

**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)**

INFORME TÉCNICO FINAL – PRÁCTICA SUPERVISADA

Carrera de Ingeniería Civil

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Autor: SANDOVAL MANUEL ALEJANDRO

Tutor: CARLOS MARCELO GARCÍA RODRÍGUEZ

Supervisores Externos: HEREDIA LIGORRIA ANA INÉS

JOSÉ MANUEL DÍAZ LOZADA

Agradecimientos:

A toda mi familia, mi novia y su familia, a mis amigos de la provincia de Chubut Gerardo Villagra, Mario Godoy y Cristían Sobarzo; a mis compañeros/amigos de la facultad Federico Matzenbacher, Oreste Gioda, Leonardo Matwiczky, Guillermo Guerra, Guillermo Bobone, Paredes Jeremías, Francisco Cassani, Martin Amato (T), Rodrigo Romero (T), Francisco Mortara, Marcela Alvarado, Daiana Loperena y Aldana R. Masín.

Al Dr. Ing. Carlos Marcelo García Rodríguez por el tiempo dedicado y su ayuda.

Al Ing. José Manuel Díaz Lozada por su colaboración, correcciones y consejos.

Al Ing. Nicolás Federico Guillén por conectarme con el grupo de Hidráulica para el desarrollo de la Práctica Supervisada y la colaboración al Doctorado de la Ing. Heredia Ligorria Ana Inés.

Al Ing. Vaschalde Tomás por sus consejos y enseñanzas para poder salir adelante con la presentación de la PS.

A la Ing. Heredia Ligorria Ana Inés por su atención, colaboración, paciencia y ayuda durante todo el desarrollo de la PS.

A los demás integrantes del Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA) por compartir el espacio.

Título del trabajo: 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).

Nombre del Autor: Sandoval Manuel Alejandro

Matricula: 29.733.501

Carrera: Ingeniería Civil

Plan: 2005

Palabras claves: Transporte de sedimentos, ADCP, ADV.

Resumen:

El Río Ctalamochita (río Tercero) es uno de los principales ríos de la provincia de Córdoba con un módulo de 27 m³/s que recorre la provincia desde el Noroeste hacia el Sureste. Este río nace en el embalse de río Tercero en las cercanías de la localidad de Embalse al pie de las Sierras de Córdoba. Luego del Embalse de Río Tercero, el río es aprovechado para diversos fines mediante los embalses Cassafouth, Reolin y Piedras Moras. A partir del embalse Piedras Moras, el río toma características de río de llanura.

En los últimos años se ha observado que durante los eventos de crecida del río Tercero se producen importantes erosiones en el lecho y las márgenes, provocando daños y perjuicios a los ciudadanos de 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 existente, alterando también los niveles de inundación. Por estos diversos fenómenos se decide estudiar la dinámica del transporte de sedimentos en este curso fluvial de la provincia de Córdoba.

Debido a la falta de información sobre la cantidad de sedimentos que transportan los ríos de Córdoba y en especial el río Ctalamochita, se comenzó a trabajar en esta tesis en una metodología que permitiera estimar la cantidad de sedimentos en suspensión y de fondo a partir de instrumentos acústicos. Estos son el Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP) SonTek S5, y el Micro ADV SonTek. Para estimar el

transporte en suspensión se realizaron ensayos de laboratorio comparando la concentración de sedimentos de granulometría conocida con el valor SNR (relación señal ruido por sus siglas en inglés) medido por los dos instrumentos acústicos. Para el transporte de fondo se realizaron mediciones de campo con el ADCP y mediciones con estimadores convencionales de transporte de fondo. Además se complementó con extracción de muestras del material del cauce en la sección de estudio para definir la distribución granulométrica de ese material.

Finalmente se obtuvieron como resultado un conjunto de curvas de calibración SNR-CSS (concentración de sedimentos en suspensión) para cada instrumento acústico utilizado. El trabajo realizado en campo permitió estimar una velocidad de fondo móvil (V_{mb}) característica del transporte de fondo y la caracterización del material del lecho del río Tercero, pudiendo definir el D_{50} (diámetro medio de las muestras).

CONTENIDO

CAPÍTULO 1: MARCO REFERENCIAL.....	14
1.1 INTRODUCCIÓN	14
1.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA EN ESTUDIO	16
1.3 PROBLEMÁTICA PRESENTE	19
1.4 ANTECEDENTES EN LA TEMÁTICA	19
1.5 OBJETIVOS.....	23
1.5.1 Objetivo General	23
1.5.2 Objetivos Particulares	23
1.6 METODOLOGÍA DE TRABAJO EMPLEADA	24
CAPÍTULO 2: CONCEPTOS BASICOS DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS ...	27
2.1 INTRODUCCIÓN:.....	27
2.2 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	27
2.3 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE SEDIMENTOS CLÁSICOS	29
2.3.1 Estimadores de Transporte en Suspensión	33
2.3.2 Estimadores de transporte de fondo	34
2.4 NUEVOS MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE SEDIMENTOS.....	35
2.4.1 Turbidímetro.....	35
2.4.2 Difracción láser (LISST)	36
2.4.3 Instrumentos ópticos multifrecuencia	37
2.4.4 Imágenes ópticas digitales	38
2.4.5 Diferencia de presiones.....	39
2.4.6 Sensores Acústicos.....	40
2.5 PERFILADOR DE CORRIENTE ACÚSTICO DOPPLER (ADCP).....	42

2.5.1 Principio de funcionamiento del ADCP	42
2.5.2 Programa Computacional: RiverSurveyor Live	44
2.6 VELOCÍMETRO ACÚSTICO DOPPLER (ADV)	45
CAPÍTULO 3: TRABAJO DE LABORATORIO	47
3.1 INTRODUCCIÓN:	47
3.2 METODOLOGÍA DEL TRABAJO DE LABORATORIO	47
3.2.1 Tareas Previas a la Medición	47
3.2.2 Tareas durante el Ensayo	49
3.2.3 Tareas después del Ensayo	51
CAPÍTULO 4: RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO	53
4.1 INTRODUCCIÓN	53
4.2 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TANQUE CON EL ADV	53
4.3 RESULTADOS ENSAYO DE TANQUE CON EL ADCP	58
4.4 COMPARACIÓN DE RESULTADOS ADV vs ADCP	65
CAPÍTULO 5: TRABAJO DE CAMPO	68
5.1 INTRODUCCIÓN:	68
5.2 LOCALIZACIÓN	68
5.3 PUNTOS DE MEDICIÓN	69
5.4 PREPARACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS	70
5.5 METODOLOGÍA DE MEDICIÓN	71
5.5.1 Metodología de Medición con ADCP	71
5.5.2 Metodología de Medición con Muestreadores de Sedimento en Suspensión	73
5.5.3 Metodología de medición con la trampa Halley-Smith	73
5.5.4 Metodología de medición para el material de fondo	74

CAPÍTULO 6: RESULTADOS DE TRABAJO DE CAMPO.....	76
6.1 INTRODUCCIÓN:.....	76
6.2 ANÁLISIS GRANULOMETRICO	76
6.3 MEDICIONES CON EL ADCP (caudal, estacionarios, smba, y loop).....	80
6.3.2 Mediciones Estacionarias.....	81
6.3.3 Método SMBA	83
6.3.4 Método LOOP	86
6.4 CONCLUSIONES DE LAS MEDICIONES CON ADCP:.....	87
6.5 MEDICIÓN DE TRANSPORTE DE FONDO CON LA TRAMPA TIPO HALLEY-SMITH.....	88
6.6 RESULTADOS DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN.....	88
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	91
7.1 CONCLUSIONES	91
7.2 RECOMENDACIONES.....	93
REFERENCIAS.....	94
ANEXO.....	97
CURSO “Using ADCPs in Moving Bed Conditions”	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Río Tercero o Ctalamochita en de la provincia de Córdoba.....	16
Figura 2: Cuenca del Rio Tercero (Lenarduzzi 2013).....	17
Figura 3: Cuenca del Rio Carcarañá (Díaz Lozada 2014).....	18
Figura 4: Complejos hidroeléctricos ubicados en la cuenca alta del río Tercero (Díaz Lozada 2014).	18
Figura 5: Perfil completo del transporte de sedientos.	28
Figura 6: Tabla clasificación de la carga total de sedimentos.	28
Figura 7: Transporte de sedimentos, arrastre por fondo.	28
Figura 8: Transporte de sedimentos, por saltación.	29
Figura 9: Transporte de sedimentos, por suspensión.	29
Figura 10: Muestreador de sedimentos en suspensión integrado.....	30
Figura 11: Muestreadores manuales.....	31
Figura 12: Muestreadores automáticos.	31
Figura 13: Muestreador por arrastre de fondo.....	32
Figura 14: Muestreadores automáticos por arrastre de fondo.....	32
Figura 15: Partes del estimador de transporte en suspensión tipo DH-48.	33
Figura 16: Estimador de transporte en suspensión tipo DH-48.	34
Figura 17: Estimador de transporte de fondo tipo Halley - Smith.	34
Figura 18: Dimensiones del estimador de transporte de fondo tipo Halley - Smith.	35
Figura 19: Turbidímetro.....	36
Figura 20: Estimador de sedimentos, difracción láser (LISST).....	37
Figura 21: Instrumento óptico multifrecuencia.....	38
Figura 22: Estimador de sedimentos, Imágenes ópticas digitales.....	38
Figura 23: Estimador de sedimentos por diferencia de presiones.....	39

Figura 24: Sensores acústicos de retrodispersión.....	40
Figura 25: Perfil de concentración de sedimentos.....	41
Figura 26: Plataforma móvil con dispositivo ADCP.	41
Figura 27: Metodología del instrumento fijo - ADV horizontal en campaña.....	42
Figura 28: Descripción del instrumento utilizado (Sontek, 2013).....	43
Figura 29: Interfaz del programa RiverSurveyor.....	44
Figura 30: Suelo de ciudad universitaria y tamices utilizados.	48
Figura 31: Balanza electrónica.	48
Figura 32: Vasos testigos.	48
Figura 33: Tanque de fibrocemento con los instrumentos: ADCP y ADV.....	49
Figura 34: Notebook para medición con ADCP y Pc de escritorio para medición con ADV.....	50
Figura 35: Conjunto completo para las mediciones en laboratorio-planta con corte del tanque y dispositivos.	50
Figura 36: Curva que mejor ajusta relación Log C-SNR del ADV.	56
Figura 37: Curva que mejor ajusta relación Log C-Amplitud .de ADV.....	56
Figura 38: Curva Log C-SNR del ADV según granulometría.	57
Figura 39: Curva Log C-Amplitud del ADV según granulometría.	58
Figura 40: Curva que mejor ajusta relación Log C-SNR del ADCP para el modo coherente.	63
Figura 41: Curva que mejor ajusta relación Log C-SNR del ADCP para el modo incoherente.....	63
Figura 42: Curva que mejor ajusta la relación C-SNR del ADCP para el modo coherente, según granulometría.....	64
Figura 43: Curva que mejor ajusta la relación C-SNR del ADCP para el modo incoherente, según granulometría.....	64

Figura 44: Curva SNR del ADV- SNR del ADCP para el modo coherente.....	66
Figura 45: Curva SNR del ADV- SNR del ADCP para el modo incoherente.	66
Figura 46: Imagen satelital del puente Alberdi, en la localidad de Villa María.....	69
Figura 47: Sección de medición en río Tercero, aguas abajo del puente Alberdi.....	69
Figura 48: Puntos de medición-Estacionario/SMBA.....	70
Figura 49: Calibración de la brújula del GPS del ADCP.....	71
Figura 50: Preparación de los instrumentos para campaña.	71
Figura 51: Ubicación del ACP en una medición estacionaria.	72
Figura 52: Medición con el muestreador DH - 48.....	73
Figura 53: Medición de fondo con baldes.....	74
Figura 54: Curvas granulométricas.	80
Figura 55: Batimetría y perfil de velocidades de la sección medida en campaña.	81
Figura 56: Perfil de velocidades con el punto 3 a 15m de la orilla.....	82
Figura 57: Perfil de velocidades con el punto 3 a 17m de la orilla.....	82
Figura 58: Captura de pantalla del SMBA 114915.	83
Figura 59: Imagen de transecta 115551 de la sección del río.....	84
Figura 60: Imagen de transecta 120300 de la sección del río.....	84
Figura 61: Imagen de transecta 120926 de la sección del río.....	85
Figura 62: Perfil de velocidades con el punto 3 a 15m de la orilla.....	85
Figura 63: Imagen del método Loop en la sección de medición.....	86
Figura 64: Velocidades resultantes - método Estacionario, SMBA y Loop Method.....	87
Figura 65: Medición de sedimentos en suspensión – Trampa DH - 48.....	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características ADCP RiverSurveyor S5 (Sontek, 2013).	44
Tabla 2: Tabla resumen de ensayos.	49
Tabla 3: Resultados ADV ensayo N°1 (suelo pasante T200). El SNR y la AMP del ADV están en dB.	53
Tabla 4: Resultados ADV ensayo N°2 (suelo pasante T200). El SNR y la AMP del ADV están en dB.	54
Tabla 5: Resultados ADV ensayo N°3 (suelo pasante T200). El SNR y la AMP del ADV están en dB.	54
Tabla 6: Resultados ADV ensayo N°6 (arcilla). El SNR y la AMP del ADV están en dB.	55
Tabla 7: Resultados ADV ensayo N°9 (suelo pasante T100 y retenido T200). El SNR y la AMP del ADV están en dB.....	55
Tabla 8: Funciones ajuste para el ADV.	58
Tabla 9: Resultados ADCP ensayo N° 1 (suelo pasante T200). El SNR del ADCP está en dB.....	59
Tabla 10: Resultados ADCP ensayo N° 2 (suelo pasante T200). El SNR del ADCP está en dB.....	59
Tabla 11: Resultados ADCP ensayo N° 3 (suelo pasante T200). El SNR del ADCP está en dB.....	60
Tabla 12: Resultados del ADCP ensayo N° 6 (arcilla). El SNR del ADCP está en dB. .	60
. Tabla 13: Resultados del ADCP ensayo N° 7 (suelo pasante T100 y retenido T200). El SNR del ADCP está en dB.....	61
Tabla 14: Resultados del ADCP ensayo N° 8 (suelo pasante T100 y retenido T200). El SNR del ADCP está en dB.....	61
Tabla 15: Resultados del ADCP ensayo N°9 (suelo pasante T100 y retenido T200). El SNR del ADCP está en dB.....	62

Tabla 16: Funciones de ajuste de los ensayos con ADCP - Coeficiente R2.	65
Tabla 17: Relación promedio entre SNR modo coherente y SNR modo incoherente del ADCP.	65
Tabla 18: Material de fondo a 2m de la margen izquierda, tamizado vía Húmeda.....	77
Tabla 19: Material de fondo a 8m de la orilla, tamizado en seco.....	77
Tabla 20: Material de fondo a 16m de la margen izquierda (punto 3), tamizado vía Húmeda.....	78
Tabla 21: Material de fondo a 24m de la margen izquierda, tamizado vía Húmeda.	78
Tabla 22: Material de fondo a 24m de la margen izquierda. Tamizado en seco.	78
Tabla 23: Porcentajes pasantes de tamizados según distancia a la margen izquierda.	79
Tabla 24: Granulometría promedio de la campaña 23/10/2015 y granulometría del trabajo Díaz Lozada 2014.	79
Tabla 25: Velocidades Vmb y promedio según método estacionario.	82
Tabla 26: Velocidades Vmb y promedio según método SMBA.	86
Tabla 27: Análisis de muestras de campaña con trampa tipo Halley-Smith.....	88

Capítulo 1:

MARCO

REFERENCIAL

CAPÍTULO 1: MARCO REFERENCIAL

1.1 INTRODUCCIÓN

El río Ctalamochita, también conocido como río Tercero, es uno de los principales cursos fluviales de la provincia de Córdoba, Argentina con un módulo de 27 m³/s, que recorre la provincia desde el Noroeste hacia el Sureste. Este río nace en el embalse de río Tercero en las cercanías de la localidad de Embalse al pie de las Sierras de Córdoba. Luego del Embalse de Río Tercero, el río es aprovechado para diversos fines mediante los embalses Cassaffouth, Reolin y Piedras Moras. A partir del embalse Piedras Moras, el río toma características de río de llanura.

