la profundidad del flujo (Brownlie, 1983) que luego afecta a las curvas de altura-caudal.

Actualmente existen varios criterios de cálculo de la resistencia al escurrimiento en lechos aluvionales con la posibilidad de ocurrencia de formas de fondo. Consisten en general en la aplicación de procesos iterativos, relativamente trabajosos, que exigen el conocimiento de las características de escurrimiento. Entre ellos se pueden nombrar Einstein & Barbarossa (1952), Engleund (1966), Simons & Richardson (1966), Brownlie

(1983), y Van Rijn (1984). También se puede calcular la altura de rugosidad efectiva k_s a partir del perfil logarítmico de velocidades.

5.2.1 Método de cálculo de la rugosidad equivalente con el método de Van Rijn

Uno de los métodos de cálculo existentes para calcular la rugosidad equivalente de las formas de fondo es el de Van Rijn (1984). Este autor asume que la rugosidad hidráulica de un río con fondo móvil presenta la contribución de la rugosidad de grano $k_{s\text{ grano}}$ y la rugosidad de forma $k_{s\text{ forma}}$. Van Rijn determinó a partir de numerosos datos de campo que la rugosidad de grano está dada por la ecuación 45.

$$k_{s\text{ grano}} = 3 D_{90} \quad [45]$$

Donde

$k_{s\text{ grano}}$: rugosidad hidráulica del grano

D_{90} : tamaño del sedimento para el cual el 90% del material del lecho es más fino.

Para la rugosidad de forma, también basado en datos de laboratorio y de campo, determinó una expresión del $k_{s\text{ forma}}$ en función de ψ , dada por la ecuación 46.

$$k_{s\text{ forma}} = 1,1 \Delta (1 - e^{-25\psi}) \quad [46]$$

Donde

$k_{s\text{ forma}}$: rugosidad hidráulica de forma

$\psi = \Delta/\Lambda$

Δ : altura de la forma de fondo

Λ : longitud de forma de fondo

La resolución obtenida con la ecuación 56 así como las mediciones de campo se muestra en la Figura 68. Teniendo en cuenta tanto la rugosidad de grano como la de piel, propuso el cálculo de una rugosidad efectiva k_s de un fondo móvil con formas de fondo mediante la ecuación 47, que se muestra a continuación.

$$k_s = 3 D_{90} + 1,1 \Delta (1 - e^{-25\psi}) \quad [47]$$

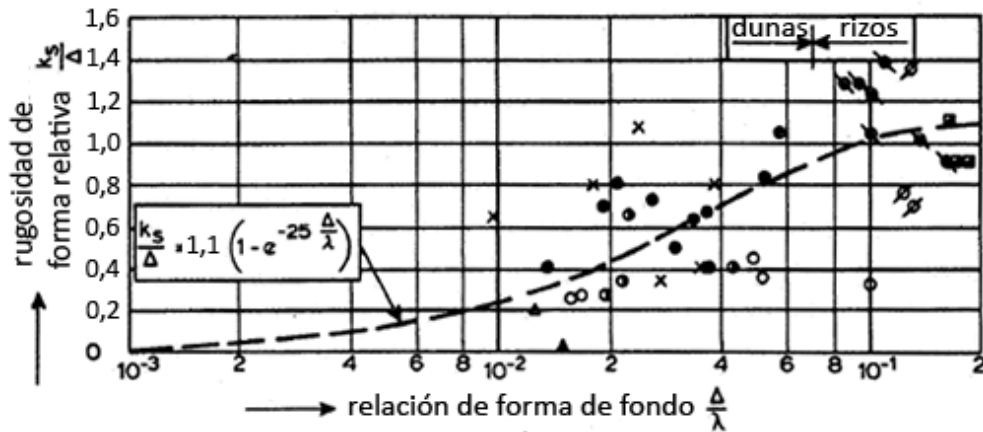


Figura 68.- Rugosidad equivalente de formas de fondo, Van Rijn (1984)

Los datos de entrada para aplicar este método son la velocidad media del flujo, la profundidad media (h), el ancho del río (b), los diámetros del material de fondo (D_{50} y D_{90}), la densidad del fluido y del sedimento (ρ_{fluido} y $\rho_{sedimento}$), la viscosidad cinemática del fluido (ν) y la altura (Δ) y longitud de duna (λ). Finalmente, para obtener el coeficiente de Manning utilizado para caracterizar la resistencia del lecho al flujo se aplicó la ecuación 48, relación comúnmente llamada de Manning Strickler (Brownlie, 1983).

$$n = \frac{k_s^{1/6}}{8,1 g^{1/2}} \quad [48]$$

5.2.2 Método de cálculo de la rugosidad efectiva con perfiles de velocidad sobre la forma de fondo

Otro de los métodos utilizado para determinar la altura de rugosidad efectiva k_s es el análisis de los perfiles de velocidad medidos durante las mediciones estacionarias. A partir de las mediciones con ADCP estacionarias sobre las dunas móviles se calcularon los perfiles de velocidad promedio sobre distintas partes de las formas de fondo: valle, cresta y lomo. Dado que el ADCP mide un perfil de velocidad por segundo y que cada uno de estos es afectado por la turbulencia del flujo, fue necesario promediar varios segundos para obtener el perfil medio de velocidad en diferentes sectores de la duna.

Una vez obtenidos estos perfiles de velocidad medios en cada sector se procedió a ajustar perfiles logarítmicos (ecuación 49) con el objetivo de obtener los parámetros de velocidad de corte u^* y rugosidad de Nikuradse k_s y con ellos determinar el valor del

coeficiente n de Manning mediante la ecuación 48 Se utilizaron aquellos datos que mejor ajustaban a esta función.

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{K} \ln\left(\frac{z}{k_s}\right) + 8,5 \quad [49]$$

Donde u es la velocidad del flujo, u^* la velocidad de corte, z la cota respecto del fondo del río, k_s el coeficiente de rugosidad de Nikuradse y K es la constante de Von Karman, adoptando un valor de 0,41.

5.3 Resultados

5.3.1 Resultado de la rugosidad equivalente con el método de Van Rijn

En la Tabla 26 se presentan los resultados de la aplicación del método de Van Rijn enunciado en el apartado 5.2.1. Si sólo se tiene en cuenta la rugosidad de grano, el coeficiente n de Manning es 0,019. Incluyendo la rugosidad provocada por las formas de fondo, alcanza un valor promedio de 0,033, es decir se incrementa en un 40%. Además, se puede ver que los valores del n de Manning están dentro del rango para este tipo de río, entre 0,02 y 0,04, recomendados por la bibliografía (Chow, 1994). La variación para los distintos caudales es menor al 10%, comparando el valor del coeficiente de cada campaña con el resultado del promedio calculado con las cuatro campañas.

Tabla 26.- Resultados del cálculo de la rugosidad equivalente con formas de fondo

Campaña	Q [m3/s]	ψ	k_s grano	n_{grano}	k_s forma	$k_{\text{grano y forma}}$	$n_{\text{grano + forma}}$	Diferencia
16/03/2016	113,85	0,09	0,013	0,019	0,394	0,407	0,034	-5%
08/04/2016	65,84	0,08	0,013	0,019	0,462	0,476	0,035	-7%
05/09/2016	24,90	0,09	0,013	0,019	0,157	0,17	0,029	9%
07/11/2016	18,89	0,12	0,013	0,019	0,252	0,265	0,032	3%

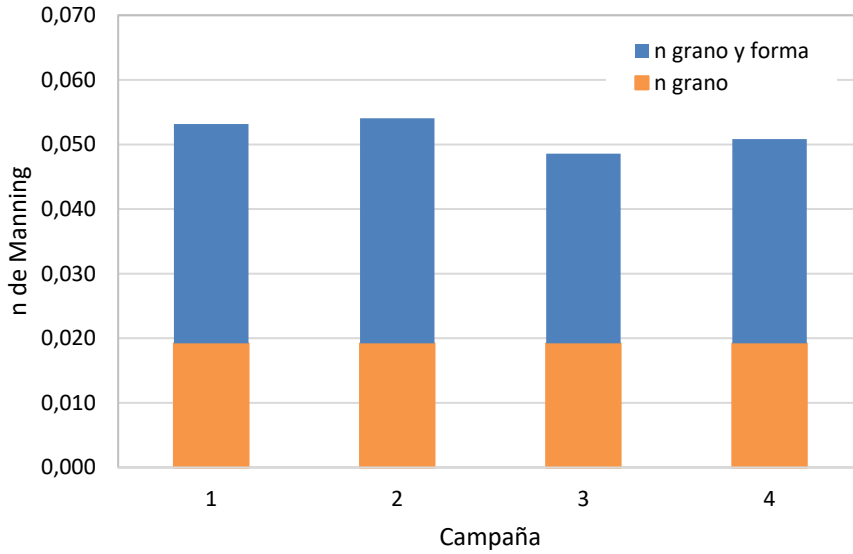


Figura 69.- Contribución de la rugosidad k_s de grano y el de forma

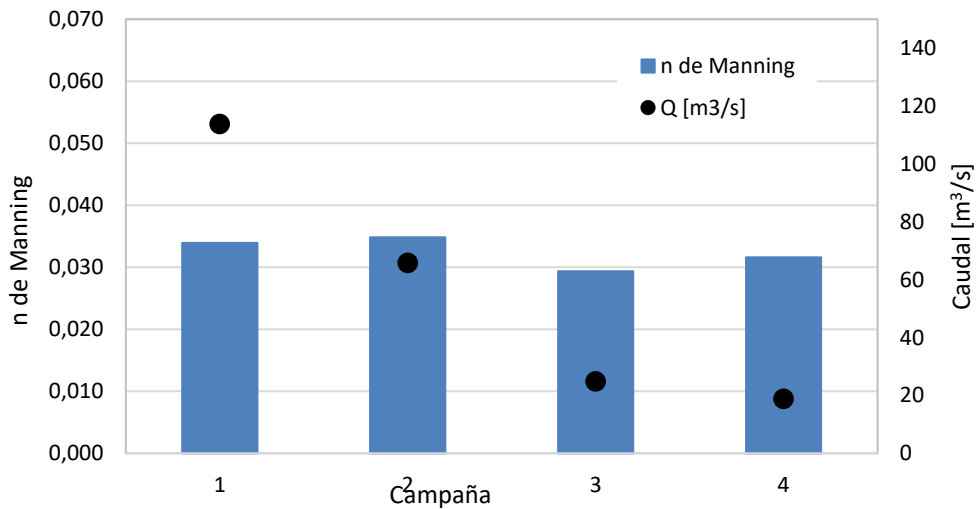


Figura 70.-Evolución del coeficiente n de Manning con el caudal líquido

En la Figura 69 se grafica la contribución relativa de la rugosidad de grano y de forma de fondo al coeficiente n de Manning total. Dado que se consideró el mismo tamaño característico de sedimento para todas las condiciones, la contribución de la rugosidad de piel resulta igual para todos los casos, y se puede ver claramente que son las formas de fondo las que contribuyen principalmente al $k_{s\ total}$, con un aporte superior al 35% en todos los casos. En la Figura 70 se puede ver cómo cambia el n de Manning para los diferentes caudales. No se observa una relación directa entre estos dos valores, es decir que al aumentar el caudal no aumenta necesariamente la rugosidad de Manning proporcionalmente. Teniendo en cuenta lo expresado anteriormente, se puede decir

que la rugosidad estará en función de las características de las dunas, es decir, su relación altura/longitud (ψ), ya que por ejemplo, para la campaña 4, si bien el caudal es el más bajo da una rugosidad mayor, y esto es por el valor de ψ .

5.3.2 Resultado de la rugosidad efectiva con perfiles de velocidad

A partir de las mediciones con ADCP estacionarias sobre las dunas móviles se calcularon los perfiles de velocidad promedio sobre distintas partes de las formas de fondo: valle, cresta y lomo. Esto se puede observar en la Figura 71, Figura 72, Figura 73, y Figura 74 (considerar que los perfiles de velocidad están en diferente escala horizontal).