En los últimos años se ha observado que durante los eventos de crecida del río Tercero se producen importantes erosiones en el lecho y las márgenes, provocando daños y perjuicios a los ciudadanos de 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. 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 y desde el año 2012 se cuantifican además los caudales superficiales escurridos en el río y en sus principales afluentes. Sin embargo, hasta la actualidad no se han realizado en el sistema estudios de transporte de sedimentos en forma sistemática y precisa.

Debido a la falta de información sobre la cantidad de sedimentos que transportan los ríos de Córdoba y en especial el río Ctalamochita, se comenzó a estudiar la dinámica del transporte de sedimentos en este curso fluvial, proponiendo una metodología que permitiera caracterizar experimentalmente el transporte de sedimentos en suspensión y de fondo a partir de dos instrumentos acústicos (un Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP) y un Velocímetro Acústico Doppler, ADV por sus siglas en inglés) como alternativa a las técnicas de medición convencionales, las cuales tienen una baja resolución espacial y temporal, pueden resultar costosas y además requieren tiempos prolongados de medición y procesamiento de muestras. Es así que distintos grupos de

investigación a nivel mundial están evaluando el uso de instrumentos acústicos como nuevo método de estimación del transporte de sedimentos, adaptando la tecnología hidro-acústica Doppler (utilizada para la medición de caudales en sistemas fluviales) para obtener información cuantitativa sobre el movimiento de las partículas en los cursos fluviales (Latosinski, 2014), en sus dos modos de transporte: en suspensión y de fondo.

La caracterización de sedimentos en suspensión utilizando instrumentos acústicos ha sido descrito y desarrollado durante numerosas 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 la variable acústica con la concentración usando una regresión lineal (en unidades logarítmicas de decibeles), donde también intervienen otras 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. Por otra parte, el estudio del transporte de fondo con tecnología acústica ha sido llevado a cabo en grandes ríos por Rennie et al. (2002, 2004), Kostaschuk et al. (2005), Villard et al. (2005), quienes correlacionaron la carga 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. Es así que esta metodología se aplica en grandes ríos de arena para evaluar el transporte de sedimentos de fondo. El transporte de sedimentos en suspensión de fondo fue estudiado por Szupiany et al. (2009), Jamieson et al. (2011), Guerrero et al. (2012), Latosinski et al. (2014), relacionando la concentración de sedimentos en suspensión de fondo con la intensidad de la señal acústica obtenida con el ADCP, con resultados prometedores.

Repasando los antecedentes en la temática se ve que no se han realizado estudios del transporte de sedimentos en ríos de lecho arenoso de baja profundidad utilizando el instrumento ADCP SonTek RiverSurveyor S5. Es por ello que se comenzó a trabajar en

una metodología que permitiera estimar la cantidad de sedimentos en suspensión y de fondo a partir de la información obtenida con este instrumento. Para estimar el transporte en suspensión se realizaron ensayos de laboratorio comparando la concentración de sedimentos de granulometría conocida con el valor SNR (relación señal ruido por sus siglas en inglés) medido por los dos instrumentos acústicos. Para el transporte de fondo se realizaron mediciones de campo con el ADCP y mediciones con estimadores convencionales de transporte de fondo. Además se complementó con extracción de muestras del material del cauce en la sección de estudio para definir la distribución granulométrica de ese material.

1.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA EN ESTUDIO

El río **Ctalamuchita** es uno de los principales ríos de la provincia de Córdoba, Argentina, conocido también como río Tercero. Recorre la provincia desde el Noroeste hacia el Sureste desembocando en uno de los brazos del río Paraná, el Coronda. En la figura 1 se ve su ubicación dentro de la provincia de Córdoba (Wikipedia, 2016).

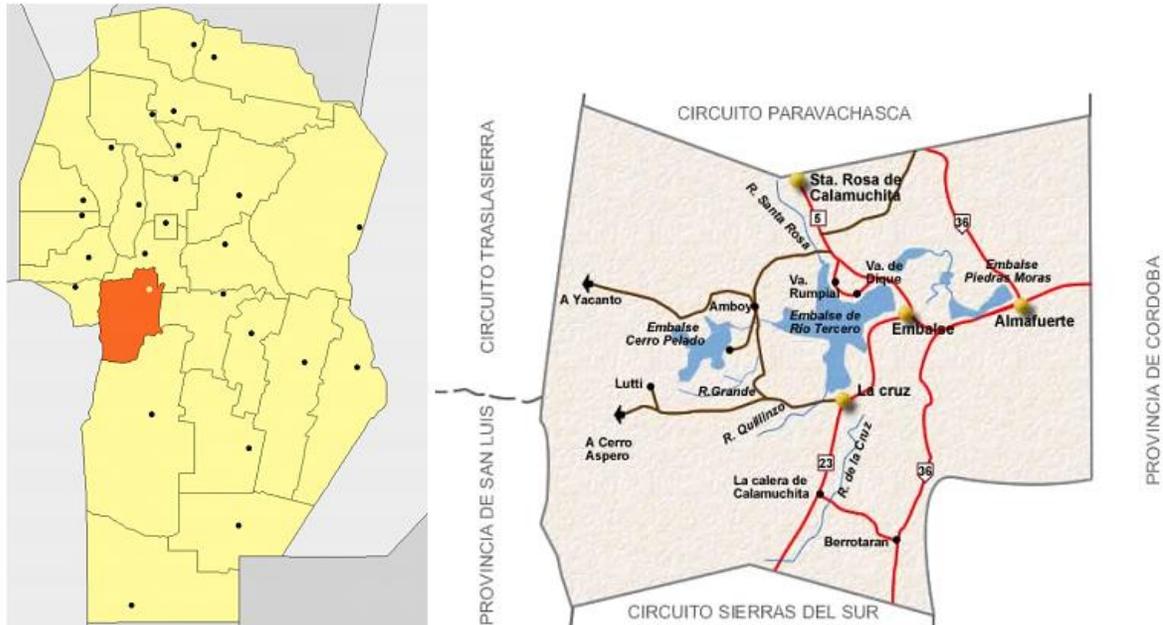


Figura 1: Río Tercero o Ctalamuchita en de la provincia de Córdoba.

El río Tercero o Ctalamochita tiene en sus riberas, o en sus proximidades, algunas importantes ciudades de la provincia de Córdoba como Embalse, Río Tercero, Villa María y Villa Nueva, así como las ciudades de Bell Ville y Leones entre otras. La actividad principal de esta zona es la agricultura. La longitud aproximada de este río (sin contar su continuación en el Carcarañá) es de aproximadamente 307 km, teniendo un caudal medio de 26,94 m³/s (Barchiesi, 2014).

La cuenca del río Tercero o Ctalamochita (figura 2), uno de los principales tributarios del río Carcarañá, constituye un sistema de alimentación pluvial con régimen permanente. Los principales afluentes que aportan a la subcuenca del Río Tercero (Ctalamochita) (figura 3) enunciados de norte a sur, son el río Santa Rosa, arroyo Amboy, río Grande, río Quillinzo 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.

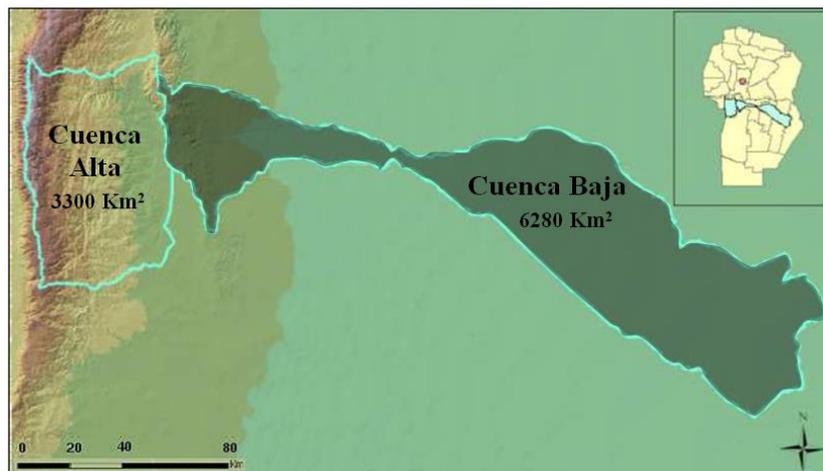


Figura 2: Cuenca del Río Tercero (Lenarduzzi 2013).

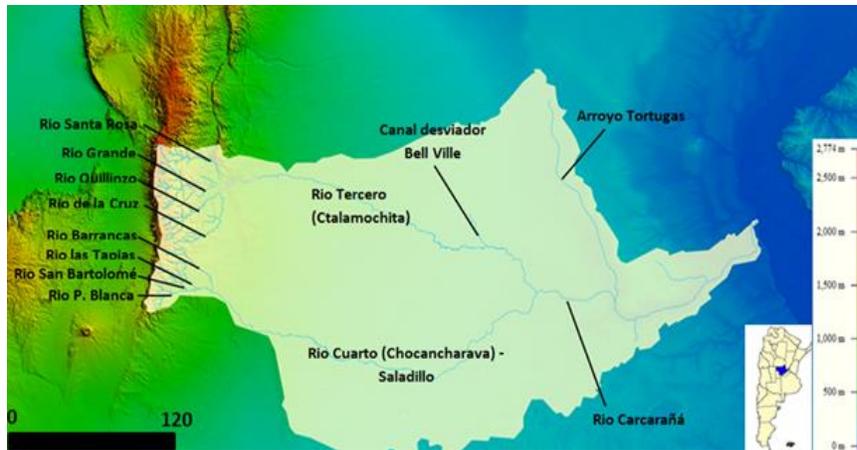


Figura 3: Cuenca del Río Carcaraña (Díaz Lozada 2014).

La cuenca alta del río Tercero es explotada hidroeléctricamente a través de dos sistemas (figura 4). Por un lado, el complejo Río Grande, conformado por los embalses Cerro Pelado y Arroyo Corto; y por el otro, el sistema llamado Río Tercero, constituido por los embalses: Río Tercero, Ingeniero Cassaffousth, Ingeniero Benjamín Reolín y Piedras Moras. Este último actúa como regulador y condiciona el caudal escurrido en el río Tercero y en el río Carcaraña. A partir de la localidad de Almafuerce (Córdoba), el río toma características de llanura hasta la confluencia con el río Saladillo.



Figura 4: Complejos hidroeléctricos ubicados en la cuenca alta del río Tercero (Díaz Lozada 2014).

Se escogió el río Tercero para el desarrollo de este trabajo porque además de ser el más caudaloso de la provincia y estar ligado a la producción de energía hidroeléctrica, en los últimos años se han producido crecidas que causaron numerosos daños a la producción agrícola y a los habitantes de las ciudades aledañas. Estos caudales altos fueron acompañados de importante movimiento de material, que causó erosión de margen, de lecho y posteriores deposiciones.

1.3 PROBLEMÁTICA PRESENTE

Como se mencionó previamente, la mayor cantidad de movimiento de material se dan eventos de crecida. En estos casos la medición de transporte de sedimentos con las técnicas convencionales resulta difícil, insegura, y prácticamente imposible, apareciendo las tecnologías acústicas utilizadas comúnmente para medir la velocidad del agua como alternativa ante esta problemática. Con instrumentos acústicos como el ADV y el ADCP, que utilizan el efecto Doppler, se podría estimar el transporte de sedimentos en suspensión y de fondo del río Tercero, pudiendo crear una base de datos no sólo de caudal líquido sino también de caudal sólido.

Es así que el fin de esta práctica supervisada es realizar con mediciones de campo y de laboratorio una metodología simple y segura de estimación de transporte de sedimentos en suspensión y de fondo con dos instrumentos acústicos utilizados para medir la velocidad de flujo. Estos instrumentos son el Micro ADV SonTek (Velocímetro Acústico Doppler) y el ADCP SonTek S5 (Perfilador de Corriente Acústico Doppler).

1.4 ANTECEDENTES EN LA TEMÁTICA

Como se mencionó anteriormente, el estudio del transporte de sedimentos con instrumentos acústicos ha sido desarrollado desde hace varias décadas, ya que se encontró que la magnitud de la señal de rebote acústico (“backscatter” por su designación en inglés) está relacionada a la concentración y el tamaño del sedimento en suspensión (Thorne et al., 1991). Sin embargo, la transformación de la señal acústica a concentración tiene considerable incertidumbre asociada. En un principio la mayoría de los investigadores relacionaba la variable acústica con la concentración

utilizando técnicas empíricas, mediante un conjunto de ensayos de calibración, generalmente en tanques de laboratorio usando diferentes diseños, tipo y tamaño de sedimentos. Por otro lado, el rebote acústico producido por los sedimentos también puede ser descrito teóricamente si se conocen las variables suficientes, que esta ha sido otra corriente de investigación, a partir de la llamada “ecuación del sonar”. Dentro del primer grupo, en 1893 Hay descubrió la detección acústica de sedimentos en suspensión en longitudes de onda largas, presentando los resultados experimentales una relación lineal entre la amplitud promediada en el tiempo de la envolvente del pulso acústico a 192 kHz y la raíz cuadrada de la concentración del sedimento en suspensión, en el rango de 10-103 mg/L. Estas mediciones se realizaron en un penacho, en un canal submarino a una profundidad de 60 a 90m en Rupert Inlet. British Columbia, Canadá. Thorne et al. realizó en 1991 experimentos en una torre de sedimentos, midiendo con un hidrófono en la parte superior de la torre la atenuación de la señal por la propagación a través del agua, y con un sensor acústico de 3MHz de frecuencia colocado en la base el rebote acústico. También realizó una segunda calibración utilizando un sistema de rebote acústico que operaba a diferente frecuencia (5,65 Mhz). Estas calibraciones demostraron que es posible obtener información de la concentración de sedimentos a partir de los niveles de rebote acústico medidos con los instrumentos. Determinó que si la concentración de sedimentos es alta, habrá una atenuación significan debido a la absorción de los sedimentos y que para altas frecuencias la atenuación del sonido por el agua se vuelve importante. Hay y Sheng trabajaron en 1992 con el objetivo de utilizar la información del rebote acústico con diferentes frecuencias (1, 2,5 y 5 Mhz) para obtener simultáneamente perfiles verticales de concentración de arena en suspensión y el tamaño medio del sedimento. Sus resultados demostraron que esto es posible, con una diferencia dentro del 10% entre la concentración media estimada acústicamente y la determinada con un sensor óptico. Por otro lado, las estimaciones acústicas de tamaño de los sedimentos se encontraron dentro de 5-20 % del real. En 1994 Lynch y otros investigadores emplearon dos métodos diferentes para estimar el tamaño medio de las partículas. En primer lugar, utilizaron perfiles de intensidad de dispersión verticales (acústicas y ópticas) para inferir el tamaño medio de las partículas utilizando un modelo de perfil Rouse de capa límite y

una de caída de la ley de Stokes para la velocidad. En segundo lugar, se utilizó una combinación óptica y acústica, con dos frecuencias, para determinar el tamaño medio de partícula. Estos resultados se compararon con las observaciones de un instrumento que aplica la técnica de difracción láser (LISST), y también se hicieron experimentos en un tanque de laboratorio, con buenos resultados. Thorne y Hardcastle, en 1997, evaluaron la exactitud de las mediciones acústicas por comparación directa con muestras por bombeo in situ, tomadas simultáneamente en el estuario del río Taw, Reino Unido y pudieron evaluar la consistencia de la técnica acústica multifrecuencia, llegando a la conclusión de que la señal de 5Mhz presentaba dificultades para altas concentraciones, mientras que la de 1 y 2,5 Mhz fueron más razonables. Holdaway et al. realizaron en 1999 un análisis del rebote acústico de mediciones con un ADCP de 1MHz de frecuencia, para evaluar el potencial de este instrumento para medir la concentración de sedimentos en suspensión cuantitativamente. Los datos se reunieron durante una campaña de monitoreo de agua en el río Mersey, en el que se utilizó un ADCP, transmisiómetros ubicados en el lecho y botellas muestreadoras in situ. La señal de retorno del ADCP fue calibrada con los datos de los muestreadores y luego con esa calibración se crearon series temporales de partículas en suspensión, con resultados comparables a las observaciones de los transmisiómetros. En 2004 Gartner evaluó el uso de dos ADCP de diferentes frecuencias (1200 y 2400 kHz) para determinar la concentración de sólidos en suspensión en la Bahía de San Francisco, California. El rebote acústico de los ADCPs fue calibrado usando información óptica. La estimación acústica de sedimentos en suspensión (cohesivos y no cohesivos) estuvo entre el 8 y 10 % de aquellos estimados con el sensor óptico. Por otro lado Wall en 2006 mostro que si bien el ADCP no está diseñado para medir la concentración de sedimentos en suspensión, se puede utilizar como un sustituto bajo ciertas condiciones ambientales. Sin embargo, el software para tal cálculo es limitado, y se necesita un considerable post-procesamiento para corregir y normalizar los datos del ADCP para ello. Gray y Gartner (2010) hicieron una recopilación de los muestreadores de sedimentos en suspensión convencionales utilizados comúnmente junto con las nuevas tecnologías de estimación de sedimentos, apareciendo la técnica acústica, los turbidímetros, el uso de difracción láser, entre otros; el cual fue completado en 2014 por