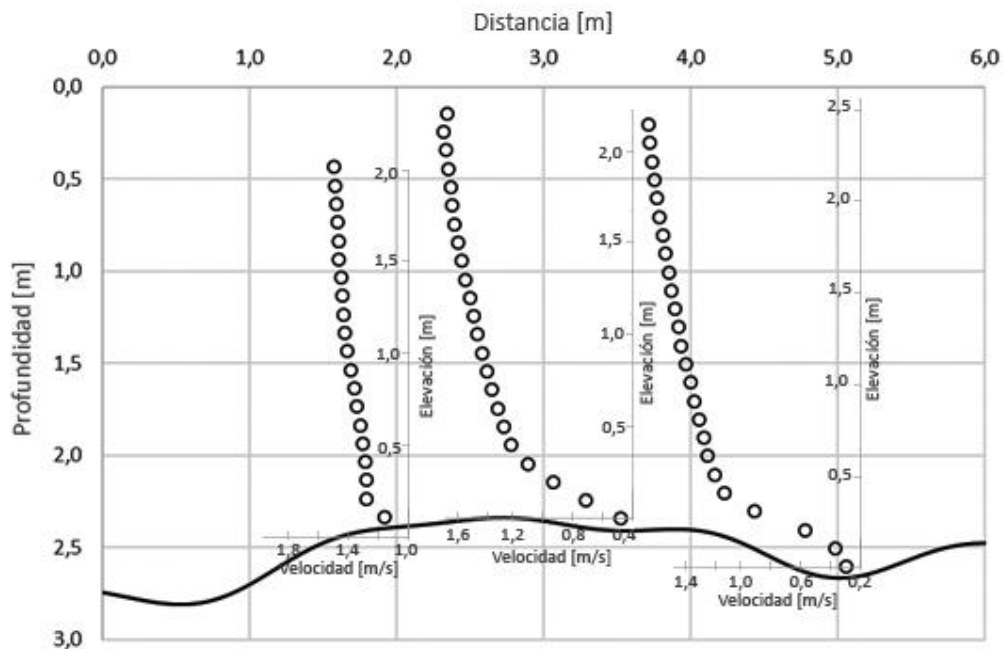


Figura 71.- Perfil de velocidades en cresta, lomo y valle para la duna del 16/03/2016, $Q=113,85 \text{ m}^3/\text{s}$

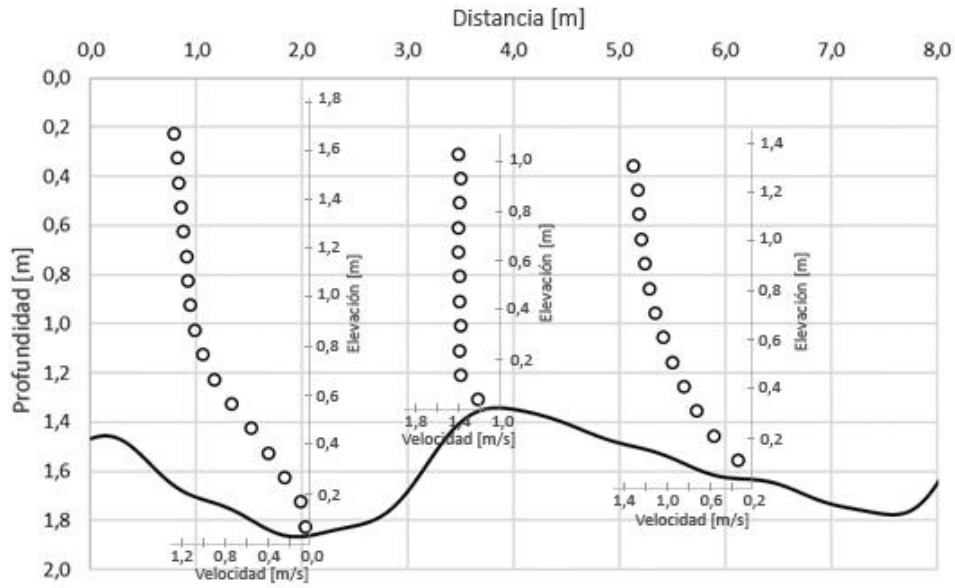


Figura 72.- Perfil de velocidades en cresta, lomo y valle para la duna del 08/04/2016, $Q=65,84 \text{ m}^3/\text{s}$

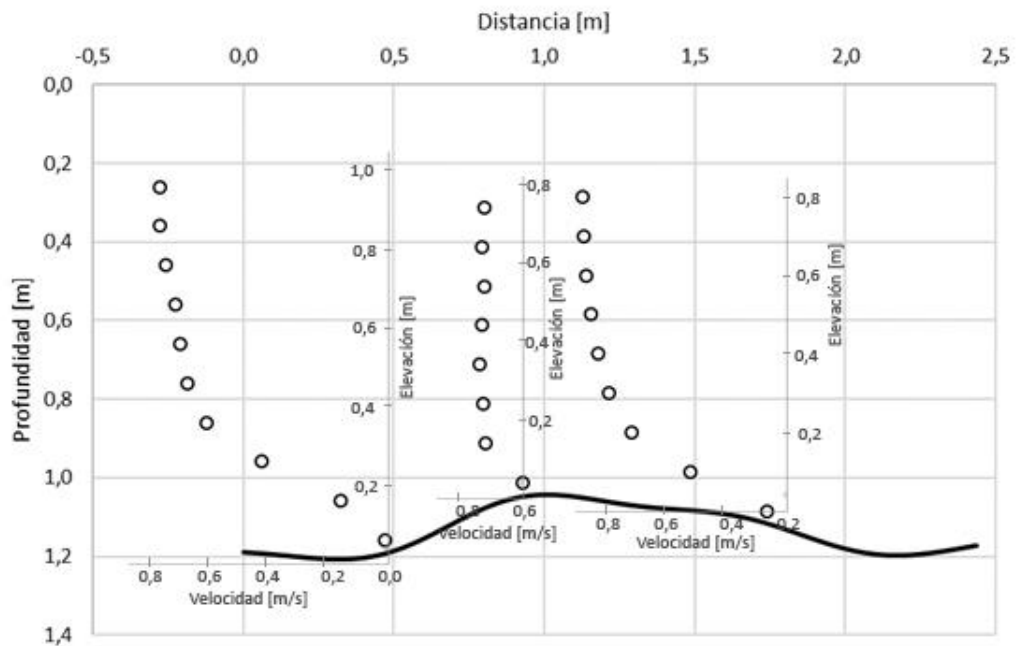


Figura 73.- Perfil de velocidades en cresta, lomo y valle para la duna del 05/09/2016, $Q=24,90 \text{ m}^3/\text{s}$

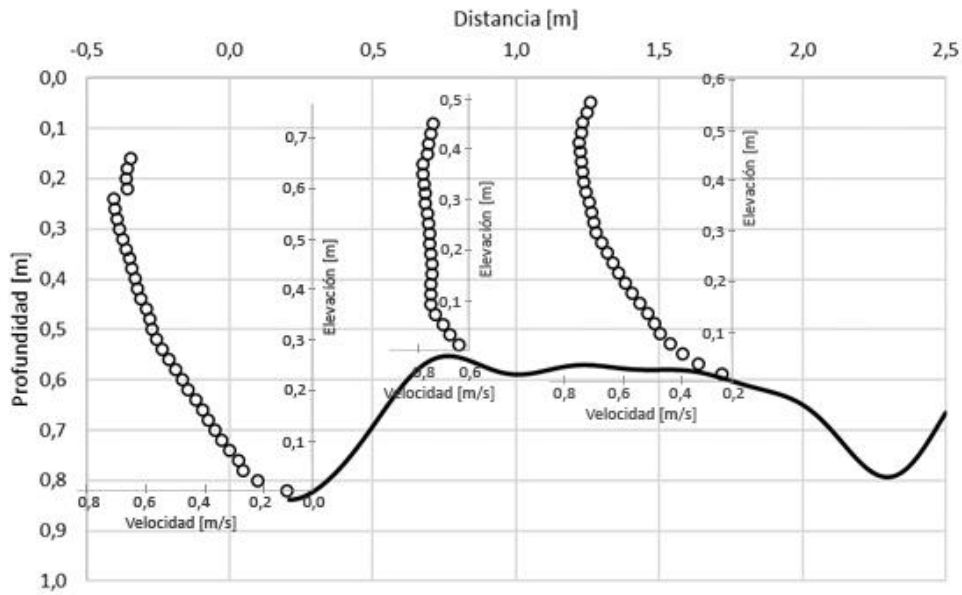


Figura 74.- Perfil de velocidades en cresta, lomo y valle para la duna del 07/11/2016, $Q=18,89 \text{ m}^3/\text{s}$

Despejando de la ecuación 58 y considerando aquellos datos que mejor ajustaban a la función logarítmica se calculó k_s como la ordenada al origen de la nueva función en un gráfico semilogarítmico. Esto se desarrolló para cada duna en la Figura 75, Figura 76, Figura 77, y Figura 78.

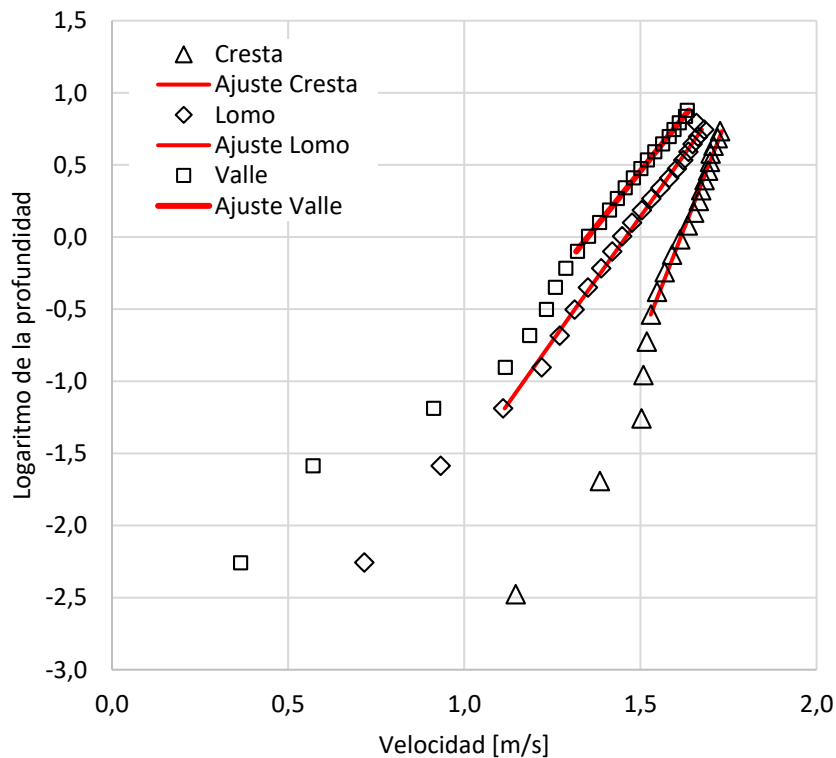


Figura 75.- Ajuste de la función logarítmica al perfil de velocidades en cresta, lomo y valle para la duna del 16/03/2016, $Q=113,85 \text{ m}^3/\text{s}$

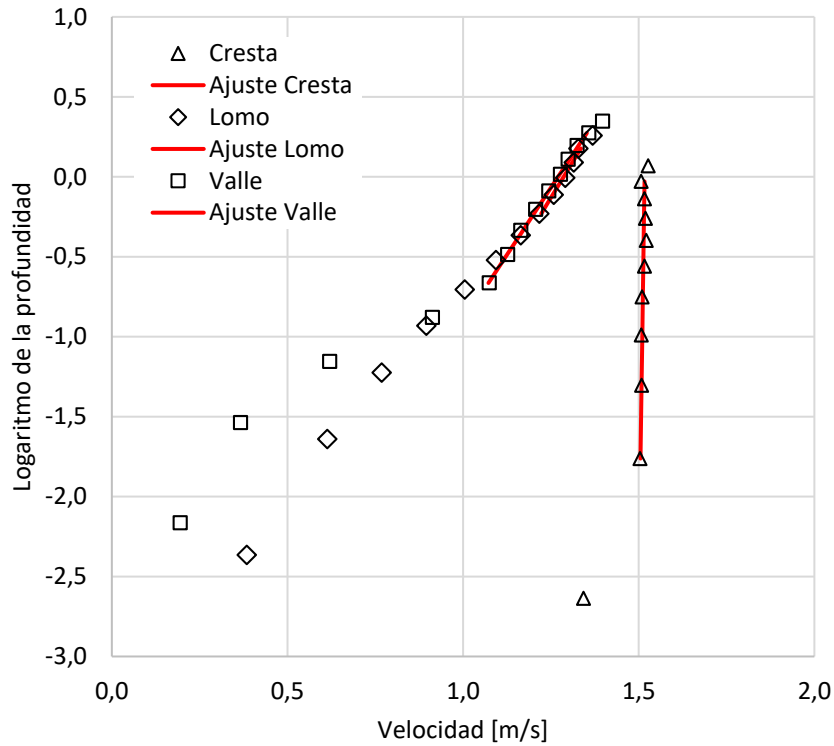


Figura 76.- Ajuste de la función logarítmica al perfil de velocidades en cresta, lomo y valle para la duna del 08/04/2016, $Q=65,84 \text{ m}^3/\text{s}$

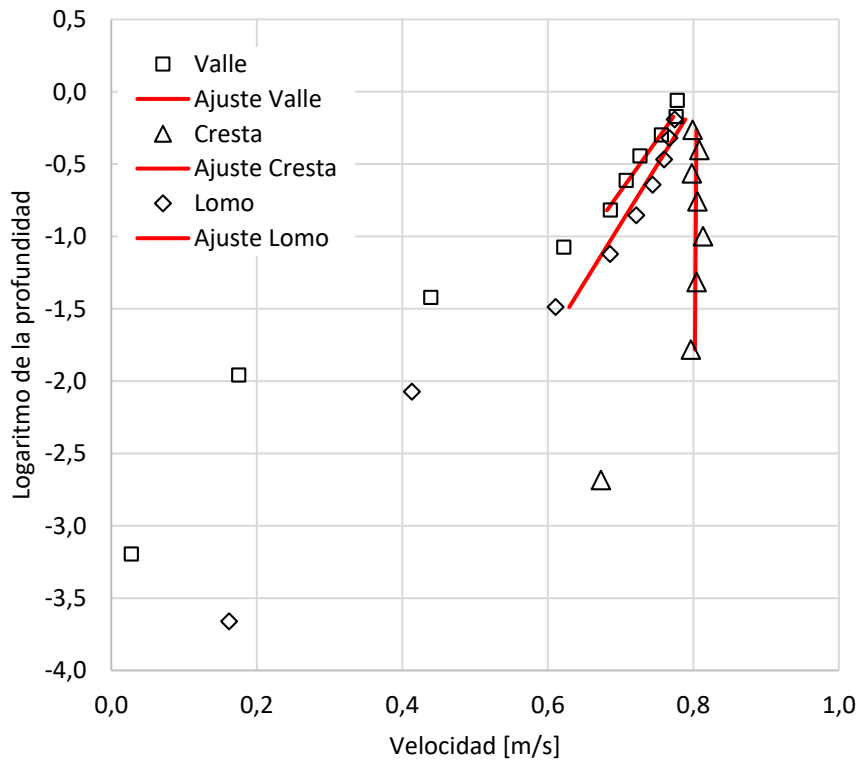


Figura 77.- Ajuste de la función logarítmica al perfil de velocidades en cresta, lomo y valle para la duna del 05/09/2016, $Q=24,90 \text{ m}^3/\text{s}$