Gray y Landers. En 2011 Guerrero, Szupiany, y Amsler analizaron diferentes métodos de estimación acústica de sedimentos. Usaron dos ADCPs Teledyne RD de 600 y 1200 kHz de frecuencia acústica midiendo simultáneamente en la misma columna de agua para investigar la concentración de sedimentos en suspensión y la distribución del tamaño de grano en cuatro secciones del río Paraná, en Argentina. Los resultados preliminares de concentración y distribución del tamaño de grano fueron consistentes con los resultados de los otros métodos. Topping, y los otros autores en 2015 analizaron los datos de 12 años de medición en el río Colorado, Estados Unidos y desarrollaron un método para medir concentración de sedimentos en suspensión y tamaño de grano utilizando matrices multifrecuencia de perfiladores acústicos Doppler, llegando a resultados que si bien eran menos precisos que con los muestreadores tradicionales resultaron mejor que los muestreadores por bombeo o utilizando una única frecuencia acústica. Además el método presentó algunas ventajas como más económico, menor tiempo de medición, y mayor resolución temporal. Por último Wood et al. en 2015 han evaluado el uso de la señal acústica como alternativa para estimar la concentración de sedimentos en suspensión en forma continua en tres puntos del río Kootenai, en Canadá. Se utilizaron perfiladores acústicos horizontales (ADVM) de 1,5 y 3 Mhz de frecuencia y muestreadores de sedimentos en suspensión obteniendo buenos ajustes, llegando a la conclusión de que la tecnología acústica en una forma efectiva de obtener estimaciones continuas y precisas de carga y sedimentos en suspensión para monitoreos de sedimentos.

Respecto al transporte de fondo, en 2002 Rennie y otros autores correlacionaron la velocidad de fondo aparente estimada con ADCP con la medida con estimadores convencionales, encontrando una importante variación, adjudicada a la gran variabilidad real del transporte de sedimentos y a errores de medición. Realizaron sus estudios en el río de gravas Fraser, en Canadá, utilizando un ADP SonTek de 1,5 MHz. En el trabajo de 2004 compararon la velocidad de fondo estimada con el ADCP con el transporte de fondo, concluyendo que esta relación es función del lugar y el tamaño del material de fondo, y que se ve afectada también por las características del ADCP utilizado, en particular ADCP que operan con frecuencias bajas tendrán menor atenuación de la señal y pueden ser capaces de penetrar a través de la capa de

transporte de fondo a la capa estable. En 2005 Kostaschuk et al. utilizaron en campo dos ADCP SonTek de 1,5 y 0,5 MHz y estudiaron el cálculo de la velocidad del flujo con estos instrumentos, y su aplicación a la estimación del transporte de suspensión y de fondo a través de estas mediciones, reconociendo entre las ventajas de esta técnica que no es intrusiva y la buena resolución espacial y temporal, que permite describir estructuras y patrones de sedimentos en suspensión. En el trabajo de 2005 de Villard et al. compararon las mediciones de velocidad aparente con un ADP SonTek de 1,5 Mhz, en el lomo de una duna de arena en el río Fraser, con las mediciones de una trampa Helley Smith y las predicciones a partir de la fórmula de Van Rijn de la carga de fondo. Estos tres métodos produjeron valores consistentes y comparables entre ellos, encontrando mayor concordancia entre las estimaciones mecánicas y acústicas, mostrando la tecnología acústica potencial para las mediciones remotas de la carga de fondo en canales de fondo de arena, superando las limitaciones de los muestreadores convencionales. Respecto a los sedimentos de fondo en suspensión, en 2011, Latosinski et al. utilizaron un ADCP RDI de 1200 kHz de frecuencia, para evaluar la concentración de sedimentos de fondo en suspensión en un brazo del río Paraná mediante el análisis de la intensidad acústica. Establecieron la correlación entre la retrodispersión corregida del ADCP y la concentración a una profundidad determinada con muestreador. Los resultados mostraron diferencias aceptables con diferencias fueron menores al 46%.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo General

El objetivo de esta Práctica Supervisada es la caracterización experimental del transporte de sedimentos de Fondo y en Suspensión en el río Ctalamochita utilizando un Perfilador de Corriente Acústico Doppler Sontek S5.

1.5.2 Objetivos Particulares

1. Recopilación de datos de la cuenca en estudio, definición de la problemática y estudio de antecedentes sobre el transporte de sedimentos.

2. Comprensión y estudio de los conceptos básicos del transporte de sedimentos en cauces aluviales.
3. Capacitación y entrenamiento en el uso de métodos experimentales para la cuantificación de transporte de sedimentos.
4. Calibración experimental de instrumentos acústicos (ADV y ADCP) para la cuantificación de sedimentos en suspensión.
5. Análisis de los resultados de los ensayos con ADV y ADCP
6. Trabajo de campo: medición con técnicas convenciones de transporte de sedimentos y con ADCP.
7. Análisis de resultados de las mediciones de campo.
8. Conclusiones del estudio realizado y recomendaciones para trabajos futuras.

1.6 METODOLOGÍA DE TRABAJO EMPLEADA

En esta práctica Supervisada se realizó una breve descripción del sitio de estudio en el capítulo N° 1, junto con el planteo la problemática del transporte de sedimentos en los ríos de Córdoba, los antecedentes en la temática y los objetivos perseguidos en el trabajo. Para poder realizar esto fue necesario incorporar conceptos propios del fenómeno del transporte de sedimentos y las técnicas de medición de sedimentos existentes, incluyendo los estimadores convencionales y las nuevas tecnologías de estimación de transporte de sedimentos, que incluye los instrumentos acústicos utilizados tanto en los trabajos de campo como los de laboratorio, que son el velocímetro acústico Doppler (ADV, por sus siglas en inglés) y el perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP). Esto se describe en el capítulo N° 2.

Una vez conocido el fenómeno y los dispositivos de medición, se procedió en el capítulo N°3 a la descripción de la metodología empleada en los ensayos de laboratorio con el tanque de sedimentos y los instrumentos acústicos ADV y ADCP. Además se comentó el procedimiento necesario para la medición, ya sea desde la preparación de las muestras, hasta la finalización del ensayo. A partir de los datos medidos se realizó un análisis de los resultados de laboratorio, obteniendo curvas de concentración de sedimentos en suspensión en función de la señal acústica, lo que se encuentra en el capítulo N° 4.

Las actividades de laboratorio se complementaron con una campaña de medición de sedimentos en el río Tercero, a su paso por la localidad de Villa María. En el capítulo N°5 se describieron la localización de la sección de medición, la metodología de medición de transporte de sedimentos de fondo y suspensión empleada con los muestreadores convencionales, y la metodología con el ADCP. Posteriormente, en el capítulo N°6 se analizaron los resultados de esta campaña, obteniendo una curva granulométrica del material de fondo del río, la velocidad de fondo móvil (V_{mb}) puntual y media de la sección, y por último la tasa de transporte de fondo estimado con la trampa Halley-Smith.

Finalmente a partir de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio y en la campaña de sedimentos realizada se presentan en el capítulo N°7 las conclusiones y recomendaciones para futuros trabajos en la temática del transporte de sedimentos utilizando instrumentos acústicos.

Capítulo 2:

CONCEPTOS BÁSICOS DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

CAPÍTULO 2: CONCEPTOS BÁSICOS DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

2.1 INTRODUCCIÓN:

En este capítulo se desarrollará el marco teórico sobre el transporte de sedimentos, los métodos tradicionales y las nuevas tecnologías de medición de sedimentos, con particular hincapié en los métodos acústicos por ser los utilizados en este trabajo. Se comentará sobre el principio de funcionamiento del ADCP como así también sobre el ADV.

2.2 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

El transporte de sedimentos en un río puede clasificarse conforme a dos criterios:

- Según el modo de transporte
- Según el origen del material

Según el modo de transporte se puede distinguir entre el *transporte en suspensión* y el *transporte de fondo*. En suspensión es aquel que viaja sostenido en el seno del flujo por la turbulencia. Puede representar el 90 % o más de todo el transporte sólido de un río y dentro de éste la carga de lavado puede ser la más importante. El transporte de fondo en cambio, tiene la mayor repercusión sobre el río mismo ya que causa sus modificaciones y es por ello el interés en la hidráulica fluvial. El transporte de fondo es aquel que viaja cercano al fondo, ya sea saltando o rodando.

Según el origen del material está la *carga de lavado* y el *material de fondo*. La carga de lavado es el sedimento fino en suspensión, generalmente se toma como la fracción de limo y arcilla del sedimento de fondo. Está relacionada con las características hidrológicas de la cuenca: tipo de suelos y cobertura, topografía, precipitaciones, etc. El origen posible de este material es la cuenca hidrográfica del río. Es un material muy fino (limos y arcillas $D < 0.0625$ mm), es transportado siempre en suspensión. El material de fondo está formado por las partículas que son más grandes que las de la carga de lavado. En la figura 5 se ven las distintas formas de transporte del sedimento:

carga de lavado en suspensión, carga de fondo temporalmente en suspensión y carga de fondo, mientras que en la figura 6 se ve la clasificación de la carga total de los sedimentos según diferentes criterios.

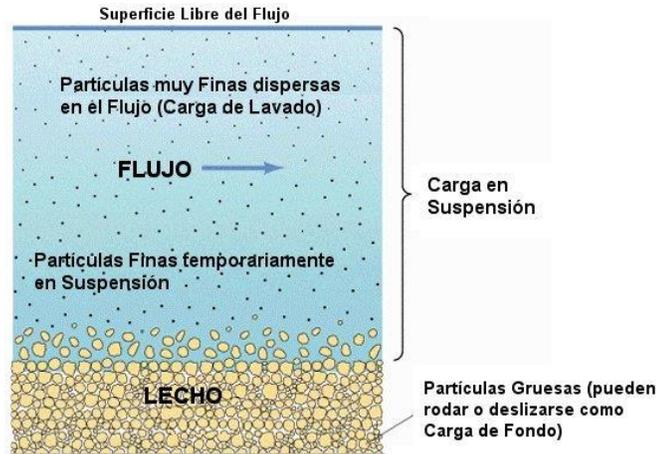


Figura 5: Perfil completo del transporte de sedimentos.

CARGA TOTAL DE SEDIMENTOS		
S/ Origen	S/ Transporte	S/ Método de Muestreo
Carga de Lavado	→ Carga en Suspensión	→ Carga en Suspensión
Carga de Material de Fondo	→ Carga de Fondo	→ Carga no Muestreada
		→ Carga de Fondo

Figura 6: Tabla clasificación de la carga total de sedimentos.

En la figura 7, figura 8 y figura 9 se ve el transporte de sedimentos según los diferentes criterios, por arrastre de fondo, transporte por saltación y transporte de sedimentos por suspensión.

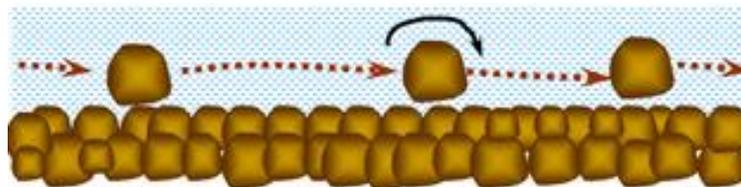


Figura 7: Transporte de sedimentos, arrastre por fondo.

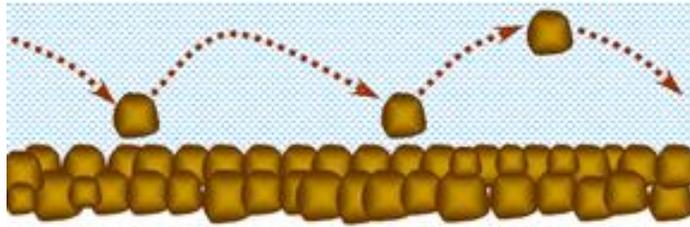


Figura 8: Transporte de sedimentos, por saltación.

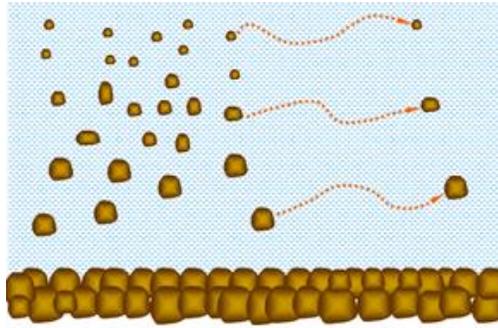


Figura 9: Transporte de sedimentos, por suspensión.

Por lo tanto, considerando las clasificaciones previas, la carga de sedimentos total será la suma del transporte de sedimento por fondo y en suspensión:

$$Q_{total} = q_{sf} + q_{ss}$$

Donde:

Q_{total}: cantidad total de sedimentos transportados

q_{sf}: cantidad de sedimentos transportados por fondo

q_{ss}: cantidad de sedimentos transportados en suspensión.

2.3 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE SEDIMENTOS CLÁSICOS

La cuantificación del caudal sólido de un río puede hacerse mediante mediciones (ya sean directas o indirectas) o con el empleo de fórmulas empíricas. Las expresiones empíricas cuantifican 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.

La medición del transporte de sedimentos depende en primer lugar del tipo de transporte que se quiera medir: en suspensión o de fondo.

Para la medición de sedimentos en suspensión se sumerge un recipiente (muestreador) como se observa en la figura 10. 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.

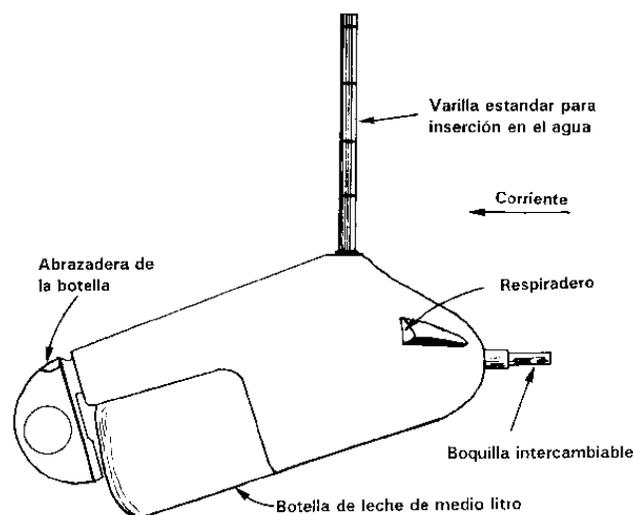


Figura 10: Muestreador de sedimentos en suspensión integrado.

Estos muestreadores pueden ser promediados en la profundidad o promediados en un punto. El muestreador-integrador obtiene una muestra única agrupando pequeñas submuestras tomadas en diferentes puntos. En la figura 11 se puede observar un muestreador típico, constituido por una botella de vidrio metida en una armadura con forma de pez que se monta sobre una varilla cuando se quiere medir la altura de corrientes pequeñas o se suspende a un cable para corrientes mayores. Para que la botella se llene fácil y regularmente cuando se encuentra por debajo de la superficie es necesario que disponga de una boca para la entrada del agua, y de un tubo para permitir la salida del aire. Cuando se está utilizando, el muestreador se desplaza desde

la superficie hasta el fondo y vuelve a la superficie recogiendo la muestra en forma continua.

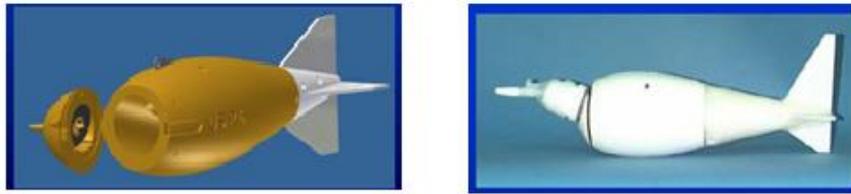


Figura 11: Muestreadores manuales.

El muestreador puntual permanece en un lugar fijo de la corriente y toma muestras constantemente durante el tiempo que tarda la botella en llenarse. La apertura y el cierre de las válvulas del muestreador se controlan desde la superficie eléctricamente o por medio de cables.

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 (se obtiene la concentración en función del tiempo), este puede observarse en la figura 12.



Figura 12: Muestreadores automáticos.

Para medir el transporte de fondo la forma más sencilla consiste en cavar un agujero en el lecho de la corriente como en la figura 13 y en 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.

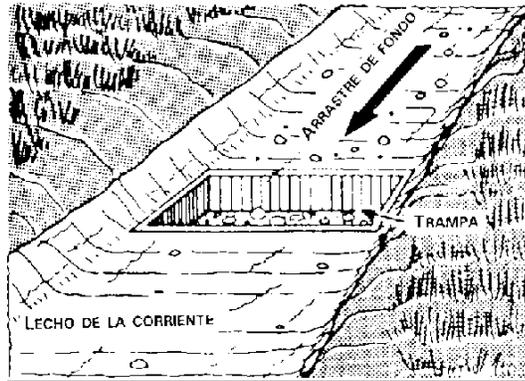


Figura 13: Muestreador por arrastre de fondo.

El cálculo del arrastre de fondo se puede efectuar a partir de muestras recogidas por un dispositivo que está situado por debajo del lecho de la corriente durante un tiempo determinado y que luego son extraídas para pesarlas. En la figura 14 se pueden ver algunos tipos de muestreadores de fondo.



Figura 14: Muestreadores automáticos por arrastre de fondo.

La medición de sedimentos con técnicas tradicionales tiene una serie de desventajas:

- Consumen mucho tiempo
- Caros
- Implican un trabajo intensivo
- Resolución espacial y temporal limitadas

Mediciones difíciles y peligrosas; Ante estos inconvenientes aparecen tecnologías alternativas para la estimación de sedimentos, que utilizan instrumentos acoplados a metodologías analíticas y operaciones que permiten la adquisición de información sobre los sedimentos.

2.3.1 Estimadores de Transporte en Suspensión

Se utilizaron estimadores manuales del tipo integrado DH-48, este mide la velocidad en un punto y luego integra la misma en toda la profundidad; las letras DH hacen referencia a depth integrated (integrado en profundidad). En la figura 15 se pueden ver las partes del dispositivo DH-48 utilizado para medir los sedimentos en suspensión.

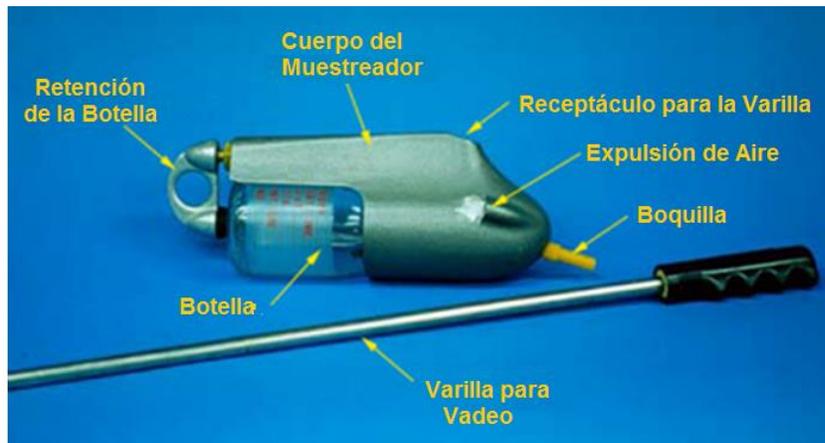


Figura 15: Partes del estimador de transporte en suspensión tipo DH-48.

La forma de utilizar este instrumento es mediante el método por vadeo, el cual consiste en seleccionar puntos equidistantes sobre una sección de canal y tomar tres muestras por punto; luego se promedian estas mediciones y se obtiene la concentración media en la vertical. En la figura 16 se ve la forma de utilizar el estimador integrado DH-48. El tiempo en que el muestreador permanece sumergido se adopta en función de la velocidad media del agua.



Figura 16: Estimador de transporte en suspensión tipo DH-48.

2.3.2 Estimadores de transporte de fondo

Para medir el transporte de fondo en el río Tercero se utilizaron trampas del tipo Halley-Smith, como se ve en la figura 17.

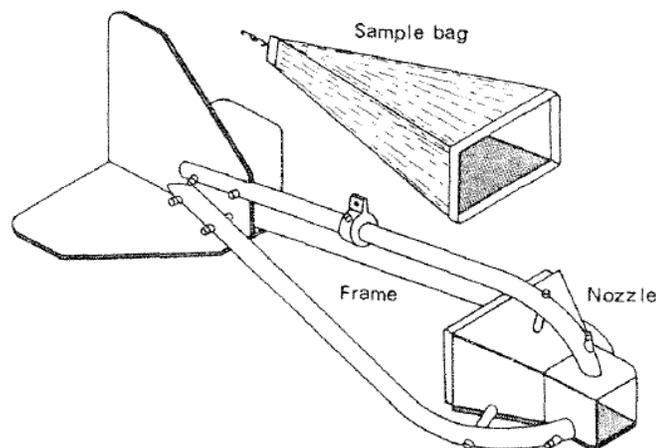


Figura 17: Estimador de transporte de fondo tipo Halley - Smith.

La metodología de trabajo de este instrumento también responde al método por vadeo, con un tiempo aproximado de muestreo de 30 segundos y un ángulo de ataque respecto al suelo de 15° . Están calibrados para velocidades de hasta 3 m/s y tamaños de partículas que van desde 2 a 10 mm. Las dimensiones del dispositivo se pueden ver en la figura 18.

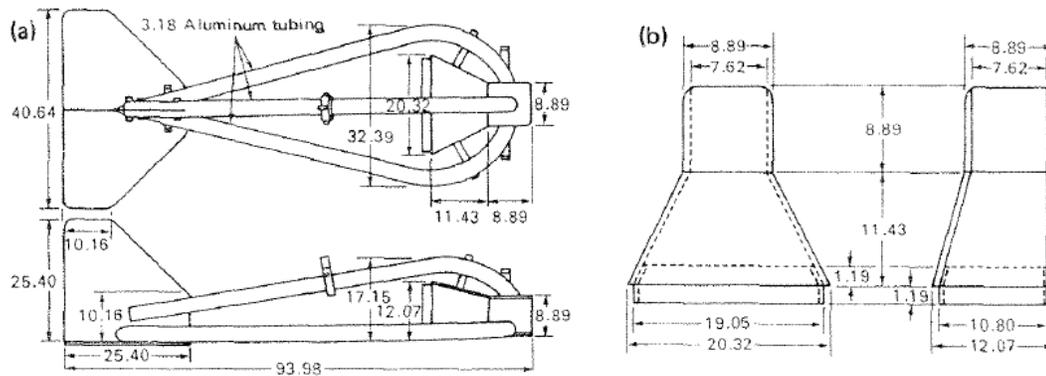


Figura 18: Dimensiones del estimador de transporte de fondo tipo Halley - Smith.

2.4 NUEVOS MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE SEDIMENTOS

Las tecnologías alternativas para la estimación de sedimentos son definidas como instrumentos acoplados a metodologías analíticas y operacionales que permiten la adquisición de información 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).

Algunos de los instrumentos y técnicas utilizados para medir la concentración de sedimentos en suspensión (CSS) como métodos alternativos son: turbidímetro, difracción laser (LISST), instrumentos ópticos multifrecuabcia, diferencia de presión, y principios acústicos.

2.4.1 Turbidímetro

Para este aparato las mediciones de turbiedad son la forma más común de determinar la claridad del agua y computar la concentración de sedimentos en suspensión (CSS), ya que 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. En la figura 19 se puede observar un turbidímetro.



Figura 19: Turbidímetro.

Los instrumentos ópticos disponibles comercialmente operan según uno o dos principios ópticos en el que los transmisiómetros usan una fuente de luz transmitida directamente al sensor. Este instrumento mide la fracción de luz que emite una fuente de luz “colimada” que alcanza al detector de luz; el cual es convertido en un coeficiente de atenuación del haz, que es relacionado al CSS. Los nefelómetros miden la luz visible o infrarroja dispersada por las partículas suspendidas (en lugar de la luz transmitida por las partículas).

Uno de los inconvenientes de este instrumento es que los sensores se pueden ensuciar con materia biológica y así alterar la curva de calibración, siendo las salidas valores extremadamente grandes; También pueden aparecer problemas cuando los niveles de turbiedad superan el límite máximo del instrumento, saturándose el sensor.

2.4.2 Difracción láser (LISST)

Los instrumentos de difracción láser 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. Se puede observar en la figura 20 el estimador de sedimentos láser LISST.



Figura 20: Estimador de sedimentos, difracción láser (LISST).

La mayor ventaja de la tecnología LISST es la medición en tiempo real y que no requieren calibración del instrumento. Sin embargo, tiene algunas limitaciones: la medición es puntual, por lo tanto requiere la estimación de la densidad del sedimento para convertir en unidades de masa el SST (sólidos totales en suspensión); Utilizado in situ es susceptible de que se tapen los sensores con material biológico (biofouling); reducción en los datos debido a la presencia de partículas no esféricas y la pérdida de información por la saturación de la señal. Finalmente, es costoso es entre dos o seis veces mayor que un equipo completo de turbiedad.

Estos instrumentos proveen a tiempo real las mediciones del tamaño de partículas y la concentración. A diferencia de los medidores de turbiedad, es inmune a los cambios en los tamaños y color de las partículas.

Algunas Ventajas de LISST:

- Rango amplio: desde submicrones hasta milímetros
- Mediciones rápidas, se obtienen resultados en menos de un minuto
- Repetitividad: gran cantidad de partículas son muestreadas en cada medición
- Se pueden realizar muchas mediciones por día
- No necesita calibración

2.4.3 Instrumentos ópticos multifrecuencia

Este aparato sirve para estimar la cantidad de sedimentos en suspensión sobre la superficie del agua. Es un método no intrusivo, y entre sus inconvenientes se puede nombrar: Se necesita conocer la relación entre la concentración superficial y la

concentración media; además depende de la luz del ambiente. En la figura 21 se muestra un instrumento óptico multifrecuencia.



Figura 21: Instrumento óptico multifrecuencia.

2.4.4 Imágenes ópticas digitales

El análisis de imágenes ópticas digitales y los sistemas de reconocimiento de patrones no requieren una calibración rutinaria, y en los últimos años se han adaptado para cuantificar CSS (concentración de sólidos en suspensión) de los sedimentos suspendidos en muestras de agua. Esta tecnología computa la estadística de los tamaños basada en mediciones automatizadas de partículas individuales. Podemos observar en la figura 22 el estimador de sedimentos por imágenes ópticas digitales.

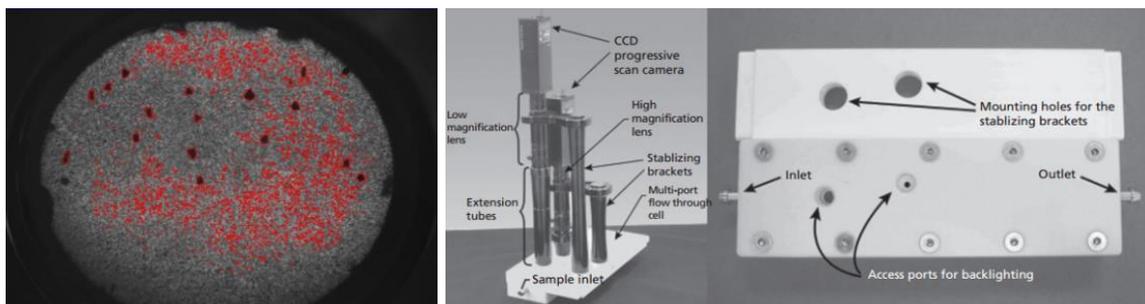


Figura 22: Estimador de sedimentos, Imágenes ópticas digitales.

El cómputo del CSS 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.

Desventajas:

- La tecnología puede ser afectada por los mismos inconvenientes que las tecnologías laser y los turbidímetros; Se requiere la densidad de las partículas para convertir el volumen CSS en valores de masa

2.4.5 Diferencia de presiones

La técnica de diferencia de presiones para el monitoreo de CSS se basa en la medición de dos sensores precisos de presión (transductores) colocados a diferentes elevaciones fijas en una columna de agua. La diferencia en la presión leída es convertida en un valor de densidad del fluido, al cual está referenciado el C_{ss} 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 23 se puede ver un estimador de sedimentos por diferencia de presiones.



Figura 23: Estimador de sedimentos por diferencia de presiones.

Esta técnica ha sido aplicada en laboratorio con buenos resultados para determinar la concentración de microesferas de vidrio en suspensión. Aplicaciones de esta técnica en campo pueden resultar complicadas por una baja relación señal ruido asociada a un bajo CSS, a la turbulencia, concentraciones de sólidos disueltos muy grandes, e importantes variaciones de temperatura, además de la variación en la densidad del material en suspensión. Un problema complicado en este método es la turbulencia, que introduce ruido en la magnitud de la señal igual a la magnitud de la señal de interés, especialmente durante grandes descargas, que generalmente implica grandes niveles de CSS.

2.4.6 Sensores Acústicos

La caracterización de la concentración de sedimentos en suspensión se realiza in situ a partir de sensores acústicos de retrodispersión, los cuales envían una señal acústica al medio y al rebotar con las partículas presentes en él se modifica la intensidad de la señal de retorno, como puede observarse en la figura 24 y a partir de esta diferencia calcula la velocidad del fluido, asumiendo que es igual al de las partícula. De esta manera pueden obtenerse perfiles de CSS a partir de mediciones con este tipo de instrumentos acústicos.

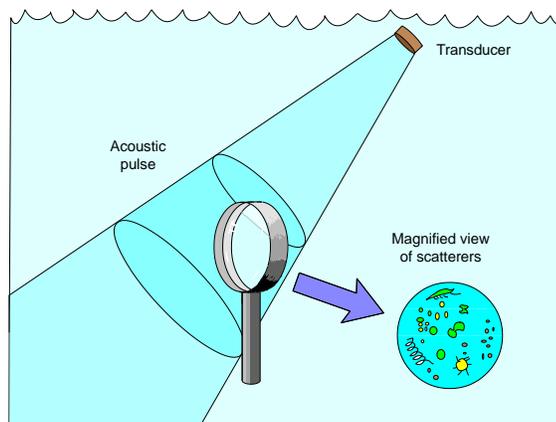


Figura 24: Sensores acústicos de retrodispersión.