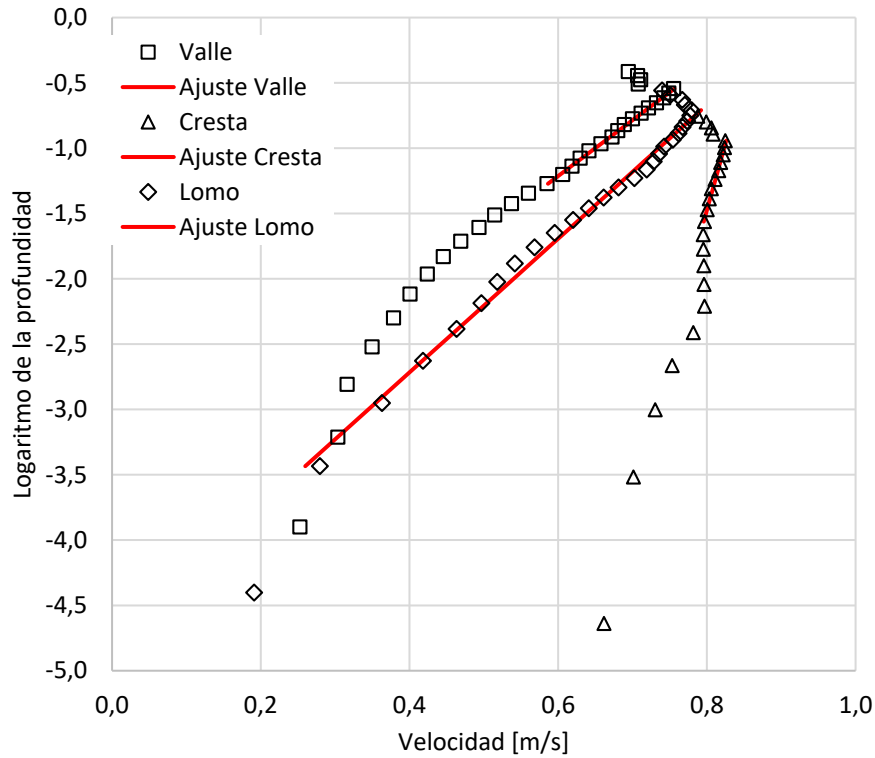


Figura 78.- Ajuste de la función logarítmica al perfil de velocidades en cresta, lomo y valle para la duna del 07/11/2016, $Q=18,89 \text{ m}^3/\text{s}$

En la Tabla 27 se pueden ver los valores de la rugosidad calculado con el ajuste de los perfiles de velocidad para cada campaña y a su vez en cada sector de la duna. Para todas las mediciones realizadas, en la cresta de la duna el perfil se hace más vertical (velocidad en el eje de las abscisas y la profundidad en el eje de ordenadas), y la rugosidad resulta muy cercana a cero. También se calculó el coeficiente de Manning, con la ecuación 48.

Tabla 27.- n de Manning calculado con los perfiles de velocidad sobre dunas

Campaña	Ubicación	k_s [m]	n de Manning
1) 16/03/2016	Cresta	0,001	0,013*
	Lomo	0,212	0,031
	Valle	0,523	0,036
2) 08/04/2016	Valle	0,473	0,035
	Cresta	0,000*	0,000*
	Lomo	0,314	0,033
3) 05/09/2016	Valle	0,116	0,028
	Cresta	0,000*	0,000*
	Lomo	0,044	0,024
4) 07/11/2016	Valle	0,745	0,038

Cresta	0,000	0,004*
Lomo	0,278	0,032

* Ajuste no válido

Finalmente se comparó el n de Manning calculado con el perfil de velocidades con el calculado con el método de Van Rijn. Para la cresta, las diferencias porcentuales fueron mayores al 60%, mientras que para el valle se dieron las mínimas diferencias, menores al 10%, como puede observarse en la Tabla 28. Se puede observar que excepto en la cresta, el n de Manning calculado sobre el lomo y el valle de la duna dan valores próximos a los calculados con el método de Van Rijn.

Tabla 28.- Comparación del n de Manning calculado con el perfil de velocidades y con el método de Van Rijn

Campaña	Ubicación	n de Manning con perfil de velocidades	n de Manning con el método de Van Rijn	Diferencia
1) 16/03/2016	Cresta	0,013*		-61%
	Lomo	0,031	0,034	-9%
	Valle	0,036		6%
2) 08/04/2016	Valle	0,035		1%
	Cresta	0,000*	0,035	-103%
	Lomo	0,033		-6%
3) 05/09/2016	Valle	0,028		-4%
	Cresta	0,000*	0,029	-87%
	Lomo	0,024		-17%
4) 07/11/2016	Valle	0,038		19%
	Cresta	0,004*	0,032	-82%
	Lomo	0,032		2%

* Ajuste no válido

5.4 Discusión

El perfilador acústico Doppler utilizado en este trabajo en forma estacionaria permitió caracterizar la hidrodinámica del flujo y las formas de fondo de una manera sencilla, rápida y con buena resolución temporal de los datos. Al dejar fijo el instrumento durante el tiempo suficiente para que pase una duna se pudo observar la variación del campo de velocidades en diferentes sectores de la forma de fondo, permitiendo relevar algunas características físicas de la misma como la longitud y altura, datos requeridos

en las ecuaciones empíricas, obtenidas con el ADCP de una forma rápida y poco riesgosa para el operador. Con respecto a los valores de la altura de rugosidad de Nikuradse k_s y el coeficiente n de Manning, los resultados obtenidos son similares a los valores obtenidos con la ecuación de Van Rijn, sumado a que dichos valores son razonables para un río de las características estudiadas.

Capítulo VI: CONCLUSIONES

*Caracterización del Transporte de Sedimentos en un tramo del Río Tercero (Ctalamochita)
utilizando Tecnología Acústica Doppler*

HEREDIA LIGORRIA, ANA INÉS

6.1 Conclusiones

A continuación se resumen las principales conclusiones alcanzadas en esta tesis. Las mismas se agrupan en tres partes, la primera correspondiente a los desarrollos realizados para estimar transporte de sedimentos en suspensión, la segunda sobre el transporte de fondo y por último la caracterización hidrodinámica del flujo sobre formas de fondo.

6.2 Conclusiones sobre las actividades relacionadas al transporte de sedimentos en suspensión

Respecto al transporte de sedimentos en suspensión, en esta tesis se realizaron dos trabajos: la calibración, y la validación en campo. Para la primera etapa se desarrollaron un conjunto de 11 ensayos de laboratorio con más de 200 mediciones con instrumentos hidroacústicos (ADV y ADCP), con diferentes tipos de sedimentos y concentraciones que permitieron evaluar la sensibilidad de estos instrumentos ante la variación de esos factores. Para la validación en campo se calcularon concentraciones con los datos de las mediciones realizadas con el ADCP en la sección de estudio y se compararon con las concentraciones medidas por el personal del área de Calidad y Preservación del Recurso de la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba.

Mediante los ensayos de laboratorio se lograron buenos resultados experimentales con el Micro ADV YSI SonTek, obteniendo relaciones logarítmicas entre la amplitud y el SNR con la concentración de sedimentos en suspensión, con una pendiente promedio de 0,10 para el SNR y 0,045 para la amplitud, lo que se condice con la teoría de la llamada ecuación del sonar. Además se observó una baja variación de los resultados respecto al tipo y tamaño de sedimento, lo que permitiría su aplicación cuando se desconocen estas características, Con el ADCP YSI SonTek S5 se observó una importante variación respecto al tipo y tamaño de sedimento, con gran sensibilidad a las bajas concentraciones. Aun así se establecieron expresiones, también logarítmicas, que permiten obtener la concentración del sedimento a partir de los datos del SNR de cada medición. En relación con el tamaño de sedimentos, se pudo ver a través de los

resultados que detecta mejor los sedimentos de tamaño superior a 0,074mm, que corresponde a la abertura del tamiz 200. La comparación entre ambos instrumentos permitió vislumbrar la diferencia en su comportamiento, adjudicado principalmente a la frecuencia acústica utilizada, ya que según ésta es el tamaño de las partículas capaz de reconocer.

Luego de la calibración en laboratorio, bajo condiciones controladas, se procedió a la validación en campo. A través de datos de SNR registrados durante mediciones de caudal con el ADCP se logró calcular la concentración de sedimentos en suspensión con errores del orden de 50%, los cuales resultan comparables con los errores de las herramientas disponibles en la actualidad. Si bien este valor es alto, cuando se perfeccione esta técnica se lograría cubrir un área de vacancia en la temática abordada en esta tesis, que es la medición sistemática y continua del transporte de sedimentos en suspensión a través de mediciones de caudal, utilizando un instrumento acústico de mayor resolución espacial y temporal que los muestreadores convencionales.

6.3 Conclusiones sobre las actividades relacionadas a la cuantificación del transporte de sedimentos de fondo

En lo relativo al transporte de sedimentos de fondo en esta tesis se lograron avances sustanciales en un área de vacancia.

Como primera actividad se realizó una campaña de medición del transporte de sedimentos con métodos convencionales, en donde se utilizó una trampa tipo Helley-Smith para la carga de fondo. La experiencia mostró que su uso es dificultoso y peligroso, más en presencia de formas de fondo, lo que influye en los resultados, y finalmente en el cálculo del transporte de fondo, siendo necesario otros métodos alternativos para esto.

En las campañas posteriores se implementó el uso de ADCP, aplicando diferentes tipos de mediciones, como el método del lazo, mediciones estacionarias y mediciones dinámicas. El método del lazo demostró ser efectivo para reconocer el transporte de fondo, pero su principal dificultad radica en que es necesario conocer el espesor de la capa de sedimento que está en movimiento para luego calcular el transporte. Además,

su rango de aplicación con el ADCP empleado en el sistema fluvial se limita a profundidades menores a 2m.

La nueva metodología aplicada de las mediciones estacionarias sobre formas de fondo permitió estimar el transporte de sedimentos de fondo en forma precisa, fácil y segura, mediante un novedoso análisis euleriano de las dunas, en donde la altura de éstas es del orden de promediación del ADCP, que permite no sólo un análisis geométrico de la duna sino también el estudio de las velocidades sobre esta perturbación del fondo y cómo afecta al flujo medio. Además de la caracterización geométrica de las dunas también se calculó el transporte de fondo con las mediciones dinámicas y el método de seguimiento de dunas, obteniendo buenos resultados, con una diferencia menor al 35%, que incluyen varias formas de fondo no sólo una como es el caso de los estacionarios, lo que hace a los dinámicos un método alternativo cuando no se pueden realizar las mediciones estacionarias.

Finalmente se compararon los resultados del transporte de fondo obtenidos con las mediciones estacionarias con expresiones empíricas de diversos autores, llegando a la conclusión de que la ecuación que mejor ajusta al Río Tercero (Ctalamochita) es la de Meyer-Peter & Müller modificada por Wong y Parker, la cual dio las menores diferencias porcentuales.

6.4 Conclusiones en relación con las actividades de caracterización hidrodinámica del flujo sobre las formas de fondo

Como se mencionó anteriormente, el sedimento transportado en cauces aluviales es la “materia prima” con que la corriente modela el cauce fluvial de sus distintos tramos. Este paisaje es variado y dinámico y ejerce un gran impacto en las actividades socio-económicas tales como rutas de navegación fluvial, puertos, acueductos, asentamientos poblaciones y vías de comunicación linderas al cauce, entre otras.

La caracterización hidrodinámica del flujo sobre las formas de fondo en el Río Tercero (Ctalamochita) permitió conocer además del transporte de fondo, la influencia de las mismas sobre la rugosidad del cauce, resultando de suma importancia ya que la

presencia de dunas puede afectar significativamente la profundidad del flujo y consecuentemente la determinación del caudal a través de las curvas h-Q, o bien al coeficiente n de Manning utilizado comúnmente para el cálculo del caudal o para la calibración de modelos unidimensionales. Resultado de esto se encontró que este coeficiente varía según las características de las dunas, proporcional a la relación altura/longitud de duna, siendo más grande a medida que aumenta ψ . Además, a partir del estudio de los perfiles de velocidad sobre las dunas, se encontró que la altura de rugosidad efectiva k_s determinado con perfiles de velocidad varía según la ubicación respecto a la forma de fondo: valle, cresta o lomo, siendo representativo del flujo medio el correspondiente al valle.