Para esta técnica resulta necesaria una calibración empírica para convertir las mediciones de backscatter en CSS, así como también un complejo post procesamiento, para la compensación de las propiedades físicas del agua, tales como temperatura, salinidad y presión, y en algunos casos, materiales en suspensión y por último compensaciones según las características del instrumento, como frecuencia, potencia y diseño de los transductores. La ventaja con este tipo de instrumentos es que una vez calibrado y luego de procesar la señal de retorno del instrumento (backscatter), se puede obtener un perfil de concentración de sedimentos como se observa en la figura 25.

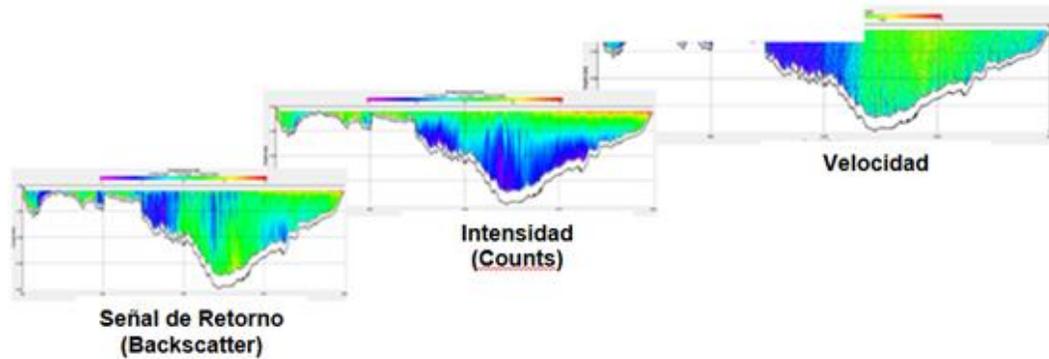


Figura 25: Perfil de concentración de sedimentos.

Los instrumentos acústicos comúnmente utilizados para medir la velocidad del flujo son los velocímetros acústicos Doppler (ADV) y los perfiladores acústicos. Dentro de estos últimos hay dos tipos de plataformas para la medición de caudal con sensores acústicos, por un lado el perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP) con plataforma móvil, y por otro el perfilador acústico Doppler horizontal (ADVM) donde el instrumento está fijo, generalmente colocado en una de las márgenes. En la figura 26 se puede observar una transecta de medición de caudal con plataforma móvil con ADCP, mientras que en la figura 27 una medición con el instrumento horizontal (ADVM).

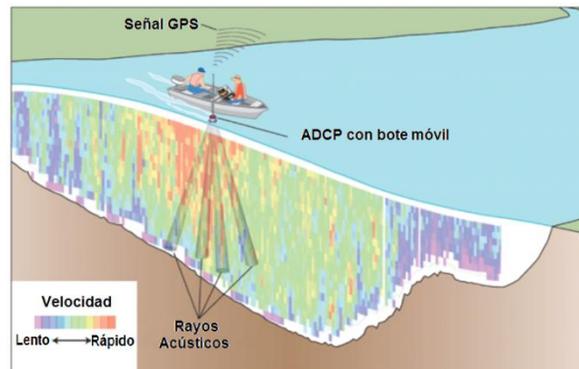


Figura 26: Plataforma móvil con dispositivo ADCP.

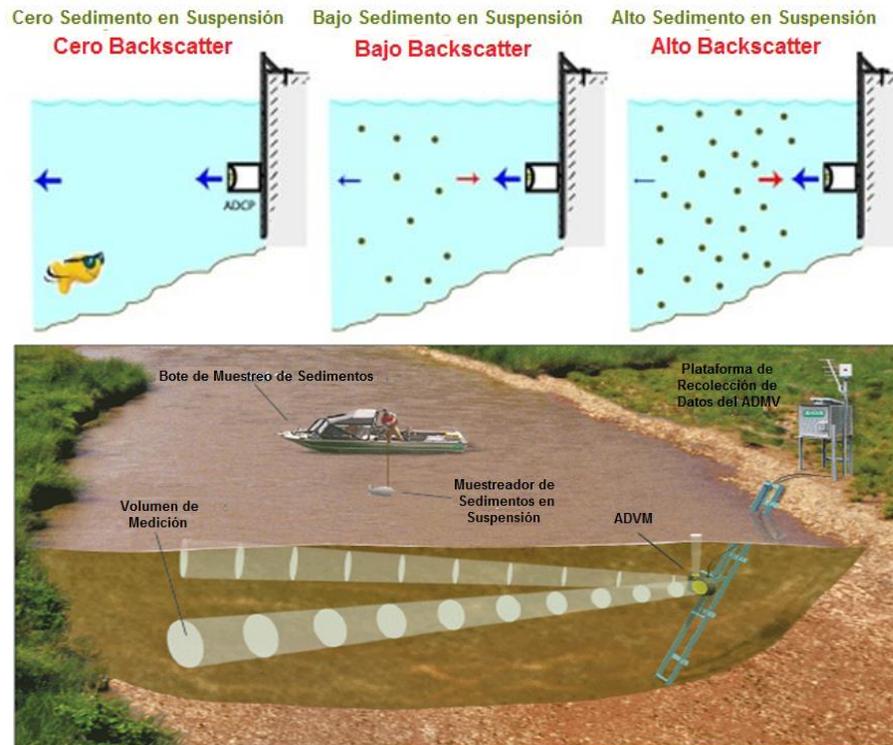


Figura 27: Metodología del instrumento fijo - ADVM horizontal en campaña.

2.5 PERFILADOR DE CORRIENTE ACÚSTICO DOPPLER (ADCP)

2.5.1 Principio de funcionamiento del ADCP

Tanto para el trabajo de campo como los ensayos realizados en laboratorio se utilizó un Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP) “RiverSurveyor S5”, fabricado por YSI/SonTek, el cual fue adquirido por el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. El ADCP provee información batimétrica (profundidades) de la sección y de las velocidades del flujo en tres direcciones ortogonales, lo que permite definir el caudal con un error general aproximado cercano al 2 o 3 %. Esta técnica de medición utiliza el efecto **Doppler**, transmitiendo pulsos de sonidos a una determinada frecuencia y escuchando los ecos reflejados por las partículas microscópicas o plancton presentes en el agua. De esta forma, registrando el movimiento de partículas en el agua y determinando sus posiciones sucesivas, es capaz de obtener los valores de las velocidades de esas partículas que bajo ciertas hipótesis puede ser asumida igual a la velocidad del flujo (baja inercia de las partículas). El instrumento puede ser utilizado con una computadora personal o bien con un teléfono celular, ambos dispositivos capaces de registrar los datos medidos. Los

resultados obtenidos utilizando el ADCP RiverSurveyor S5 se visualizan con el programa computacional RiverSurveyor Live.

El ADCP RiverSurveyor S5 tiene un conjunto de cuatro micro controladores, que son cuatro haces de rayos acústicos que se encuentran inclinados 25° con respecto a la vertical. Gracias a estos micro controladores puede medirse la velocidad en tres direcciones (el sistema de cuatro rayos provee información redundante en una dirección generalmente la vertical). Trabajan con señales acústicas con una frecuencia de 3,0 MHz, enviando pulsos en todas direcciones. Además, el ADCP posee un rayo acústico vertical que envía señales a una frecuencia mayor (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. Ambos elementos se muestran en la figura 28.

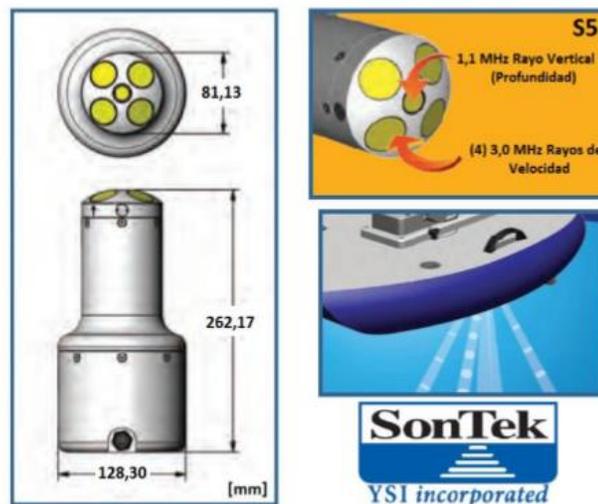


Figura 28: Descripción del instrumento utilizado (Sontek, 2013).

A continuación, se adjuntan las especificaciones técnicas del ADCP disponible en el Laboratorio de Hidráulica – FCEF y N utilizado en este trabajo (tabla 1).

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

Tabla 1: Características ADCP RiverSurveyor S5 (Sontek, 2013).

2.5.2 Programa Computacional: RiverSurveyor Live

La configuración de registro del ADCP, y la recepción y visualización de los datos no puede ser realizada si no se cuenta con el programa computacional específico. Para el modelo de ADCP que se cuenta, el programa necesario es el RiverSurveyor Live (figura 29). El mismo permite configurar el instrumento y registra toda la información enviada por el equipo y generar 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.

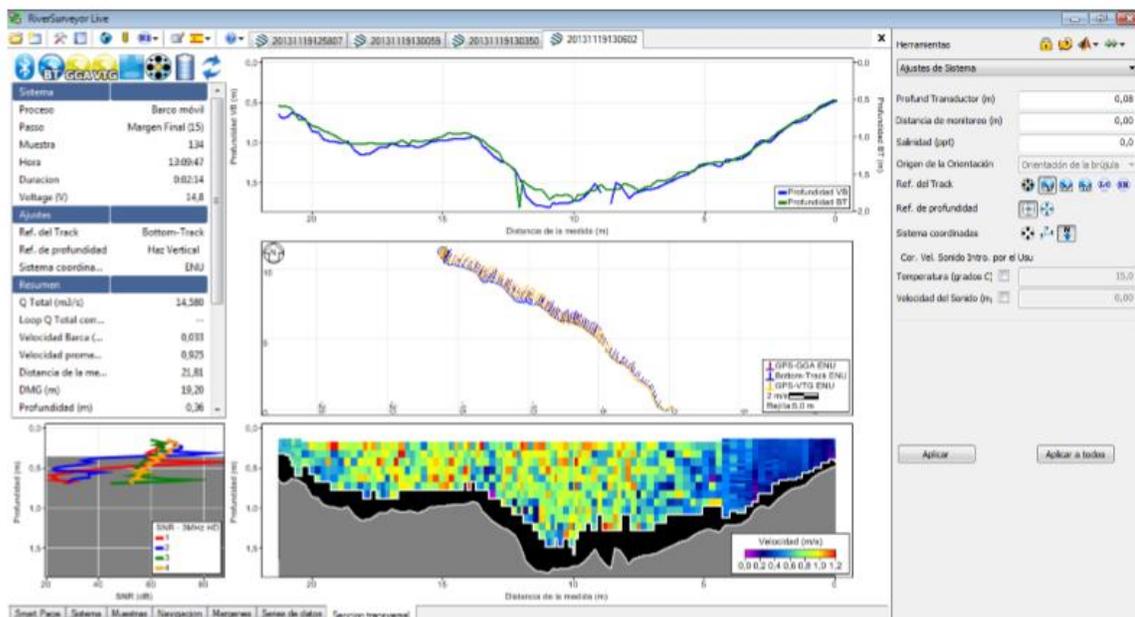


Figura 29: Interfaz del programa RiverSurveyor.

2.6 VELOCÍMETRO ACÚSTICO DOPPLER (ADV)

El instrumento ADV utiliza la tecnología Doppler para medir velocidades de flujos en un pequeño volumen de medición localizado entre 5 y 10 cm del instrumento dependiendo del modelo de ADV seleccionado. 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. La máxima velocidad y frecuencia de registro posibles varían de acuerdo al modelo de ADV utilizado. El ADV 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.

Un velocímetro acústico Doppler mide velocidades tridimensionales del flujo, 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 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.

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 señal a ruido (SNR por sus siglas en inglés).

El cociente SNR es el cociente de la energía de la señal al nivel de ruido acústico de fondo. Los valores se dan en decibels (db) en relación al nivel de ruido. Los cocientes SNR bajos son causados generalmente por una concentración baja de partículas en suspensión en el flujo durante la medición.

Capítulo 3:

TRABAJO DE LABORATORIO

CAPÍTULO 3: TRABAJO DE LABORATORIO

3.1 INTRODUCCIÓN:

En este capítulo se presentará la metodología de medición en el tanque para estimar el transporte en suspensión a partir de dos instrumentos acústicos: el ADCP (Perfilador de Corriente Acústico Doppler) y el ADV (Velocímetro Acústico Doppler). La misma comienza con la preparación del tanque en el que se realizará el ensayo, que incluye tanto la limpieza como el llenado con agua, la preparación de las muestras y el ensayo en sí mismo, en el que se van agregando de manera sucesiva cierta cantidad conocida de sedimentos, y luego del mezclado se mide simultáneamente con los dos instrumentos acústicos. El parámetro que se mide es la relación intensidad acústica-ruído (SNR por sus siglas en inglés) que varía de acuerdo a la cantidad de partículas presentes en el agua.

3.2 METODOLOGÍA DEL TRABAJO DE LABORATORIO

3.2.1 Tareas Previas a la Medición

Para la realización del ensayo de laboratorio se utilizó un tanque de fibrocemento de 500 litros de capacidad, el cual se verificó que no tenga fisuras, este limpio y sea estanco. Una vez cumplidas estas condiciones se lo llenó con agua de la red un día antes del ensayo, para eliminar microburbujas que pudieran formarse y afectar la medición. Paralelamente se prepararon las muestras de sedimentos. Se utilizó como sedimento suelo de ciudad universitaria y arcilla. El suelo se separó en diferentes fracciones granulométricas por medio de una serie de tamices: N° 200, N° 100, N° 40 y N° 30 (por su designación estandarizada ASTM), que luego se separaron en muestras de diferentes cantidades (2,5 g, 5 g, 25 g y 50 g) utilizando una balanza electrónica (precisión décima de gramo). Los elementos nombrados se muestran en la figura 30, figura 31 y figura 32.



Figura 30: Suelo de ciudad universitaria y tamices utilizados.



Figura 31: Balanza electrónica.



Figura 32: Vasos testigos.

Además previo a la medición se verificó que las baterías del ADCP estuvieran cargadas, que el ADV estuviera en su posición correcta y que todas la conexiones estuvieran bien realizadas (conexión bluetooth del ADCP a la notebook, conexión ADV a la PC). En la figura 33 se puede ver el tanque de fibrocemento y los instrumentos acústicos en su posición para las mediciones.

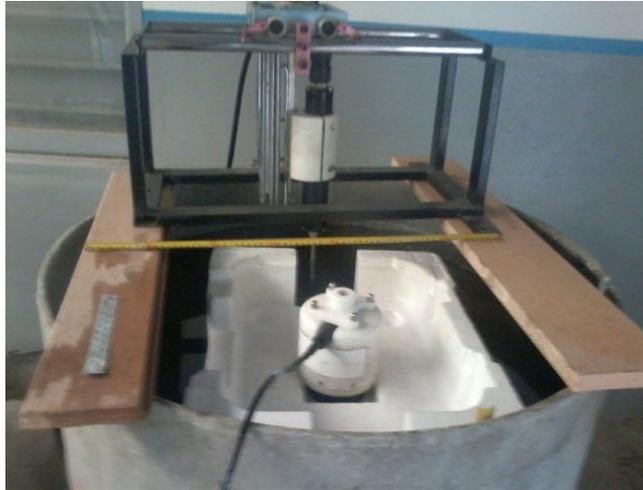


Figura 33: Tanque de fibrocemento con los instrumentos: ADCP y ADV.

3.2.2 Tareas durante el Ensayo

Se realizaron un conjunto de siete ensayos, con diferentes fracciones granulométricas, las cuales se describen en la tabla 2, junto con el rango de concentraciones evaluadas.

Nombre Ensayo	Sedimento	Rango Concentración
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

Tabla 2: Tabla resumen de ensayos.

La primera tarea fue medir la altura de agua en el tanque para luego poder calcular el volumen de agua, y con el peso de sedimentos la concentración de los mismos. A continuación se verificó la ubicación de los instrumentos, asegurando que estén en el centro del tanque para evitar la influencia de las paredes, como se visualiza en la figura 33. Se midió la temperatura del agua con un termómetro de mercurio, ya que ambos instrumentos calculan la velocidad del sonido en función de la misma. Para las mediciones con los instrumentos acústicos se utilizó una notebook para el ADCP y una computadora de escritorio para el ADV, como se muestra en la figura 34, mientras que en la figura 35 se puede visualizar todo el conjunto completo utilizado en el laboratorio.

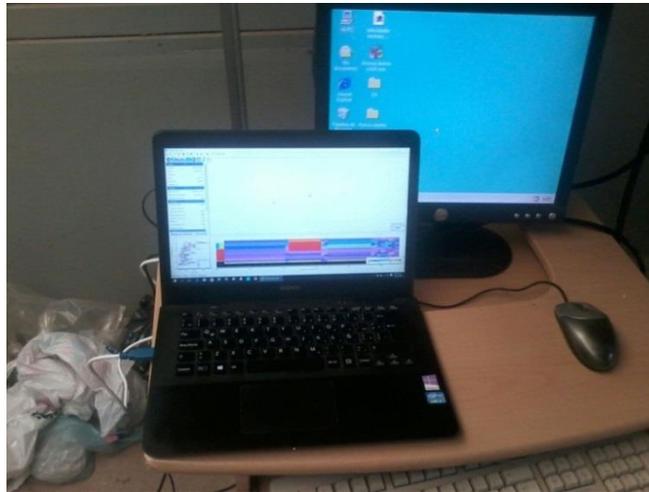


Figura 34: Notebook para medición con ADCP y Pc de escritorio para medición con ADV.

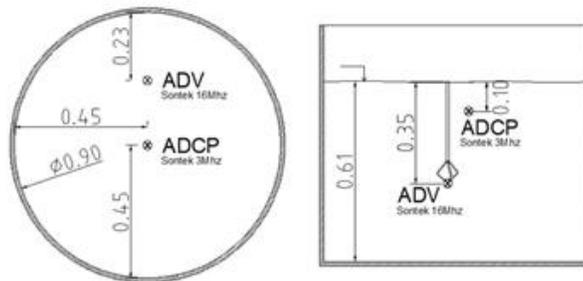


Figura 35: Conjunto completo para las mediciones en laboratorio-planta con corte del tanque y dispositivos.

Una vez ubicados los instrumentos se realizó la primera medición con el agua limpia, lo que arrojó valores de SNR bajos, tanto para el ADCP como para el ADV. Luego se agregó una muestra de sedimento y se mezcló con un agitador durante un minuto, para asegurar una concentración homogénea del sedimento con el agua, y se midió a continuación con el ADCP y el ADV en forma simultánea durante un minuto. Este

procedimiento se repitió en forma sucesiva hasta alcanzar una concentración de 900mg/l. Para cada concentración se realizaron dos mediciones con el ADCP, una en modo coherente (“Smart Pulse” activado) y otra en modo incoherente (“Smart Pulse” desactivado). El ADCP emite una onda acústica a una determinada frecuencia la cual es luego reflejada por partículas en suspensión en el flujo (sedimentos, plancton, algas, etc.). La onda acústica reflejada es detectada por el instrumento y la misma posee una frecuencia diferente con la que fue emitida. Para el modo coherente el instrumento calcula la velocidad del agua comparando dos pulsos acústicos sucesivos emitidos mientras que para el modo incoherente compara dos muestras de un único pulso acústico más largo.

El dato de entrada para medir con el ADCP fue sólo la profundidad del sensor (10 cm, medido en el laboratorio) ya que este instrumento tiene un sensor de temperatura incluido. Para el ADV los datos de entrada fueron la temperatura del agua, el rango de velocidades a medir (3 m/s), y la frecuencia de toma de datos (10 Mhz).

3.2.3 Tareas después del Ensayo

Una vez culminado el ensayo se guardaron las mediciones de ambos instrumentos en un pen drive/memoria extraíble, se desconectó y se guardó el ADCP, lo mismo se hizo con el ADV. El tanque se desagotó por medio de un orificio situado en el fondo de este, mezclando a continuación para poder retirar el sedimento junto con el agua. Es importante aclarar que no deben quedar partículas de sedimento en el tanque porque pueden afectar o distorsionar las futuras mediciones.

Una vez en oficina se evaluó la relación entre las concentraciones y el SNR de los dos instrumentos resultantes de la medición.

Capítulo 4:

RESULTADOS TRABAJO DE LABORATORIO

CAPÍTULO 4: RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentarán los resultados de las mediciones realizadas en el laboratorio mencionadas anteriormente en el capítulo N°3; para lo cual se recopilaron los datos del ensayo del tanque medidos con el ADV y el ADCP (Amplitud y SNR) tanto en modo coherente como en modo incoherente, los mismos se presentan a continuación.

4.2 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DEL TANQUE CON EL ADV

Para este análisis se comparó la amplitud de la señal y la relación ruido señal SNR del ADV con la concentración de sedimentos. Los resultados de estos ensayos pueden observarse en las siguientes tablas (tabla 3, tabla 4, tabla 5, tabla 6 y tabla 7), en donde también se describe el sedimento utilizado en cada ensayo.

ENSAYO N° 1		ADV Unfiltered	
		Unfiltered Coherente	
Sedimento[g]	Concentración [mg/L]	Avg SNR	AvgAMP
25	64,74	32,32	140,16
50	129,48	37,09	151,59
75	194,22	38,31	153,77
100	258,96	39,87	158,05
150	388,44	41,83	161,62
175	453,18	42,12	162,63
200	517,92	42,72	163,68
250	647,41	43,16	165,03
300	776,89	43,81	166,22
350	906,37	44,39	167,57

Tabla 3: Resultados ADV ensayo N°1 (suelo pasante T200). El SNR y la AMP del ADV están en dB.

ENSAYO N° 2		ADV Unfiltered	
		Unfiltered Coherente	
Sedimento[g]	Concentración [mg/L]	Avg SNR	AvgAMP
5	12,91	26,43	125,79
10	25,81	28,89	131,85
15	38,72	30,15	134,44
20	51,62	31,65	137,94
25	64,53	32,92	140,89
50	129,06	35,56	146,37
75	193,58	36,38	149,27
100	258,11	37,01	149,73
125	322,64	38,91	154,15
150	387,17	41,12	159,29
175	451,70	41,80	160,88
200	516,22	44,68	167,91
250	645,28	43,70	165,30
300	774,34	44,21	166,49
325	838,86	44,53	167,22

Tabla 4: Resultados ADV ensayo N°2 (suelo pasante T200). El SNR y la AMP del ADV están en dB.

ENSAYO N° 3		ADV Unfiltered	
		Unfiltered Coherente	
Sedimento[g]	Concentración [mg/L]	Avg SNR	Avg AMP
5	13,00	29,02	130,15
10	26,00	31,20	135,23
15	38,00	31,77	136,55
20	51,00	32,60	138,47
25	64,00	33,43	140,73
50	128,00	36,70	147,68
75	192,00	38,05	150,50
100	256,00	39,59	154,40
125	321,00	40,08	155,54
150	385,00	40,45	156,39
175	449,00	40,76	157,45
200	513,00	42,75	161,75
250	641,00	43,42	163,63
300	769,00	44,22	165,18
350	897,00	44,45	165,69

Tabla 5: Resultados ADV ensayo N°3 (suelo pasante T200). El SNR y la AMP del ADV están en dB.

ENSAYO N° 6		ADV Unfiltered	
		Unfiltered Coherente	
Sedimento[g]	Concentración [mg/L]	Avg SNR	Avg AMP
25	62,88	29,58	134,12
50	125,75	33,76	143,83
50	125,75	33,98	144,68
75	188,63	35,85	148,37
100	251,50	36,81	150,60
125	314,38	37,77	152,84
150	377,26	38,50	154,53
175	440,13	39,16	156,06
200	503,01	39,44	156,72
250	628,76	40,12	158,30
300	754,51	40,64	159,52
350	880,26	41,49	161,16

Tabla 6: Resultados ADV ensayo N°6 (arcilla). El SNR y la AMP del ADV están en dB.

ENSAYO N° 9		ADV Unfiltered	
		Unfiltered Coherente	
Sedimento[g]	Concentración [mg/L]	Avg SNR	AvgAMP
2,5	6,55	24,77	122,26
5	13,10	28,40	130,71
7,5	19,65	29,85	133,75
10	26,20	31,43	137,42
15	39,30	31,99	138,73
20	52,40	33,86	142,75
25	65,50	34,50	144,57
50	130,99	37,84	152,67
75	196,49	39,10	155,26
100	261,98	40,86	159,04
125	327,48	41,74	161,06
150	392,98	42,15	162,36
175	458,47	42,75	163,76
200	523,97	43,44	164,70
250	654,96	43,83	165,59
300	785,95	44,02	166,03
350	916,94	44,16	166,37

Tabla 7: Resultados ADV ensayo N°9 (suelo pasante T100 y retenido T200). El SNR y la AMP del ADV están en dB.

A partir de los resultados del ADV de estos ensayos se graficó la relación Concentración–SNR y Concentración–Amplitud. Considerando todos los ensayos se ve en la figura 36 la curva que mejor ajusta para la relación Log C-SNR y en la figura 37 para la relación Log C–AMPLITUD.

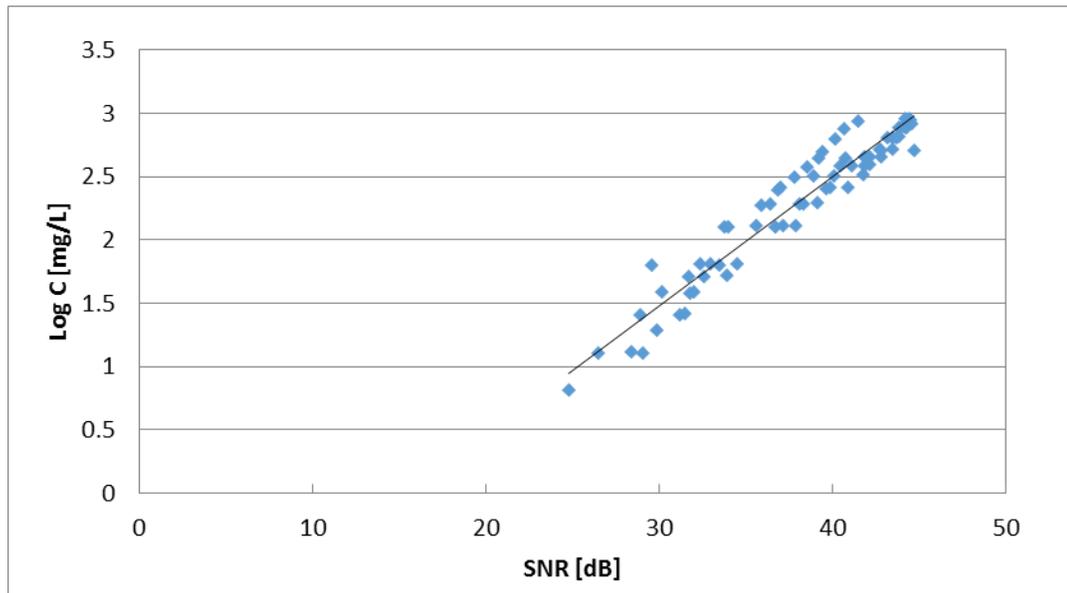


Figura 36: Curva que mejor ajusta relación Log C-SNR del ADV.

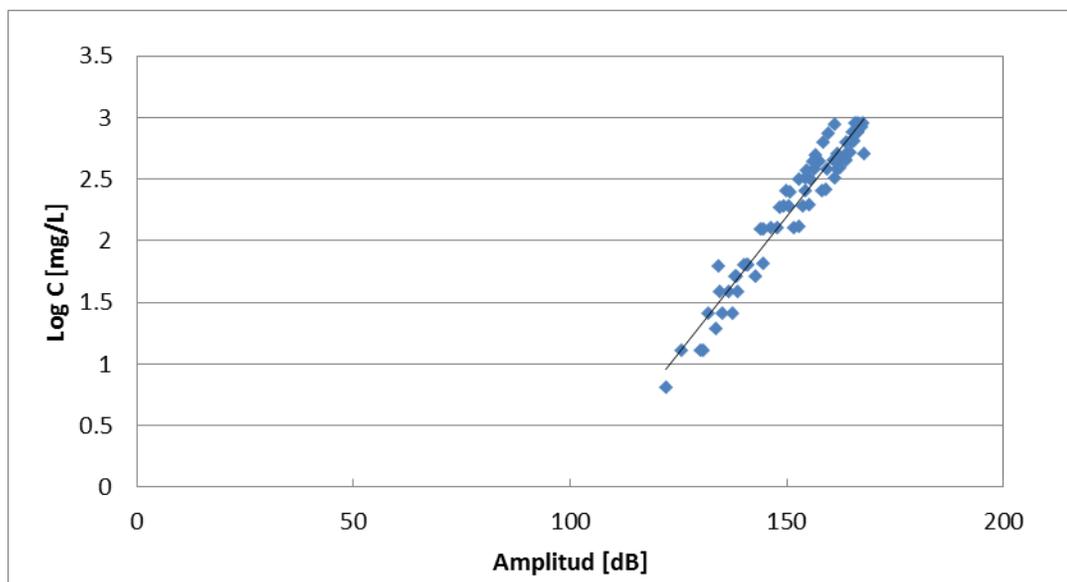


Figura 37: Curva que mejor ajusta relación Log C-Amplitud .de ADV.

A partir de estas aproximaciones lineales la ecuación que mejor ajusta la relación entre SNR y la concentración de sedimentos para el ADV es:

$$\text{Log } C = 0,1019 \cdot \text{SNR} - 1,5724$$
$$R^2 = 0,9285$$

Para la relación amplitud de la señal con la concentración:

$$\text{Log } C = 0,0446 \cdot \text{AMP} - 4,4963$$
$$R^2 = 0,9386$$

Comparando los valores del coeficiente R^2 se puede ver que la mejor correlación se da entre la amplitud y la concentración, aunque la diferencia es pequeña. En ambos casos se supera el valor de 0,9 que implica una buena aproximación.

Analizando los resultados de los ensayos según la fracción granulométrica se obtienen los gráficos figura 38 y figura 39.

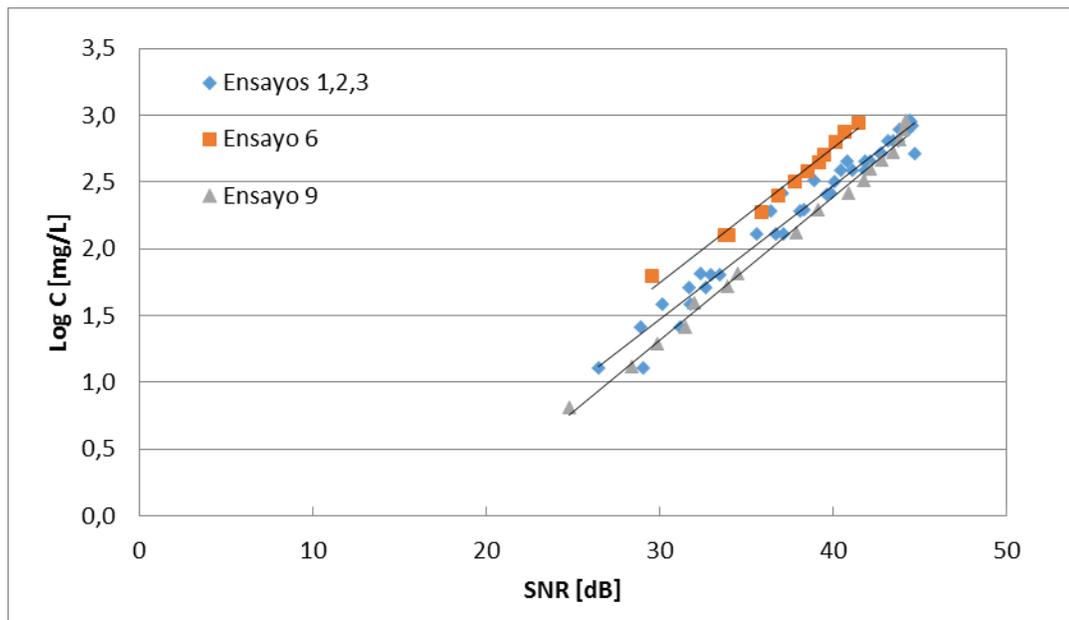


Figura 38: Curva Log C-SNR del ADV según granulometría.