6.5 Trabajos futuros

Se recomiendan trabajos futuros respecto a la cuantificación de sedimentos en suspensión, para mejorar las relaciones SNR-concentración obtenidas con el ADCP, evaluando la influencia de otros factores no analizados en esta tesis, como son la intensidad de la corriente eléctrica o la longitud del pulso acústico para disminuir el error de las concentraciones calculadas con ADCP. También se prevé la calibración de otro instrumento acústico de pronta adquisición como es el Flow Tracker, para estimar la concentración de sedimentos en suspensión en cursos fluviales en condiciones de bajo tirante (estiaje).

Respecto a la cuantificación del transporte de fondo se sugiere realizar mediciones para otros caudales, de manera de completar la curva que relaciona el caudal líquido con el transporte de sedimento de fondo. Con esta herramienta será posible estimar el transporte de fondo cuando sólo se dispone de datos de caudal.

Otra actividad a futuro a desarrollarse en relación con las formas de fondo es el estudio y análisis de los perfiles de velocidad sobre las formas de fondo para evaluar la velocidad de corte u^* local, sobre diferentes partes de la duna, como es la cresta o el valle.

REFERENCIAS

*Caracterización del Transporte de Sedimentos en un tramo del Río Tercero (Ctalamochita)
utilizando Tecnología Acústica Doppler*

HEREDIA LIGORRIA, ANA INÉS

Referencias

- **Andreazzini, M. J.; Degiovanni, S.; Spalletti, P.; Irigoyen, M.** (2014). *“Producción de Sedimentos en una Cuenca de Sierras Pampeanas, Córdoba, Argentina: Estimación para distintos escenarios”*. Aqua-LAC, Vol. 6 – Nº1 – Marzo 2014, pp. 38-49.
- **Anderson, C. W.; Fisk, G. C.; Gartner, J. W.; Glysson, D. G.; Gooding, D. J.; Gray, J. R.; Hornewer, N. J.; Larsen, M. C.; Macy, J.P.; Rasmussen, P. P.; Wright, S. A.; Ziegler, A. C.** (2010). *“Sedimentology of Aqueous System”*. C. Poletto and S. Charleworth, eds., Wiley-Blackwell, Chapter 1, pp. 3-45
- **Ashida, K.; Michiue, M.** (1972). *“Study on hydraulic resistance and bed load transport rate in alluvial streams”*. Transactions Japan Society of Civil Engineering, 206, 59-69.
- **Ashley, G. M.** (1990). *“Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem”*. Journal of Sedimentary Petrology.
- **Balbis, A.; Miynol, S.; Castelló, E.; Vanoli, G.** (2007). *“Análisis multitemporal para la evaluación de erosión en el río Citalamochita (Tercero) en la localidad de Villa Ascasubi”*. Tercer Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Córdoba, Argentina.
- **Barton, J. S.; Gaskin, J.; Pittman, S. A.; Rennie, C.** (2010). *“Sedimentology of Aqueous System”*. C. Poletto y Charleworth, ed. Wiley-Blackwell, capítulo 2.
- **Basile P.A., Riccardi, G., Zimmerman E., Stenta E., Mangiamelli P. y Bussi P.** (2013). *“Aprovechamiento del Río Carcarañá-Tercero como Vía Fluvial Navegable Parte I: Diseño Del Sistema De Transporte y de la Vía Fluvial”*, Cuadernos del CURIHAM, Vol. 19, UNR Editora (en prensa).
- **Bertoni, J. C.; Reyna, T.; Menajovsky, S.** (2016). *“Hidráulica del transporte de sedimentos”*. Material de clase de la cátedra de Hidrología y Procesos Hidráulicos, carrera Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba.
- **Boguchwal, P.; Southard, J. B.** (1990). *“Bed configuration in steady unidirectional water flows. Part 3. Effects of temperature and gravity”*. Journal of Sedimentary Petrology.
- **Brownlie, W. R.** (1983). *“Flow Depth in sand-bed channels”*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 109(7), 959-990.
- **Cardoso A. H.** (1998). *“Hidráulica Fluvial”*. Serviço de Educação, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, Portugal.
- **Chabert, J.; Chauvin, J. L.** (1963). *“Formation des dunes et des rides dans les modèles fluviaux”*. Bulletin du Centre de Recherches et d’Essais de Chaton.
- **Chow, V. T.** (1994). *“Hidráulica de canales abiertos”*. Editorial Mc Graw-Hill.

- **Corral, M.; Baldissone, M.; Farias, H. D.; Rodríguez, A.; López, F.** (2009). *"Balance Sedimentológico Simplificado para el Río Cuarto, Córdoba"*. Cuarto Simposio sobre Hidráulica de Ríos, Salta, Argentina.
- **Cossavella, A. M.; Carranza, P.; Monarde, F.; Larrosa, N.; Roqué, M.; Nuño, C.; Hunziker, M. L.; Ferreyra, M.; Melián, J. et al.** (2003). *"Gestión de efluentes líquidos en la cuenca del Río Tercero (Ctalamochita)"*. XXIV Congreso Nacional del Agua 2013, San Juan, Argentina.
- **Degiovanni, S.; Villegas, M.; Ulla, J. P.** (2013). *"Análisis de la Carga de Fondo y Dinámica de Transporte en el Río Cuarto, provincia de Córdoba, como base para una Minería de áridos sustentable"*. Revista de la Asociación Geológica Argentina 70 (2): 238-248.
- **Deines, K. L.** (1999). "Backscatter estimation using Broadband acoustic Doppler current profiler". IEEE Sixth Working Conference.
- **Díaz Lozada, J. M.** (2014). *"Cuantificación y caracterización del escurrimiento superficial en el sistema fluvial del río Carcarañá"*. Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Mención en Recursos Hídricos, Universidad Nacional de Córdoba.
- **Dietrich, W. E.; Whiting, P. J.** (1989). *"Boundary shear stress and sediment transport in river meanders of sand and gravel"*
- **Du Boys, M. P.** (1879). *"Etudes du régime du Rhone et de l' action exercée par les eaux sur un lit à fond de graviers indéfiniment affouillable"*. Annales des Ponts et Chaussées, Serie 5, Vol. 18, pp. 141-195 (en francés).
- **Edwards, T. K.; Glysson, G. D.** (1999). *"Field methods for measurement of fluvial sediment"*. Technoques of Water-Resources Investigations of the U.S. Geological Survey, Book 3: Applications of Hydraulics. USGS.
- **Einstein, H. A.** (1950). *"The bedload function for bedload transportation in open channel flows"*. Technical Bulletin No. 1026, U.S.D.A. Soil Conservation Service.
- **Einstein, H. A.; Barbarossa, N. L.** (1952). *"River channel roughness"*. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 117, 1121-1146.
- **Engleund, F.** (1966). *"Hydraulic resistance of alluvial streams"*. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 92(2), 315-326.
- **Exner, F. M.** (1925). *"Über die Wechselwirkung zwischen Wasser und Geschiebe in Flüssen"*. Sitzber. Akad. Wiss Wien, parte IIa. Bd. 134 (en alemán).
- **Gaeuman, D.; Jacobson, R. R.** (2006). *"Acoustic bed velocity and bed load dynamics in a large sand bed river"*. Journal of Geophysical Research, Vol. 111, F02005.
- **Gaeuman, D.; Jacobson, R.B.** (2007). *"Field Assessment of Alternative Bed-Load transport Estimators"*. Journal of Hydraulic Engineering, v. 133, No. 12, p. 1320-

- 1328.
- **García, M. H.** (2000). *"Discussion of The legend of A. F. Shields"*, Journal of Hydraulic Engineering.
 - **García, M. H.** (2007). *"Sedimentation Engineering: processes, measurements, modeling and practice"*, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 110.
 - **García; C. M.; Herrero, S. H.** (2009). *"Metodología experimental para caracterizar flujos turbulentos con velocímetros acústicos Doppler"*, Primer Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica, Villa Carlos Paz, Córdoba, Argentina.
 - **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.
 - **Gray, J. R.** (2012). *"Sediment Hydroacoustics Workshop"*. U.S. Fish and Wildlife National Conservation Training Center, Shepherdstown, WV.
 - **Gray, J. R.; Gartner, Jeffrey W.** (2010). *"Surrogate technologies for monitoring suspended sediment transport in river"*. Sedimentology of Aqueous Systems.
 - **Gray, J.R.; Landers, M.N.** (2014). *"Measuring suspended sediment, in Ahuja, Satinder, ed., Comprehensive water quality and purification: United States of America"* Elsevier, v. 1, p. 157–204.
 - **Guerrero M.; Rüther, N.; Szupiany, R. N.** (2012). *"Laboratory validation of ADCP techniques for suspended sediments investigation"*. Flow Measurement and Instrumentation, 23, 1.
 - **Guerrero, M.; Szupiany, R.N.; Amsler, M.L.** (2011). *"Comparison of acoustic backscattering techniques for suspended sediments investigation"* Elsevier, Flow Measurement and Instrumentation, v. 22, no. 5, p. 392–401.
 - **Hay, A. E.** (1983). *"On the remote acoustic detection of suspended sediment at long wavelengths"*. Journal of Geophysical Research, v. 88 no. C12.
 - **Hay, A.E.; Sheng, J.** (1992). *"Vertical profiles of suspended sand concentration and size from multi-frequency acoustic backscatter"*. Journal of Geophysical Research: v. 97, p. 15661–15677
 - **Herrero, H. S.; Castro, P. G.; García, C. M.; Rodríguez, A.** (2007). *"Guía práctica para realizar mediciones de velocidad en flujos turbulentos con ADV"*. XXI Congreso Nacional del Agua. Tucumán, Argentina. 15 al 19 de mayo de 2007
 - **Holdaway, G.P.; Thorne, P.D.; Flatt, D.; Jones, S.E.; Prandle, D.** (1999). *"Comparison between ADCP and transmissometer measurements of suspended sediment concentration"* Elsevier, Continental Shelf Research, v. 19, p. 421–441.

- **Hudson, N. W.** (1993). *“Field Measurement of soil erosion and runoff”*. FAO Soils Bulletin, No. 68, Roma.
- **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.”* J. Hydraul. Eng., 137(9).
- **Kostaschuk, R.; Best, J.; Villard, P.; Peakall, J.; Franklin, M.** (2005). *“Measuring flow velocity and sediment transport with an acoustic Doppler current profiler”*. Geomorphology, Vol. 68, Mayo 2005, p.25-37.
- **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), 04014023.
- **Latosinski, F. G., Szupiany, R. N., García, C. M., 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, ed. Elsevier, 124-135.
- **Lenarduzzi, M.G.** (2013). *“Caracterización hidrodinámica experimental de un tramo del Río Tercero (Ctalamochita) con fines hidroambientales”*. Práctica Supervisada de la carrera Ingeniería Civil de la FCEFyN UNC. Córdoba, Argentina.
- **Lewis, A. J.; Rasmussen, T. C.** (1999). *“Determination of suspended sediment concentrations and particle size distributions using pressure measurements”*. J. Environ. Qual., 28, 1490-1496.
- **Lynch, J.F.; Irish, J.D.; Sherwood, C.R.; Agrawal, Y.C.** (1994). *“Determining suspended sediment particle size information from acoustical and optical backscatter measurements”* Elsevier, Continental Shelf Research, v. 14, nos. 10–11, p. 1139–1165.
- **Maza Álvarez, J. A.; Flores García, F.** (1996). *“Transporte de sedimentos - Capítulo 10”*. Manual de Ingeniería de Ríos, Instituto de Ingeniería Unam.
- **Meyer-Peter, E.; Muller, R.** (1948). *“Formulas for bed load transport”*. Proceedings of the 2nd Meeting of International Association for Hydraulic Structures Research. Pp. 39-64.
- **Miatello R.** (1978). *“Geografía Física de la Provincia de Córdoba”*. Directorio del Banco de la Provincia de Córdoba. Editorial Boldt. p 164-454.
- **Morris, G. L.; Fan, J.** (1997). *“Reservoir sedimentation handbook”*. McGraw-Hill.
- **Mueller, D. S.; Wagner, C. R.** (2007). *“Best practices for measuring discharge with acoustic Doppler current profiler”*. Scientific Investigations Report, U. S. Departamento of the Interior, U. S. Geological Survey. Reston, Virginia

- **Mueller, D. S.; Wagner, C. R.** (2007). *“Correcting Acoustic Doppler Current Profiler Discharge Measurements Biased by Sediment Transport”*. Journal of Hydraulic Engineering, December 2007.
- **Rennie, C. D.; Millar, R. G.** (2004). *“Measurement of the Spatial Distribution of Fluvial Bedload Transport Velocity in both Sand and Gravel”*. Earth Surface Processes and Landforms.
- **Rennie, C. D.; Millar, R. G.; Church, M. A.** (2002). *“Measurement of Bed Load Velocity using an Acoustic Doppler Current Profiler”*. Journal of Hydraulic Engineering 2002.
- **Rennie, C.D., Villard, P.V.** (2004); *“Site specificity of bedload measurement using an ADCP,”* Journal of Geophysical Research (Earth Surface); Vol. 109.
- **Rusello, P.J.** (2009). *“A Practical Primer for Pulse Coherent Instruments”*. Nortek Technical Note, TN-027, Nortek.
- **Saldaño, V.** (2010). *“Modelación hidrológica y calidad de agua del Río Tercero (Ctalaomchita)”*. Práctica Supervisada de la carrera Ingeniería Civil de la FCEfYn, UNC. Córdoba, Argentina.
- **Sandoval, M. A.** (2016). *“Contribuciones a la caracterización experimental del transporte de sedimentos de fondo y en suspensión en el río Ctalamochita utilizando un perfilador de corriente acústico doppler (ADCP)”*. Práctica supervisada de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- **Shields, A.** (1936) *“Anwendung der Aechichkeits-Mechanic und der Turbuleng Forschung auf dir Geschiebewegung’ Mitt Preussische,”*. Versuchsanstalt fur Wasserbau and Schiffbau, Berlin, Germany.
- **Simons, D. B.; Richardson, E. V.** (1966). *“Resistance to flow in alluvial channels”*. Professional Paper 422J, U.S. Geological Survey, Washington, D.C.
- **Simpson, M. R.** (2001). *“Discharge Measurements Using a Broad-Band Acoustic Doppler Current Profiler”*. Open File Report 01-1, United States Geological Survey, Sacramento, California.
- **SonTek** (2013) *“RiverSuveyor S5/M9 System Manual”*. Manual del usuario para la operación de ADCP S5/M9.
- **Straub, L. G.** (1935) *“Missouri River Report”*, Howe Document 238, Appendix XV, Corps of Engineers, United States Department of the Army to 37rd United States Congress, 2nd Session, 1935, pp. 156.
- **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. Vol. 45, 5, doi:10.1029/2008WR007428.

- **Szupiany, R. N.; Oberg, K.** (2016). "*Perfiladores de Corriente Acústicos Doppler (ADCP)*". Monografía IAHR: Caracterización experimental de flujos turbulentos en hidráulica. En prensa.
- **Thorne, P.D.; Hardcastle, P.J.** (1997). "*Acoustic measurements of suspended sediments in turbulent currents and comparison with in-situ samples*" Journal of the Acoustical Society of America, v. 101, no. 5, p. 2603–2614.
- **Thorne, P. D.; Vincent, C. E.; Hardcastle, P. J; Rehman, S.; Pearson, N.** (1991). "*Measuring suspended sediment concentrations using acoustic backscatter devices*". Elsevier, Marine Geology, v. 98, p. 7-16.
- **Topping, D.J.; Wright, S.A.; Griffiths, R.E.; Dean, D.J.** (2015). "*Physically based method for measuring suspended sediment concentration and grain size using multi-frequency arrays of single-frequency acoustic-Doppler profilers*" Proceedings of the Third Joint Federal Interagency Sedimentation Conference on Sedimentation and Hydrologic Modeling, April 19–23, 2015: Reno, Nev., p. 833–846.
- **Trombotto, V.** (2004). "*Complejo Hidroeléctrico Río Grande. Central en Caverna de Acumulación por Bombeo*". Boletín Energético Comisión Nacional de energía Atómica. Año VII nº14.
- **Van Rijn, L. C.** (1982). "*Equivalent roughness of alluvial beds*". Journal of Hydraulic Division, ASCE, 108(10), 1215-1218.
- **Van Rijn, L. C.** (1993). "*Bed material suspension and transport in steady uniform currents*". Principles of sediment transport in river, estuaries and coastal seas, capítulo 7. Aqua Publications, Amsterdam, Países Bajos.
- **Van Rijn, L. C.** (1984a). "*Sediment transport, part I: bedload transport*". Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110, Issue 12 (December 1984).
- **Van Rijn, L. C.** (1984). "*Sediment transport, part III: bed forms and alluvial roughness*". Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110, Issue 12 (December 1984).
- **Villard, P.; Church, M.; Kostaschuk, R.** (2005). "*Estimating Bedload in Sand-Bed Channels Using Bottom Tracking from an Acoustic Doppler Profiler*" Fluvial Sedimentology VII, Blackwell Publishing Ltd., Oxford, UK.
- **Yalin, M. S.** (1977). "*Mechanics of sediment transport*". Perfamon Press, 2da Ed., Nueva York.
- **Wall, G.R.; Nystrom, E.A.; Litten, S.** (2006). "*Use of an ADCP to compute suspended-sediment discharge in the Tidal Hudson River, New York: U.S*" Geological Survey Scientific Investigations Report 2006–5055.
- **Wong, M.; Parker, G.** (2006). "*Reanalysis and correction of bed load relation of Meyer-Peter & Muller using their own database*". Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 132, Is. 11.

- **Wood, M.S.; Fosness, R.L.; Etheridge, A.B.** (2015). *“Sediment transport and evaluation of sediment surrogate ratings in the Kootenai River near Bonners Ferry”* Idaho, Water Years 2011-14: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2015–5169, p. 45.

ANEXO:
PUBLICACIONES DESARROLLADAS
EN ESTA TESIS

*Caracterización del Transporte de Sedimentos en un tramo del Río Ctalamochita utilizando
Tecnología Acústica Doppler*

HEREDIA LIGORRIA, ANA INÉS

Using acoustic Doppler current profiler (ADCP) to characterize bed morphology and sediment transport over dunes at the Ctalamochita River (Córdoba, Argentina)

Ana I. Heredia Ligorria,^{1,2,3} Carlos Marcelo García^{1,2,3}, José Manuel Díaz Lozada^{1,2,3},
Francisco G. Latosinski^{3,4}, Ricardo Nicolás Szupiany^{3,4}

¹ Institute for Advanced Studies for Engineering and Technology (IDIT, UNC). FCEFyN, Av. Vélez Sarsfield 1611, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina.

² Center for Water Research and Technology – (CETA – UNC). FCEFyN, Av. Vélez Sarsfield 1611, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina.

³ The National Scientific and Technical Research Council (CONICET)

⁴ School of Engineering and Hydric Sciences, National University of Litoral, Ciudad Universitaria, C.C. 217, RN° 168–Km. 472 (CP 3000), Santa Fe, Argentina.

ABSTRACT

This work presents the characterization of bed morphology and sediment transport (bedload) over dunes using ADCP at the Ctalamochita River (Córdoba, Argentina) with dunes lengths ranging between 2 and 5m and dunes high between 0.1 and 0.5m. A SonTek ADCP S5 RiverSurveyor, with 3000kHz acoustic frequency has been used. The bedload was determined by either: a) long-term stationary measurements and by b) the traditional dune tracking method. The stationary measurement has been performed tracking a complete dune displacement during more than two hours while the traditional dune tracking has been performed by conducting different longitudinal tracks at every zone over dune trains that were previously identified in exploratory observations.

INTRODUCTION

Bed forms (i.e. dunes, ripples, etc) in alluvial streams are of a high importance characterizing the flow resistance and sediment transport. However, operational difficulties and limitations (due to the spatial and temporal resolutions) of conventional measurement methods used to quantify 3D flow and sediment transport produced a limited knowledge regarding the behavior of these dunes. Although it has made significant progress with respect to the structure of flow through dunes in the last thirty years using conventional field methods and new technologies, the dynamics of sediment transport remains in a limited knowledge and most of the field studies has been done in large rivers (Kostaschuk 1996 & 2005, Parsons et al. 2005, Shugar et al. 2010). This is mainly due to the lack of appropriate instruments/samplers, the associated poor accuracy and resolution and its implementation difficulties/risks in rivers. In recent years, acoustic Doppler current profilers (ADCP) had been used to quantify suspended sediment transport and bedload in natural streams (Holdaway et al. 1999, Gartner 2004, Wall et al. 2006, Gray and Gartner 2010, Guerrero et al., 2011, Latosinski et al. 2014, Topping et al., 2015).

Description and quantification of sediment transport (namely bedload) in natural streams allows knowing the erosion and deposition processes in the river. There are two methods to quantify the bedload: a) direct measurement, and b) empirical formulations. In shallow depth streams, significant bedload occurs during flood events and the experimental quantification of the sediment transport present during these floods using traditional methods is difficult and dangerous for the operator and the equipment. On the other hand, the use of empirical formulation of different authors on the same river generates different results, with differences of the order of magnitude.

In recent years, Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP) had been used to quantify suspended sediment transport and bedload in natural streams mainly in big river (Rennie et al. 2002 & 2004, Kostaschuk et al. 2005, Villard et al. 2005, Gaeuman & Jacobson 2006 & 2007). Applying

this new technology to sediment transport, results of the characterization of bed morphology and sediment transport over dunes using a SonTek ADCP S5 RiverSurveyor, with 3000kHz acoustic frequency for shallow water, at the Ctalamochita River (Córdoba, Argentina) were reported.

EXPERIMENTAL METHODS

The measurement site at the Ctalamochita River is in Villa María in the southeast region of Córdoba Province (32°25'19"S; 63° 14'40"W), Argentina (Figure 1). The Ctalamochita River has a mean flow discharge of $27 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ and it has six reservoirs in its upstream with a total reservoir capacity of 1000 Hm^3 . The regulation system has a strongly influence on the flow discharge of this river. This measurement site has been selected because (a) There are important erosion and deposition processes, mainly in flood events, (b) the site accessibility and (c) the presence of a bridge that allows do measurements with the ADCP in a safe way.

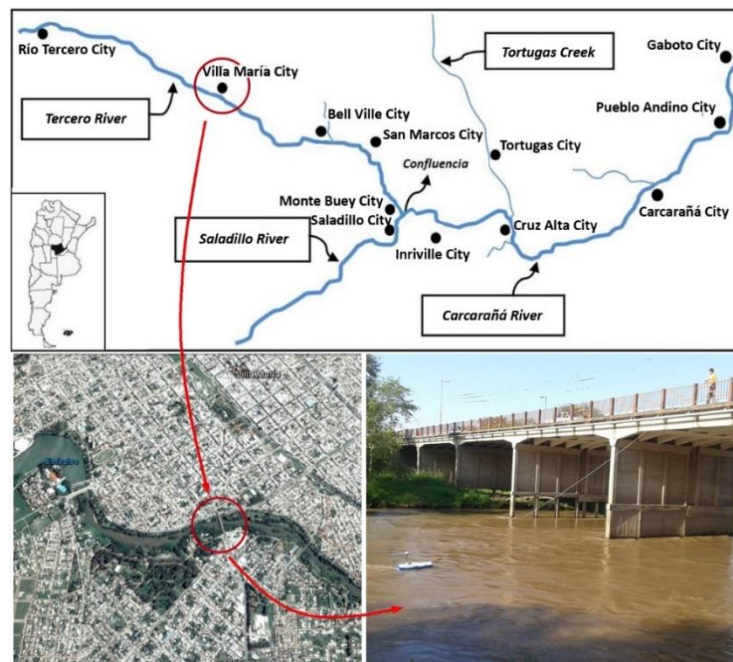


Figure 1. Measurement site: Alberdi bridge, Villa María City, Córdoba, Argentina.

Four field works were performed the selected site in 2016, with differ hydraulic and bedforms characteristics (March 13th, April 8th, September 5th, and November 11th). The flow discharge was $114 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, $66 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, $25 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, and $19 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, respectively. Flow discharge was measured with YSI/SonTek RiverSurveyor S5® 3MHz ADCP. The mean characteristics of the ADCP SonTek RiverSurveyor S5 are described in Table 1 (Sontek, 2013).

Table 1. Main characteristics of ADCP YSI/RiverSurveyor S5 (SonTek, 2013).

	Profiling Range (Distance)	0.06 to 5 m
	Profiling Range (Velocity)	+/- 20 m/s
Velocity Measurement	Accuracy	Up to +/- 0.25 of measure velocity
	Resolution	0.001 m/s
	N° of cells	Up to 128
	Cell Size	0.02 to 0.5 m
Transducer Configuration	Five (5) transducers	4-beam 3,0 MHz Janus at 25° Slant Angle 1.0 MHz Vertical Beam

Depth Measurement	Profiling Range	0.20 to 15 m
	Accuracy	1%
	Resolution	0.001 m
Discharge Measurement	Range with Bottom-Track	0.30 a 5 m
	Range with RTK GPS	0.30 a 15 m

Two methodologies were used to determine the bedload: a) long-term stationary measurements and b) the traditional dune tracking method. The stationary measurement has been performed tracking a complete dune displacement during more than two hours. The stationary measurements also allow the morphology characterization of bedforms (height, length, and shape factor) and the displacement velocity. The traditional dune tracking has been performed by conducting different longitudinal tracks at every zone over dune trains that were previously identified in exploratory observations.

For long-term stationary measurement, the bedload was estimated integrating dune volume and monitoring the dune displacement (Eq. 1), where $P=0.4$ is the porosity of the bedload material.

$$g_{sf} = (1 - P)Vol_d / \text{sampling time} \quad \text{Eq. [1]}$$

For the dune tracking method, the procedure results in a time series of bathymetric profiles of bedform sequences that are compared to infer an average displacement velocity, u_d , and height, H_d of the measured bedforms that enable the assessment of bedload rate per unit width by Equation 2 (Van Rijn, 1993), α is a shape factor, and C_1 represents the portion of bedload that does not participate in the downstream translation of the bedform (Gaeuman et al., 2007).

$$g_{sf} = \alpha(1 - P)H_d u_d + C_1 \quad \text{Eq. [2]}$$

RESULTS

Table 2 shows the main hydraulic parameters computed for the four measurement conditions.