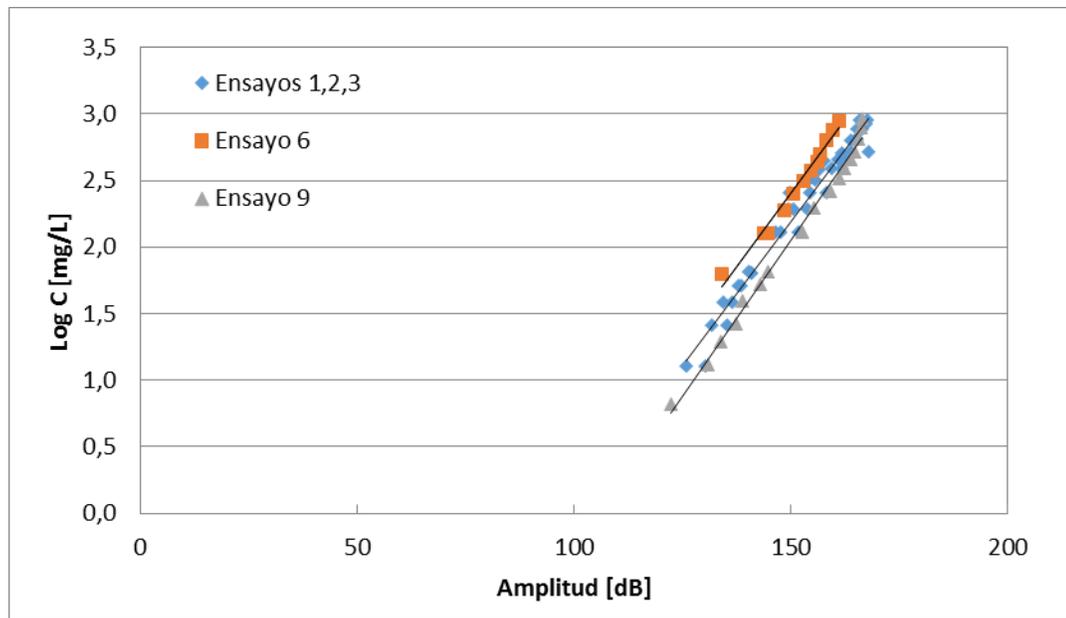


Figura 39: Curva Log C-Amplitud del ADV según granulometría.

En la tabla 8 se ven las funciones aproximadas para cada fracción granulométrica. En todos los casos el coeficiente R^2 es mayor a 0,95. Para la relación C-SNR la pendiente de la recta es cercana a 0,101 y para la Amplitud 0,045.

Tipo de Sedimento	SNR	AMP
Pasante T200 (Ensayos 1 2 3)	$\text{Log } C = 0,099 \times \text{SNR} - 1,519$ $R^2 = 0,9693$	$\text{Log } C = 0,043 \times \text{AMP} - 4,272$ $R^2 = 0,9678$
Arcilla (Ensayo 6)	$\text{Log } C = 0,101 \times \text{SNR} - 1,277$ $R^2 = 0,9816$	$\text{Log } C = 0,044 \times \text{AMP} - 4,247$ $R^2 = 0,9799$
Pasante T100 Retenido T200 (Ensayo 9)	$\text{Log } C = 0,107 \times \text{SNR} - 1,899$ $R^2 = 0,9938$	$\text{Log } C = 0,047 \times \text{AMP} - 4,98$ $R^2 = 0,9925$

Tabla 8: Funciones ajuste para el ADV.

4.3 RESULTADOS ENSAYO TANQUE CON EL ADCP

Los resultados para el ADCP de los ensayos realizados pueden observarse en las siguientes tablas (tabla 9, tabla 10, tabla 11, tabla 12, tabla 13, tabla 14 y tabla 15).

ENSAYO N° 1		ADCP	
		Coherente	Incoherente
Sedimento[g]	Concentración[mg/L]	celda 12-21	Avg 2°celda
25	64,74	49,92	61,12
50	129,48	55,44	63,81
75	194,22	55,53	66,57
100	258,96	58,17	67,61
125	323,70	...	69,68
150	388,44	59,46	68,94
175	453,18	59,62	69,54
200	517,92	60,28	70,22
250	647,41	60,73	71,42
300	776,89	61,53	72,11
350	906,37	62,20	72,80

Tabla 9: Resultados ADCP ensayo N° 1 (suelo pasante T200). El SNR del ADCP está en dB.

ENSAYO N° 2		ADCP	
		Coherente	Incoherente
Sedimento[g]	Concentración[mg/L]	celda 12-21	Avg 2°celda
5	12,91	60,27	64,65
10	25,81	62,20	65,31
15	38,72	61,00	66,56
20	51,62	60,85	65,31
25	64,53	60,63	64,11
50	129,06	62,44	66,09
75	193,58	63,57	67,63
100	258,11	62,66	68,13
125	322,64	64,88	68,25
150	387,17	66,38	66,83
175	451,70	64,71	70,34
200	516,22	66,51	69,52
250	645,28	68,32	72,10
300	774,34	68,83	71,03
325	838,86	68,51	71,76

Tabla 10: Resultados ADCP ensayo N° 2 (suelo pasante T200). El SNR del ADCP está en dB.

ENSAYO N° 3		ADCP	
		Coherente	Incoherente
Sedimento[g]	Concentración[mg/L]	celda 12-21	Avg 2°celda
5	13,00	55,76	64,53
10	26,00	58,30	67,51
15	38,00	55,35	66,44
20	51,00	54,11	62,40
25	64,00	55,22	63,61
50	128,00	58,82	71,10
75	192,00	59,44	70,20
100	256,00	58,84	68,95
125	321,00	57,77	67,91
150	385,00	58,58	68,07
175	449,00	58,29	69,08
200	513,00	58,84	71,19
250	641,00	61,90	73,21
300	769,00
350	897,00	61,44	72,48

Tabla 11: Resultados ADCP ensayo N° 3 (suelo pasante T200). El SNR del ADCP está en dB.

ENSAYO N° 6		ADCP	
		Coherente	Incoherente
Sedimento[g]	Concentración[mg/L]	celda 12-21	Avg 2°celda
25	62,88
50	125,75	53,63	61,97
75	188,63	56,51	66,17
100	251,50	58,01	66,51
125	314,38	58,41	66,34
150	377,26	59,66	68,25
175	440,13	60,54	68,79
200	503,01	...	69,62
250	628,76	61,63	72,47
300	754,51	62,02	72,18
350	880,26	63,30	72,65

Tabla 12: Resultados del ADCP ensayo N° 6 (arcilla). El SNR del ADCP está en dB.

ENSAYO N° 7		ADCP	
		Coherente	Incoherente
Sedimento[g]	Concentración[mg/L]	celda 12-21	Avg 2°celda
2,5	6,50	...	62,43
5	12,99	49,74	59,69
7,5	19,49	51,49	58,76
10	25,98	55,53	63,95
15	38,97	...	62,98
20	51,96	56,39	64,04
25	64,95	55,08	64,72
50	129,91	55,95	69,82
75	194,86	60,01	68,33
100	259,82	62,74	71,79
125	324,77	64,75	74,09

. Tabla 13: Resultados del ADCP ensayo N° 7 (suelo pasante T100 y retenido T200). El SNR del ADCP está en dB.

ENSAYO N° 8		ADCP	
		Coherente	Incoherente
Sedimento[g]	Concentración[mg/L]	celda 12-18	Avg 2°celda
2,5	6,00	52,64	62,91
5	13,00	53,67	62,30
7,5	19,00	54,80	64,67
10	25,00	56,10	65,18
15	38,00	57,09	66,94
20	51,00	55,69	65,75
25	64,00	57,67	68,18
50	127,00	62,02	65,84
75	191,00	62,63	73,60
100	254,00	64,98	73,98
125	318,00	65,56	75,61
125	318,00	65,83	73,66
150	382,00	65,77	76,22
175	445,00	67,23	76,81
200	509,00	67,23	76,19
250	636,00	68,23	77,47
300	763,00	67,92	79,83
350	890,00	69,47	78,95

Tabla 14: Resultados del ADCP ensayo N° 8 (suelo pasante T100 y retenido T200). El SNR del ADCP está en dB.

ENSAYO N° 9		ADCP	
Sedimento[g]	Concentración[mg/L]	Coherente	Incoherente
		celda 12-18	Avg 2°celda
2,5	7,00	47,95	59,75
5	130,00	51,42	59,44
7,5	20,00	52,54	60,48
10	26,00	54,19	60,47
15	39,00	54,42	63,83
20	52,00	56,45	64,03
25	65,00	56,53	65,96
50	131,00	61,08	...
75	196,00	62,98	71,40
100	262,00	64,58	73,52
125	327,00	65,80	74,99
150	393,00	66,07	75,52
175	458,00	66,75	76,00
200	524,00	67,56	76,47
250	655,00	68,54	77,75
300	786,00	68,74	78,99
350	917,00	69,98	...

Tabla 15: Resultados del ADCP ensayo N°9 (suelo pasante T100 y retenido T200). El SNR del ADCP está en dB.

A partir de los ensayos se graficó Log C–SNR para modo coherente y la misma relación para el modo incoherente del ADCP. En la figura 40 se observa la curva que mejor ajusta considerando todos los ensayos juntos, mientras que en la figura 41 para el modo incoherente. En ambos casos se ve una gran dispersión, ya que para una misma concentración se dan diferentes valores de SNR.

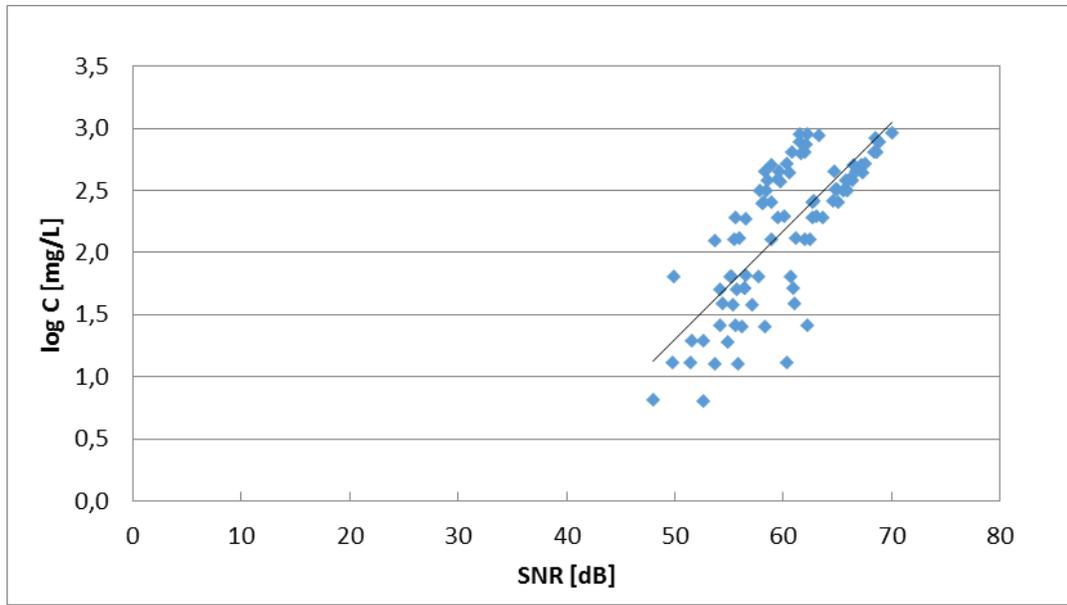


Figura 40: Curva que mejor ajusta relación Log C-SNR del ADCP para el modo coherente.

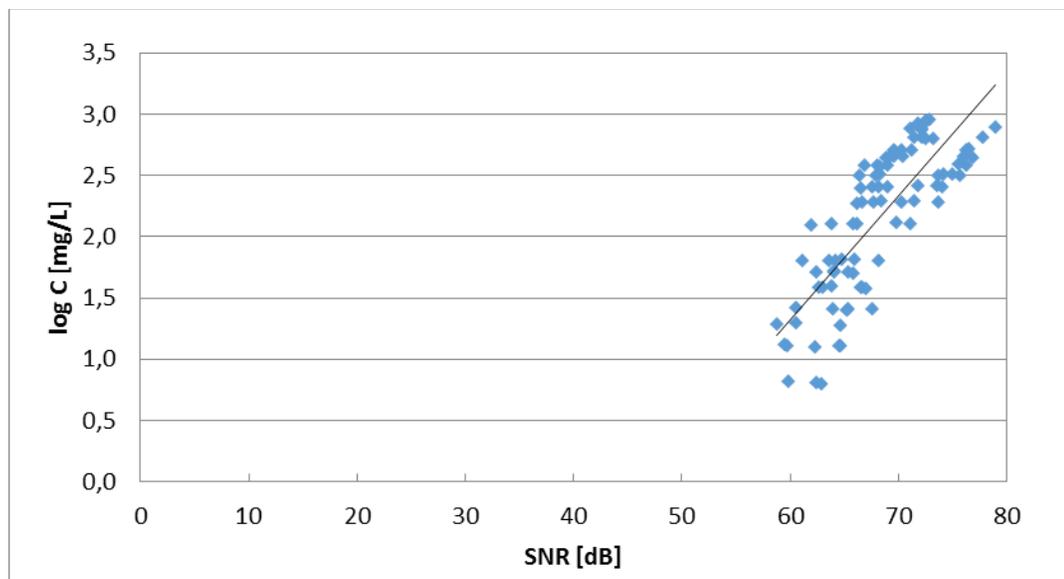


Figura 41: Curva que mejor ajusta relación Log C-SNR del ADCP para el modo incoherente.

La ecuación de la recta de ajuste que relaciona el SNR del ADCP con la concentración para el modo coherente es:

$$\text{Log } C = 0,087 \cdot \text{SNR} - 3,058$$

$$R^2 = 0,567$$

Para el ADCP modo incoherente:

$$\text{Log } C = 0,101 \cdot \text{SNR} - 4,727$$

$$R^2 = 0,646$$

Si analizamos los ensayos según la fracción granulométrica utilizada, es decir suelo pasante tamiz 200 (ensayos 1, 2 y 3) por un lado, arcilla (ensayo 6) por otro y por último suelo pasante tamiz 100 y retenido 200 (ensayos 7, 8 y 9) se obtienen los resultados graficados en la figura 42 y la figura 43. En la tabla 16 observan las ecuaciones que mejor ajustan y los coeficientes R^2 correspondientes.