Table 2. Hydraulic parameters characteristic of four measured flow conditions.

Field Work	Flow Discharge Q m ³ s ⁻¹	Flow Depth h m	Area A m ²	Flow Velocity U m s ⁻¹
16/03/2016	113.85	1.97	80.84	1.23
08/04/216	65.84	1.43	51.86	1.15
05/09/2016	24.90	0.80	31.16	0.80
07/11/2016	18.89	0.74	26.03	0.73

Results of long term stationary measurement

The original signal of flow depth data recorded by the ADCP was analyzed filtering out short and long term fluctuations. A band pass Fourier filter has been used (Figures 2 to 5).

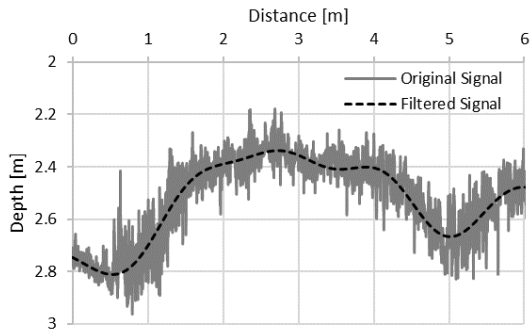


Figure 2. Original and filtered signal, field work 16/03/2016.

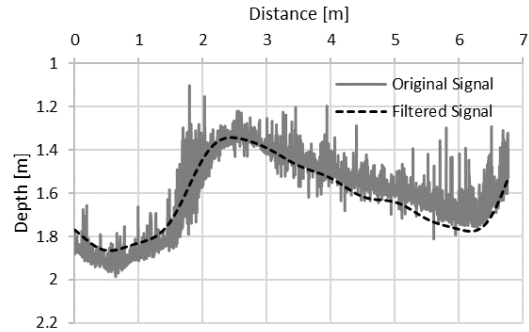


Figure 3. Original and filtered signal, field work 08/04/2016.

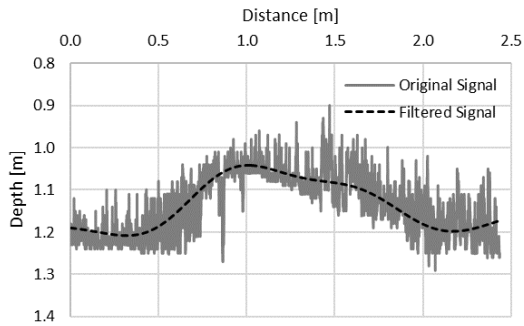


Figure 4. Original and filtered signal, field work 05/09/2016.

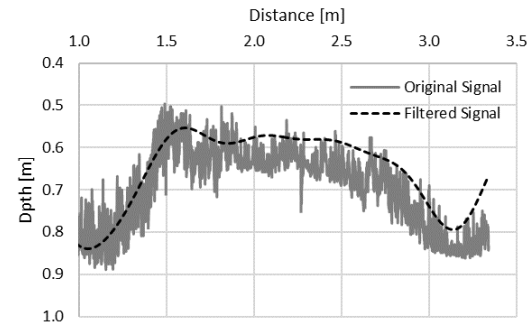


Figure 5. Original and filtered signal, field work 07/11/2016.

Table 3 shows bedforms characteristics: height, length, velocity of displacement, shape factor and bedload transport per unit width (q_b) estimated from Figures 2 to 5. In general, for greater discharge increases the bedload, and the velocity of displacement of the dune.

Table 3. Bedforms characteristics.

Field Work	H_d m	L_d m	$\psi = \Delta/\Lambda$	u_d m s-1	α Shape Factor	$q_b^{(a)}$ Kg m-1 s-1
16/03/2016	0.40	4.49	0.09	0.0012	0.64	0.49
08/04/2016	0.48	5.63	0.08	0.0009	0.47	0.33
05/09/2016	0.16	1.85	0.09	0.0003	0.54	0.05
07/11/2016	0.24	2.07	0.12	0.0004	0.75	0.12

$q_b^{(a)}$: sediment transport per unit width by long-term stationary measurements

Results of dune tracking method

Longitudinal tracks were repeated each 14 or 35 minute, depending of hydraulic conditions. Table 4 shows the result of dune tracking method to calculate sediment transport in Ctlamochita River and the difference with the bedload calculated with stationary measurements. No longitudinal tracks were sampled during the field work performed on 08/04/2016. Thus, results of *dune tracking method* are not reported in this work.

Table 4. Results of dynamic measurements.

Field Work	$q_b^{(b)}$ Kg m-1 s-1	Difference $q_b^{(a)}/q_b^{(b)}$
16/03/2016	0.44	-10%
05/09/2016	0.06	35%
07/11/2016	0.11	4%

$q_b^{(a)}$: sediment transport per unit width by dune tracking method measurements

CONCLUSIONS

An acoustic Doppler current profiler (ADCP) for shallow waters has been used in this work to characterize bed morphology and sediment transport (bedload) over dunes at the Ctlamochita River (Córdoba, Argentina) with dunes lengths ranging between 2 and 5m and dunes high between 0.1 and 0.5m. Different hydraulic flow conditions have been evaluated with two different methodologies: long-term stationary measurement and dune tracking method.

Long-term stationary measurements (Eulerian analysis) allow both the quantification of bedload and the dunes morphology characterization in Ctlamochita River where the dune heights are the same the order of magnitude as the spatial average of the ADCP. In addition, this methodology, will allow, in future works, the study of the influence of bedforms in vertical flow velocity profiles present over the dune. The advantages of estimating bedload using dune tracking method, is that more than one dune (with different height and length), are used to estimate the bedload against long term stationary measurements that only samples one bedform.

Finally, bedload results from two methods were compared, obtaining differences smaller than 35%, which results promising for the application of these methods in natural streams, overcoming many disadvantages of traditional methods because ADCP can be used during floods, with higher temporal and spatial resolution and safer for the operators.

REFERENCES

- Gaeuman, D.; Jacobson, R. R. (2006). "Acoustic bed velocity and bed load dynamics in a large sand bed river". *J. of Geophysical Research*, Vol. 111, F02005.
- Gaeuman, D.; Jacobson, R.B. (2007). "Field Assessment of Alternative Bed-Load Transport Estimators". *J. Hydraul. Eng.* v. 133, No. 12.
- 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.
- Guerrero, M.; Szupiany, R.N.; Amsler, M.L. (2011) "Comparison of acoustic backscattering techniques for suspended sediments investigation". Elsevier, *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 22, no. 5, p. 392–401.
- Holdaway, G.P.; Thorne, P.D.; Flatt, D.; Jones, S.E.; Prandle, D. (1999) "Comparison between ADCP and transmissometer measurements of suspended sediment concentration" Elsevier, *Continental Shelf Research*, v. 19, p. 421–441.
- Kostaschuk, R.; Villard, P. (1996). Flow and sediment transport over large subaqueous dunes: Fraser river, Canada. *Sedimentology* 43, 849–863.
- Kostaschuk, R.; Best, J.; Villard, P.; Peakall, J.; Franklin, M. (2005). "Measuring flow velocity and sediment transport with an acoustic Doppler current profiler". *Geomorphology*, Vol. 68, Mayo 2005, p.25-37.
- 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". *J. Hydraul. Eng.*
- Parsons, D. R., Best, J. L., Orfeo, O., Hardy, R. J., Kostaschuk, R., & Lane, S. N. (2005). "Morphology and flow fields of three-dimensional dunes, Rio Paraná, Argentina: Results from simultaneous multibeam echo sounding and acoustic Doppler current profiling". *J. of Geophysical Research: Earth Surface*.
- Rennie, C. D.; Millar, R. G.; Church, M. A. (2002). "Measurement of Bed Load Velocity using an Acoustic Doppler Current Profiler". *J. Hydraul. Eng.* 2002.

- Rennie, C.D.; Villard, P.V. (2004). “Site specificity of bedload measurement using an aDcp,” *Journal of Geophysical Research (Earth Surface)*; Vol. 109.
- D.H. Shugar, R. Kostaschuk, J.L. Best, D.R. Parsons, S.N. Lane, O. Orfeo, R.J. Hardy. (2010). “On the relationship between flow and suspended sediment transport over the crest of a sand dune, Rio Parana, Argentina”. *Sedimentology* 57.
- Sontek, Y. S. I. (2013). “RiverSurveyor S5/M9 System Manual”. San Diego.
- Topping, D.J.; Wright, S.A.; Griffiths, R.E.; Dean, D.J. (2015) “Physically based method for measuring suspended sediment concentration and grain size using multi-frequency arrays of single-frequency acoustic-Doppler profilers.” *Proceedings of the Third Joint Federal Interagency Sedimentation Conference on Sedimentation and Hydrologic Modeling*, April 19–23, 2015.
- Van Rijn, L.C. (1993). “Bed material suspension and transport in steady uniform currents”. Chapter 7 in *Principles of sediment transport in river, estuaries, and coastal seas*, Aqua Publications, Amsterdam, The Netherlands.
- Villard, P.; Church, M.; Kostaschuk, R. (2005) “Estimating Bedload in Sand-Bed Channels Using Bottom Tracking from an Acoustic Doppler Profiler”. *Fluvial Sedimentology VII*, Blackwell Publishing Ltd., Oxford, UK.

CARACTERIZACIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTO DE FONDO EN EL RÍO TERCERO (CTALAMOCHITA) EN CÓRDOBA ARGENTINA, CON UN PERFILADOR DE CORRIENTE ACÚSTICO DOPPLER (ADCP)

Ana Inés, Heredia Ligorria¹²; Carlos Marcelo, García¹²; José Manuel Díaz Lozada¹; Ricardo N. Szupiany³; Francisco Latosinski³

¹ Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Av. Filloy s/n, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina.

² Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología (IDIT CONICET/UNC). Av. Vélez Sarsfield 1611, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina.

³ Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.

Mail de contacto: aheredil@hotmail.com

Introducción

La cuantificación del transporte de sedimentos de fondo en cursos fluviales permite conocer sobre los procesos de erosión y deposición. Esta cuantificación puede hacerse de dos maneras: a) por medición directa y b) por medio de formulaciones empíricas. En los casos que formas de fondo están presentes en el lecho del río, la cuantificación de transporte de sedimento de fondo con muestreadores convencionales se dificulta, mientras que muchas de las formulaciones empíricas no son aplicables ya que no fueron ajustadas para estas condiciones. Considerando la potencialidad de los instrumentos acústicos para la estimación del transporte de sedimentos (en particular la adaptación de tecnología hidro-acústica Doppler), en este trabajo se realiza la caracterización del transporte de sedimento de fondo en un curso fluvial de la provincia de Córdoba con presencia de formas de fondo, utilizando un perfilador de corriente acústico Doppler ADCP.

Objetivo

El objetivo de este trabajo es la caracterización del transporte de sedimento de fondo en el río Ctalamochita (Tercero) que escurre en la provincia de Córdoba, Argentina con un perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP) para aguas poco profundas YSI/SonTek S5 de 3MHz de frecuencia acústica.

Materiales y Métodos

El río Ctalamochita (Tercero) escurre en la región sureste de la provincia de Córdoba, con caudal medio de 27m³/s. La sección de estudio está emplazada en la ciudad de Villa María, en el puente Alberdi (32°25'19"S; 63°14'40"W). Durante el año 2016 se realizaron cuatro campañas de medición en distintas condiciones hidrométricas caracterizadas por un caudal escurrido: 114m³/s, 66m³/s, 25m³/s y 19m³/s.

Para cuantificar el caudal y caracterizar el fondo se utilizó un perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP) "YSI/SonTek RiverSurveyor S5" (SonTek 2013), de 3Mhz de frecuencia acústica, diseñado específicamente para medir velocidades en aguas poco profundas (desde 0,30m hasta 15m).

Para estimar el transporte de sedimento de fondo se aplicaron dos metodologías diferentes: en primer lugar, con el método "volumétrico" (mediciones estacionarias) y luego por la metodología de seguimiento de dunas

(mediciones dinámicas). Para el primer caso se midió con el ADCP en forma estacionaria (dejándolo en una posición fija) hasta ver pasar una duna completa. Conociendo el perfil de la duna (altura y longitud) se integró el volumen bajo la curva, y al dividirlo por el tiempo se obtuvo el transporte de fondo. La metodología de seguimiento de dunas consiste en comparar repetidos perfiles batimétricos de un conjunto de dunas para estimar una velocidad de desplazamiento de duna (u_d), y la altura (H_d) de las formas de fondo medidas para evaluar el transporte de fondo por unidad de ancho según la ecuación [1] (Van Rijn, 1993).

$$g_{sf} = \alpha(1 - P)H_d u_d + C_l \quad \text{Ec. [1]}$$

Donde P es la porosidad del material de fondo, α el factor de forma de la duna, y C_l representa la porción del material de fondo que no participa en la traslación de la forma de fondo. El valor adoptado de la porosidad en este trabajo fue $P=0,4$, mientras que el coeficiente de forma se calculó para cada duna como el cociente entre el área real y el área de un triángulo equivalente de base igual a la longitud de la duna y altura igual a la altura de la duna. El coeficiente $C_l=0$ ya que se consideró que todo el material de la duna se desplaza en conjunto.

Resultados

En la tabla 1 se pueden observar los parámetros hidráulicos medidos con el ADCP en las cuatro campañas realizadas. Las condiciones hidrométricas evaluadas experimentalmente representan: un caudal alto, uno próximo al módulo del río Tercero (Ctalamochita) y otros dos un poco menores.

Tabla 1.- Parámetros hidráulicos medidos con el ADCP en el río Tercero (Ctalamochita)

Fecha	Q [m ³ /s]	h [m]	A [m ²]	V [m/s]
16-03-16	113,85	1,97	80,84	1,23
08-04-16	65,84	1,43	51,86	1,15
05-09-16	24,90	0,80	31,16	0,80
07-11-16	18,89	0,74	26,03	0,73

Resultado de mediciones estacionarias

A la señal original de profundidad medida por el ADCP se le aplicó un filtro de banda para eliminar la pendiente del cauce y el ruido, aplicando un filtro pasa banda de

Fourier. La aplicación de filtros permite separar amplitudes de onda de distintas frecuencias reteniendo las que interesan y eliminando aquellas que perturban la interpretación de los resultados, lo que facilita su análisis. En la Figura 1, Figura 2, Figura 3, y Figura 4 se grafica la señal original y la señal filtrada para cada condición hidrométrica, la cual se utilizó luego para calcular la altura y longitud de cada duna.

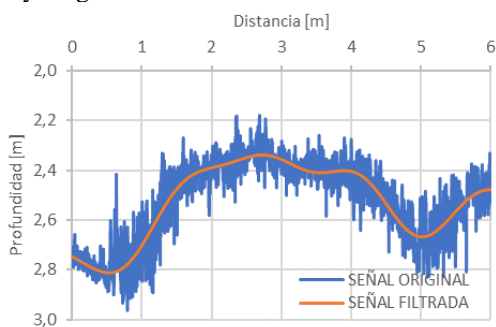


Figura 1.- Señal original y señal filtrada. Campaña 16/03/2016

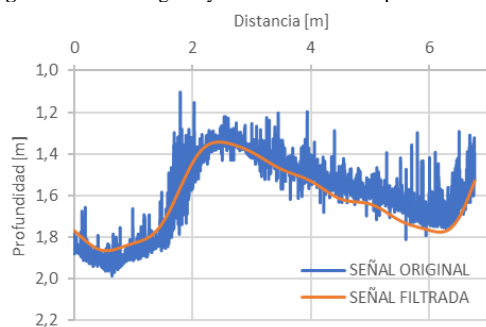


Figura 2.- Señal original y señal filtrada. Campaña 08/04/2016

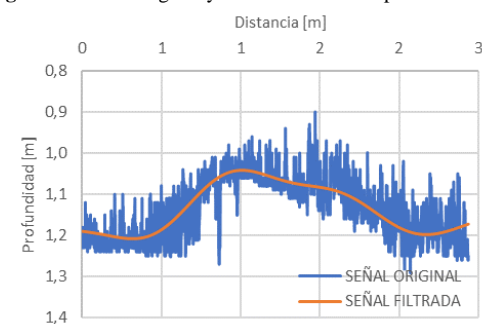


Figura 3.- Señal original y señal filtrada. Campaña 05/09/2016

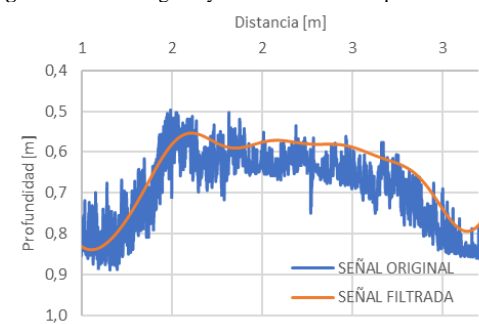


Figura 4.- Señal original y señal filtrada. Campaña 07/11/2016

Con los datos de estas mediciones se calcularon las

características geométricas de las dunas (altura, longitud y factor de forma), junto con el transporte de fondo por unidad de ancho para cada condición, que se pueden observar en la tabla 2.

Tabla 2.- Características de las dunas medidas con el método estacionario en el río Tercero, (Ctalamochita)

Fecha	H_d [m]	L_d [m]	u_d [m/s]	a	$q_b^{(a)}$ [Kg/m.s]
16-03-16	113,85	1,97	80,84	1,23	0,49
08-04-16	65,84	1,43	51,86	1,15	0,33
05-09-16	24,90	0,80	31,16	0,80	0,05
07-11-16	18,89	0,74	26,03	0,73	0,12

Con $q_b^{(a)}$ el transporte de fondo por unidad de ancho y de tiempo, obtenido con el método volumétrico (medición estacionaria)

Resultado de mediciones dinámicas

Por el tamaño de sistema fluvial analizado, fue posible realizar varias mediciones dinámicas en un mismo día, siendo posible comparar el desplazamiento de numerosas dunas. Los dinámicos fueron repetidos entre 14 y 35 minutos, dependiendo del caudal líquido. En la tabla 3 se muestran los resultados de la aplicación del método de seguimiento de duna para calcular el transporte de sedimento de fondo en río Tercero (Ctalamochita) y la diferencia con la carga de fondo calculada con las mediciones estacionarias.

Tabla 3.- Resultado de las mediciones dinámicas en el río Tercero, (Ctalamochita)

Fecha	$q_b^{(b)}$ [Kg/m.s]	Diferencia $q_b^{(a)}/q_b^{(b)}$
16-03-16	0,44	-10%
08-04-16	-	-
05-09-16	0,06	35%
07-11-16	0,11	4%

Con $q_b^{(b)}$ el transporte de fondo por unidad de ancho y de tiempo, obtenido con el método de seguimiento de dunas (mediciones dinámicas)

Conclusiones

La utilización del perfilador de corriente acústico Doppler permitió caracterizar las formas fondo de una manera sencilla, relativamente rápida y precisa, pudiendo además obtener el transporte de fondo por unidad de ancho y de tiempo de una manera segura, superando muchas de las desventajas de los muestreadores convencionales.

Respecto al transporte de fondo, se pudieron aplicar dos metodologías y forma de medición diferentes, llegando a resultados similares, para todas las condiciones hidrométricas evaluadas, con diferencias menores al 35%.

Referencias Bibliográficas

- SonTek (2013) "RiverSuvveyor S5/M9 System Manual" – Manual del usuario provisto por SonTek para la operación de ADCP S5/M9
- Van Rijn, L.C. (1993). "Bed material suspension and transport in steady uniform currents". Chapter 7 in Principles of sediment transport in river, estuaries, and coastal seas, Aqua Publications, Amsterdam, The Netherlands.

ESTUDIOS PRELIMINARES DE CUANTIFICACIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN EN EL RÍO TERCERO (CTALAMOCHITA) EN CÓRDOBA, ARGENTINA, CON UN PERFILADOR DE CORRIENTE ACÚSTICO DOPPLER (ADCP)

Ana Inés, Heredia Ligorria^{1,2}; Carlos Marcelo, García^{1,2}; José Manuel Díaz Lozada¹; Ricardo N. Szupiany³; Francisco Latosinski³; Alejandro M. Sandoval¹; Matías Zancanaro¹

¹ Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Av. Filloy s/n, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina.

² Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología (IDIT CONICET/UNC). Av. Vélez Sarsfield 1611, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina.

³ Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.

Mail de contacto: aheredil@hotmail.com

Introducción

El río Tercero (Ctalamochita), es uno de los principales cursos fluviales de la provincia de Córdoba, Argentina con un módulo de 27 m³/s. En este sistema se realiza el monitoreo de calidad del recurso hídrico desde aproximadamente 10 años, a cargo de la Secretaría de Recursos Hídricos y Coordinación de la Provincia de Córdoba. Desde el año 2012 se cuantifican además los caudales superficiales escurridos en el río y en sus principales afluentes. Esta tarea se realiza en conjunto entre la provincia de Córdoba y el Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA) de la UNC. Hasta la actualidad, sin embargo, no se han realizado en el sistema estudios de transporte de sedimentos en forma sistemática y precisa.

La cuantificación del transporte de sedimentos puede hacerse de dos maneras: a) por medición directa y b) por medio de formulaciones empíricas. Actualmente en Argentina la medición del caudal sólido es poco común debido a la complejidad que poseen las técnicas de medición convencionales. Es así que distintos grupos de investigación a nivel mundial están evaluando el uso de los instrumentos acústicos como nuevo método de estimación del transporte de sedimentos, adaptando la tecnología hidro-acústica Doppler (utilizada comúnmente para la medición de caudales en sistemas fluviales) para obtener información cuantitativa sobre el movimiento de las partículas en los cursos fluviales.

Objetivo

El objetivo del este trabajo es presentar los resultados preliminares obtenidos del uso de un perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP) para aguas poco profundas YSI/SonTek S5 para la cuantificación de sedimentos en suspensión el río Tercero (Ctalamochita). Específicamente se incluye el desarrollo y calibración de herramientas realizadas en laboratorio y luego su validación en campo.

Materiales y Métodos

El instrumento hidro-acústico utilizado en este trabajo fue un perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP) "YSI/SonTek RiverSurveyor S5" (SonTek 2013), de 3Mhz de frecuencia acústica, diseñado específicamente

para medir velocidades en aguas poco profundas (desde 0,30m hasta 15m. El ADCP mide la velocidad del agua utilizando el principio de corrimiento de frecuencia Doppler. El emisor de sonido genera una señal acústica en una frecuencia conocida que se propaga a través del agua y es reflejada por partículas presentes en el agua (sedimento, organismos pequeños, plancton), que se asume se desplazan a la velocidad del agua y deben tener inercia muy pequeña. Una cierta porción de la energía reflejada vuelve, la señal es registrada y procesada por los distintos componentes del ADCP para determinar el cambio de frecuencia (o de fase) debido al efecto Doppler (García y Herrero, 2009).

Este trabajo se realizó en dos etapas: el desarrollo de una herramienta y su calibración realizada en laboratorio, y la validación en campo. Las tareas de laboratorio consistieron en registrar simultáneamente valores de rebote acústico con dos instrumentos (ADCP y ADV) bajo distintas concentraciones de sedimento conocidas. Para ello se colocaron los aparatos (Figura 1) en un tanque de asbesto cemento de 0,9m de diámetro y 1m de profundidad, que inicialmente se llenó con agua proveniente de la red. Una vez iniciada la medición se fue incrementando la cantidad de sedimento en suspensión, desde 0 hasta 900mg/L aproximadamente. En esta etapa se evaluó la relación entre la relación señal ruido (SNR) medida con ADCP con la concentración de sedimentos en suspensión, obteniendo una ecuación logarítmica que vincula estos dos valores.

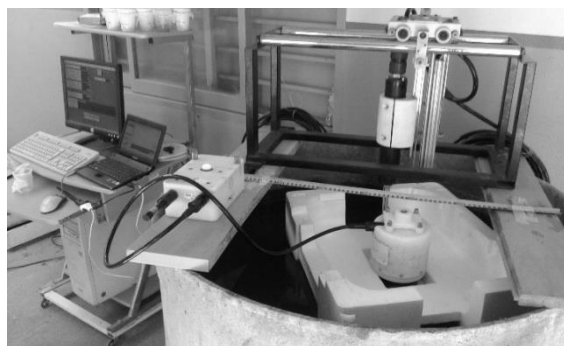


Figura 1.- Instrumentos de medición en el tanque

La validación en campo consistió en aplicar una de las

expresiones encontradas en la etapa de calibración con los datos de rebote acústico obtenidos durante las mediciones de caudal líquido realizadas en el río Tercero (Ctalamochita) con el ADCP, para obtener la concentración de sedimentos en suspensión correspondientes a la carga de lavado. La fórmula utilizada es la ecuación 1, obtenida de los ensayos de laboratorio, utilizando el modo incoherente del ADCP y sedimento pasante del tamiz 100 y retenido del 200.

$$C = 10^{(0,094 \times \text{SNR} - 4,47)} \quad \text{Ec [1]}$$

El valor de SNR utilizado es el que resultó del promedio de los cuatro haces (beams, por su nombre en inglés) en toda la sección y de las cuatro transectas realizadas para la medición de caudal líquido, es decir que se definió un único valor de SNR para cada campaña. Las concentraciones resultantes, en mg/L, se compararon con la cantidad de sólidos suspendidos totales medidos por la Secretaría de Recursos Hídricos y Coordinación de la Provincia de Córdoba, también expresados en mg/L, definidos como la porción de sólidos retenidos por un filtro de fibra de vidrio que posteriormente se seca a 103-105°C hasta peso constante. Para esto utilizaron una muestra bien mezclada del río tomada el mismo día de la medición de caudal.

Resultados

En la Tabla 1 se pueden observar los valores de SNR de cada campaña y la concentración de sedimentos en suspensión aplicando la ecuación 1. Además, se presenta el valor de sólidos suspendidos totales medida por la Secretaría de Recursos Hídricos de la provincia de Córdoba (tomado como referencia), junto con la diferencia porcentual entre el valor calculado y el medido. Estas diferencias son entre el 4 y 92%, siendo las mayores para los caudales más altos (50,27 m³/s y 91,91 m³/s).

Tabla 1.- Concentración de sedimentos en suspensión calculado con mediciones de ADCP en el río Tercero (Ctalamochita)

Fecha	Q [m ³ /s]	SNR promedio [dB]	Conc. Calculada [mg/L]	Sólidos Suspendidos Totales [mg/L]	Dif.
10-09-13	14,97	63,59	32	25	28%
19-11-13	9,64	57,35	8	8	4%
10-06-14	25,64	68,21	87	72	21%
09-09-14	22,81	63,27	30	62	-52%
18-11-14	17,22	64,27	37	29	28%
28-04-15	29,20	67,74	79	81	-3%
09-06-15	24,35	65,16	45	58	-23%
17-11-15	50,27	59,74	14	170	-92%
08-03-16	91,91	66,09	55	136	-60%

En la Figura 2 se grafican las concentraciones calculadas

y las concentraciones dato junto con una recta a 45° (valores iguales). Para concentraciones hasta 100mg/L la diferencia está entre 3 y 50% (incluye diferencias positivas y negativas), mientras que para mayores concentraciones esta diferencia se hace más grande, alcanzando el 92%.

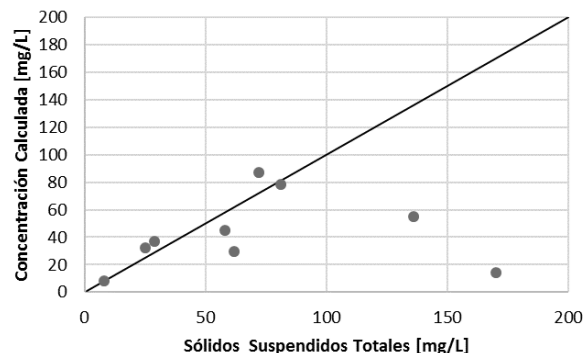


Figura 2.- Concentración de sedimentos en suspensión calculada con mediciones de caudal con ADCP versus sólidos suspendidos totales

Conclusiones

Con respecto a los resultados con ADCP, mediante los ensayos de tanque de agua realizados en la etapa de calibración se encontró que el ADCP YSI SonTek S5 de 3Mhz es sensible a la variación de la concentración de sedimentos en suspensión, a través de una relación logarítmica entre la concentración y la relación señal ruido, el parámetro del ADCP utilizado para comparar. En cuanto a la validación en campo, con estos resultados se demuestra la potencialidad de aplicación de esta metodología, en particular para el río Tercero (Ctalamochita), para la estimación de la concentración de sedimentos en suspensión (correspondiente a la carga de lavado) a partir de mediciones de caudal líquido con ADCP. Si bien las diferencias en algunos casos son superiores al 50%, hay que considerar que las mediciones con los métodos tradicionales, o bien la aplicación de las expresiones empíricas también dan errores de este orden e incluso superior.

Referencias Bibliográficas

- Barchiesi, G. M.** (2014). "Cuantificación y Caracterización del Esguerramiento Superficial en la Cuenca del Río Carcarañá". *Práctica Supervisada de la Carrera Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.*
- García, C. M. & Herrero, S. H.** (2009). "Metodología experimental para caracterizar flujos turbulentos con velocímetros acústicos Doppler", *Primer Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica, Villa Carlos Paz, Córdoba, Argentina.*
- 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), 04014023.*
- SonTek** (2013) "RiverSveyor S5/M9 System Manual" – *Manual del usuario provisto por SonTek para la operación de ADCP S5/M9*
- Szupiany, R. N. & Oberg, K.** (2016). "Perfiladores de Corriente Acústicos Doppler (ADCP)". *Monografía IAHR: Caracterización experimental de flujos turbulentos en hidráulica. En prensa.*

CALIBRACIÓN DE HERRAMIENTAS PARA LA ESTIMACIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN EN RÍOS UTILIZANDO ADV Y ADCP

Ana Inés, Heredia Ligorria^{1,2}; Carlos Marcelo, García^{1,2}; José Manuel Díaz Lozada¹;
Sandoval, Alejandro¹

¹Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

aheredil@hotmail.com; cgarcia2mjc@gmail.com; jmdiazlozada@gmail.com; alejandrosandoval82@hotmail.com

Introducción

El estudio del transporte de sedimentos es importante ya que permite conocer cómo se llevan a cabo los procesos de erosión y deposición, tanto de márgenes como de lecho de los cauces aluviales. Actualmente, en Argentina la medición del transporte de sedimentos es poco común debido a la complejidad que poseen las técnicas convencionales. Dicha complejidad viene acompañada de una serie de desventajas entre las cuales se pueden nombrar: (a) Baja resolución espacial y temporal; (b) Es necesario ingresar al río, junto con el riesgo que ello supone; (c) Son costosas; y (d) además requieren tiempos prolongados de medición y procesamiento de muestras. La tecnología hidro-acústica Doppler, la cual ha presentado en los últimos 20 años un importante desarrollo para la medición de caudales en sistemas fluviales, puede ser adaptada para obtener información cuantitativa del transporte de sedimentos (Latosinski, 2014),

Objetivo

En el presente trabajo se calibró herramienta para estimar el transporte de sedimentos en suspensión en cursos fluviales, en función de la intensidad del rebote acústico para dos instrumentos acústicos: Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP) YSI/SonTek S5 y Velocímetro Acústico Doppler (ADV) Sontek,

Instrumental

Para las mediciones se utilizó un Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP) “YSI/SonTek RiverSurveyor S5” (Sontek 2010), de 3Mhz de frecuencia acústica diseñado específicamente para aguas poco profundas y un Velocímetro Acústico Doppler (ADV) Sontek de 16Mhz de frecuencia acústica,

Para la adquisición de los datos del ADCP se utilizó el software RiverSurveyor Live v3,60 y firmware RiverSurveyor v3,0,0, de acuerdo a las recomendaciones de YSI/Sontek mientras que para el procesamiento de los datos del ADV el software “WinADV” versión 2,031,

Metodología

Para cumplimentar el objetivo propuesto en este trabajo, se realizaron mediciones en forma simultánea con los dos instrumentos bajo distintas concentraciones de sedimento conocidas. Para ello se colocaron los dos instrumentos (figura 1) en un tanque de asbesto cemento de 0,9m de diámetro y 1m de profundidad, el cual en un principio se llenó con agua proveniente de la red, la cual posee una baja concentración de sedimentos. Posteriormente, se fue incrementando la cantidad de sedimento en suspensión. Como sedimento se utilizaron distintas fracciones granulométricas de suelo loésico de la ciudad de Córdoba. Para los ensayos 1, 2 y 3 la fracción pasante del tamiz 200; para el ensayo 6 arcilla, y para los ensayos 7, 8 y 9 la fracción de suelo retenida en el tamiz 200. Previo a iniciar cada medición se efectuó la mezcla en el tanque durante 1 minuto para asegurar que la concentración sea homogénea. La concentración varió desde 0 hasta 350mg/L.

Las mediciones con ADCP se efectuaron utilizando dos modos de medición diferentes: coherente (SmartPulse activado) e incoherente (SmartPulse desactivado), lo cual implica un tamaño de celda diferente para cada caso (para las profundidades adoptadas en los experimentos, los tamaños de celda fueron de 0,02m para el modo coherente y 0,20m para el incoherente),

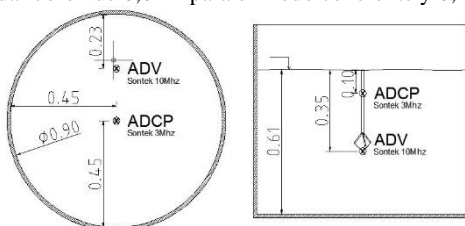


Figura 1.- Planta y Corte del Tanque de los Ensayos

Para evaluar la variación de la señal de retorno de los instrumentos según la cantidad de sedimentos en suspensión, se comparó la relación señal ruido (SNR) registrada con las diferentes concentraciones,

Resultados

En las figuras 2 y 3 se muestran los resultados obtenidos con ADV. En el primer caso se grafica la evolución de relación señal ruido (SNR por sus siglas en inglés) con la concentración de sedimento en suspensión, mientras que en la figura 3 se muestra la evolución de la amplitud de la señal respecto a la concentración. En ambos casos se puede ver que la función que mejor ajusta a las mencionadas relaciones es una logarítmica, la cual comienza a atenuarse para una concentración de 300mg/L,

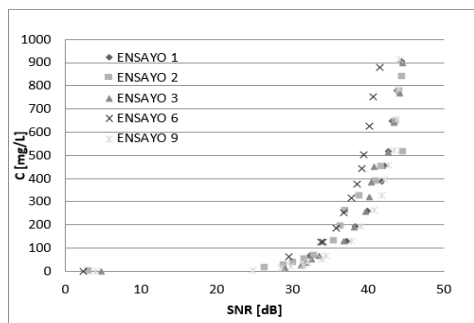


Figura 2,- Curva que relaciona SNR (ADV) y la Concentración de sedimentos en suspensión

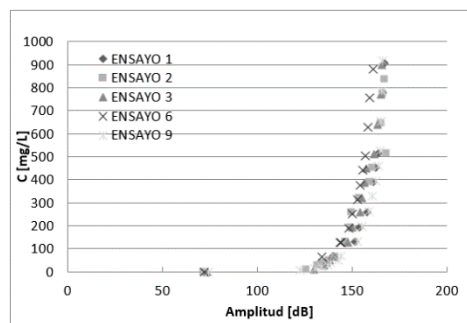


Figura 3,- Curva que relaciona Amplitud de la señal (ADV) y la Concentración de sedimentos en suspensión

En las mediciones con ADCP se adoptó un valor de SNR promedio entre las celdas 12 a la 21 para el modo coherente y el SNR promedio de a segunda celda para el modo incoherente. Este promedio se efectuó para poder comparar valores medidos a igual profundidad, teniendo en cuenta el diferente tamaño de celdas de cada modo,

En las figuras 4 y 5 se grafica el SNR versus la concentración para las mediciones efectuadas con ADCP, Tanto para el modo coherente como el incoherente se ve una gran dispersión en los resultados. Se ve que la señal de retorno varía en forma considerable para concentraciones bajas (entre 0 y 200mg/L), mientras que a medida que aumenta la cantidad de sedimentos esta señal se va atenuando produciendo una menor variación de SNR.

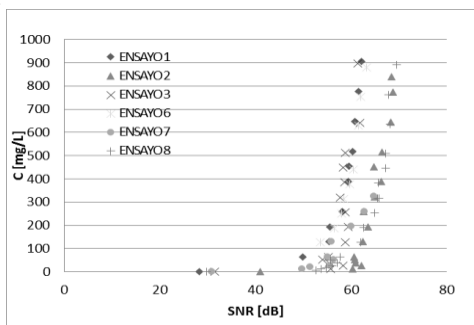


Figura 4,- Curva que relacionan SNR (ADCP en modo Coherente) y la Concentración de sedimentos en suspensión

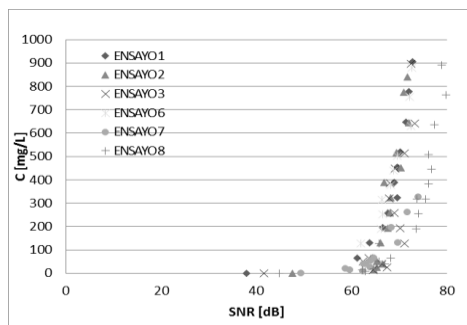


Figura 5,- Curva que relacionan SNR (ADCP en modo Incoherente) y la Concentración de sedimentos en suspensión

Comparando los resultados del modo coherente con el incoherente se encontró que para una misma concentración el SNR del incoherente es mayor que el del modo coherente, entre un 7 y 21% más alto, Esto ocurrió en todos los ensayos, como se puede observar en la tabla 1

Tabla 1,- Relación promedio entre el SNR del modo incoherente y el coherente

Relación entre valores de SNR registrados con ADCP en modos Incoherente y Coherente				
Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 6	Ensayo 7
1,19	1,07	1,19	1,15	1,21

Conclusiones

Los resultados del ADV demuestran que la correlación tanto de la relación señal ruido como de la amplitud con la concentración de sedimentos en suspensión es buena, estando representada por una relación logarítmica con una pendiente aproximada de 0,11. De esta manera el ADV es una herramienta útil para medir los sedimentos en suspensión, al menos en laboratorio, ya que para varios ensayos los resultados pudieron repetirse con una misma tendencia,

Con respecto a los resultados con ADCP en el tanque de agua puede decirse que el ADCP YSI/S5 de 3Mhz es muy sensible a pequeñas variaciones de concentración de sedimentos, el cual se ve con un importante aumento de la relación SNR para bajas concentraciones. A medida que se aumenta la concentración la relación SNR presenta cada vez una menor variación debido a que la señal acústica se atenúa. Sin embargo resulta necesario seguir experimentando con este instrumento, estudiando el comportamiento frente al cambio de otras variables, como el tamaño de sedimento, el voltaje del instrumental durante la medición, la temperatura del agua, etc,

Referencia Bibliográfica

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), 04014023,

SonTek (2010) "RiverSuveyor S5/M9 System Manual", *Manual del usuario para la operacion de ADCP S5/M9*

ANEXO