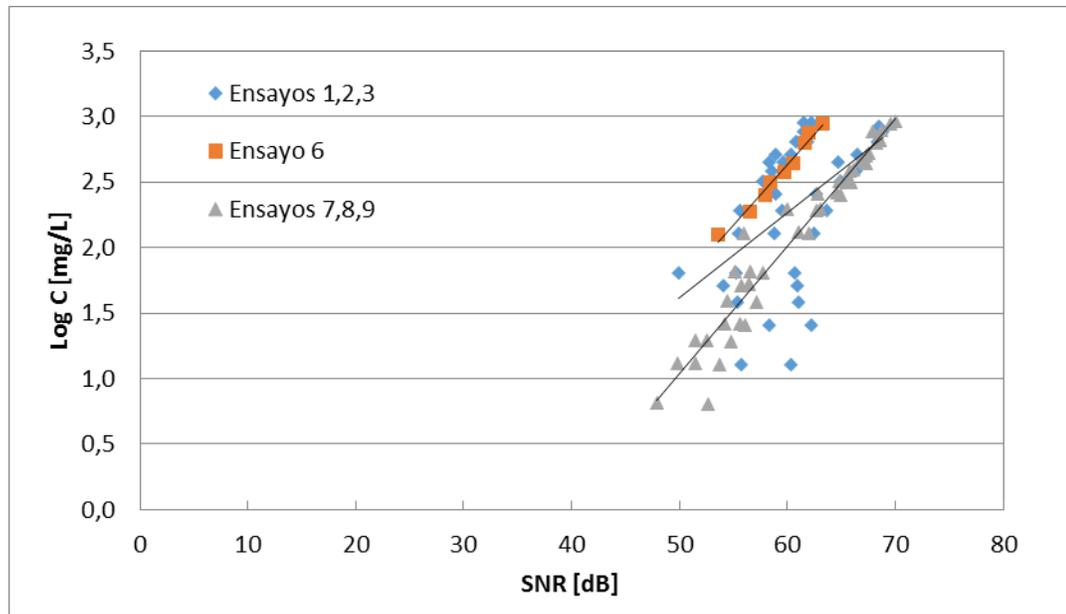


Figura 42: Curva que mejor ajusta la relación C–SNR del ADCP para el modo coherente, según granulometría.

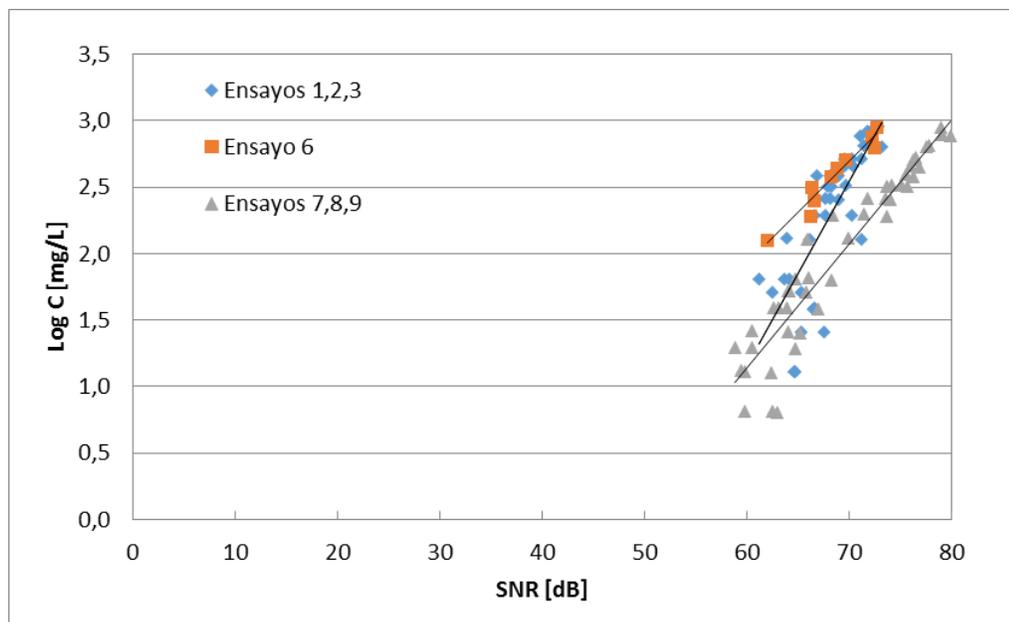


Figura 43: Curva que mejor ajusta la relación C–SNR del ADCP para el modo incoherente, según granulometría.

Tipo de Sedimento	Modo Coherente	Modo Incoherente
Pasante T200 (Ensayos 1 2 3)	Log $C = 0,0649 \times \text{SNR} - 1,631$ $R^2 = 0,2497$	Log $C = 0,1379 \times \text{SNR} - 7,107$ $R^2 = 0,6292$
Arcilla (Ensayo 6)	Log $C = 0,0923 \times \text{SNR} - 2,908$ $R^2 = 0,9802$	Log $C = 0,0766 \times \text{SNR} - 2,664$ $R^2 = 0,9433$
Pasante T100 Retenido T200 (Ensayo 7 8 9)	Log $C = 0,0978 \times \text{SNR} - 3,858$ $R^2 = 0,9409$	Log $C = 0,0936 \times \text{SNR} - 4,472$ $R^2 = 0,9008$

Tabla 16: Funciones de ajuste de los ensayos con ADCP - Coeficiente R2.

Como se puede observar en los gráficos anteriores para el modo incoherente los valores de SNR para una misma concentración son mayores que para el modo coherente. A su vez, teniendo en cuenta todos los ensayos realizados, el modo incoherente en promedio da resultados entre 15 y 20% mayores que el modo coherente, como se ve la tabla 17.

Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 6	Ensayo 7	Ensayo 8	Ensayo 9	Promedio
1,19	1,07	1,19	1,15	1,21	1,14	1,10	1,15

Tabla 17: Relación promedio entre SNR modo coherente y SNR modo incoherente del ADCP.

4.4 COMPARACIÓN DE RESULTADOS ADV VS ADCP

Comparando los valores de SNR medidos con el ADV y con el ADCP se puede concluir que para el modo coherente hay una mayor dispersión del ADCP respecto a los resultados del ADV, mientras que para el modo incoherente hay una mejor correlación entre los datos de los instrumentos, como se aprecia en la figura 44 y la figura 45.

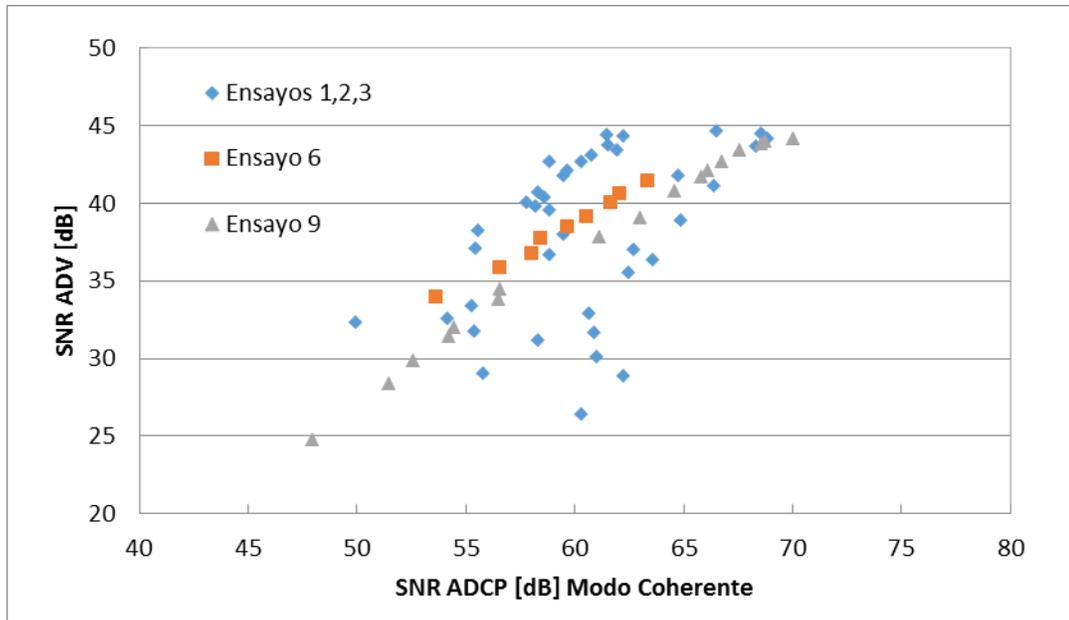


Figura 44: Curva SNR del ADV- SNR del ADCP para el modo coherente.

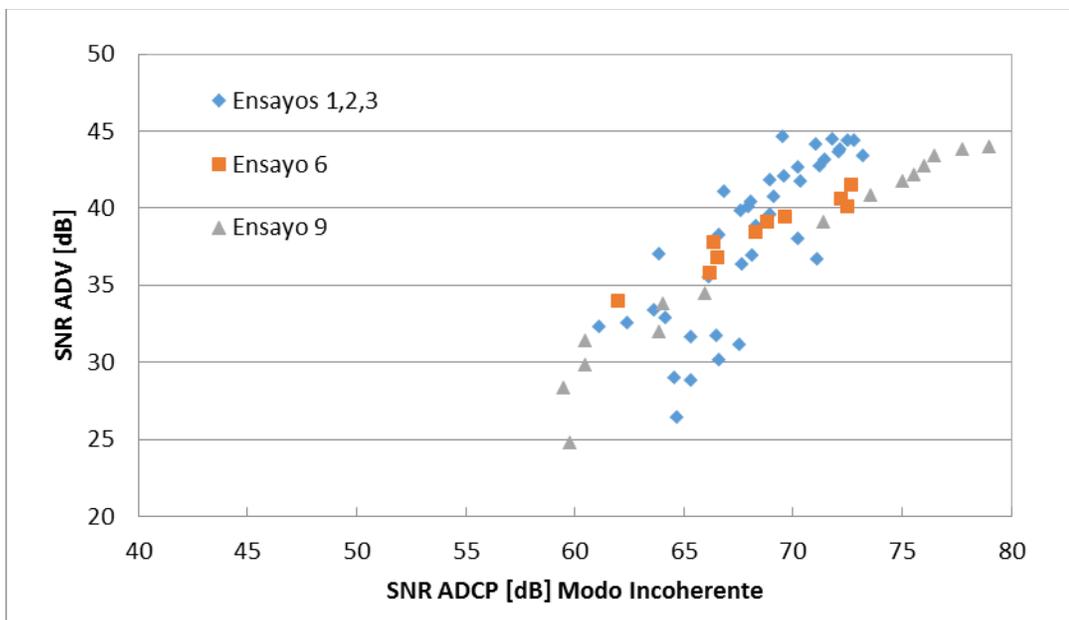


Figura 45: Curva SNR del ADV- SNR del ADCP para el modo incoherente.

Discriminando por el tipo de sedimento utilizado en los ensayos la mejor correlación se da para el suelo pasante tamiz 100 y retenido tamiz 200 y para la arcilla, mientras que el suelo pasante tamiz 200 es el que presenta la mayor dispersión. Hay que tener en cuenta que estos instrumentos trabajan con diferentes frecuencia acústicas, por lo tanto las partículas que puedan reconocer son de distinto tamaño, lo que podría explicar este comportamiento dispar.

Capítulo 5:

TRABAJO DE CAMPO

CAPÍTULO 5: TRABAJO DE CAMPO

5.1 INTRODUCCIÓN:

En este capítulo se comentarán las experiencias realizadas en campaña el día 23 de octubre de 2015 junto a alumnos de Hidráulica Fluvial y Transporte de Sedimentos de la Maestría con mención en Recursos Hídricos, incluyendo la localización y selección de la sección de medición, la preparación de los instrumentos, las mediciones con ADCP y muestreadores convencionales y finalmente los resultados.

5.2 LOCALIZACIÓN

En esta oportunidad se realizó la campaña de medición de caudal y de sedimentos en el río Tercero a la altura de la localidad de Villa María, provincia de Córdoba. 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 y desde el año 2012 se cuantifican además los caudales superficiales escurridos en el río y en sus principales afluentes, tarea que se realiza en conjunto entre la provincia de Córdoba y el Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA) de la UNC. La sección de medición elegida fue aguas abajo del Puente Alberdi, el cual une la ciudad de Villa María con la ciudad de Villa Nueva como puede apreciarse en la figura 46 y en la figura 47. La actividad fue desarrollada en conjunto con alumnos de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería con especialidad en Recursos Hídricos de la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales.



Figura 46: Imagen satelital del puente Alberdi, en la localidad de Villa María.



Figura 47: Sección de medición en río Tercero, aguas abajo del puente Alberdi.

5.3 PUNTOS DE MEDICIÓN

En la sección de medición: río Tercero aguas abajo del puente Alberdi en Villa María, según el método de medición empleado se escogieron cinco puntos, los cuales se muestran en la figura 48. Para los estacionarios y los SMBA se realizaron mediciones en los cinco puntos de la sección, mientras que para el material de fondo se tomaron muestras de los puntos 1 y 2, los más próximos a la margen izquierda.

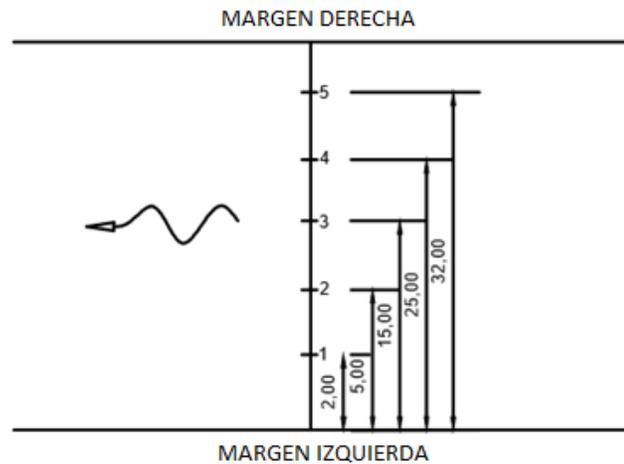


Figura 48: Puntos de medición-Estacionario/SMBA.

5.4 PREPARACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS

El día previo a la salida a campo se prepararon los instrumentos verificando que estén todos los elementos necesarios. Ya en la sección de medición se armó el ADCP siguiendo las recomendaciones del manual (SonTek, 2013) Una vez retirado el instrumento del estuche se lo colocó en la barcaza que lo contiene conectando las baterías y la antena del GPS. A continuación se vinculó el mismo con la notebook por medio del programa RiverSurveyor. Una vez conectados se calibró la brújula del GPS. Para ellos se debe estar lo más cercano posible al sitio donde se va a realizar la medición, se deben realizar dos giros completos con cabeceo del instrumento en un minuto, si la corriente que se va a medir tiene muchas olas el cabeceo debe ser grande, simulando el movimiento que tendrá el aparato en el agua, en caso contrario el cabeceo debe ser bajo. Esta calibración puede observarse en la figura 49. Una vez calibrado el instrumento se ató una soga al bote para poder desplazarlo desde el puente.



Figura 49: Calibración de la brújula del GPS del ADCP.

También se preparó una soga marcada cada 1m como se puede ver en la figura 50, para medir las distancias en la sección, Esto se hizo con la colaboración de alumnos de secundaria, utilizando una cinta métrica y marcadores.



Figura 50: Preparación de los instrumentos para campaña.

5.5 METODOLOGÍA DE MEDICIÓN

5.5.1 Metodología de Medición con ADCP

Para las mediciones de caudales se realizaron 4 transectas, desde una margen a la otra, obteniendo así el perfil de velocidades en la sección. A continuación, se realizaron mediciones estacionarias y mediciones del tipo evaluación estacionaria de fondo móvil

(SMBA: Stationary Moving Bed Assesment, ver Anexo). La medición estacionaria consiste en dejar el instrumento en una posición fija midiendo un determinado tiempo. La evaluación estacionaria de fondo móvil tiene una metodología similar, con un tiempo de medición mayor a cinco minutos, pero calcula la velocidad del flujo con menor precisión. A continuación se realizó el método del lazo (loop method, ver Anexo), Este método se utilizó para evaluar el transporte de sedimentos de fondo. Consiste en realizar dos transectas sucesivas sin detenerse en las márgenes, asegurándose de volver al mismo punto de salida. Como resultado se obtuvo una velocidad de fondo móvil (V_{fm}) media de la sección. La diferencia radical entre ambos métodos es que el estacionario permite calcular una velocidad puntual en el lugar donde se realiza la medición, mientras que a través del método del lazo se obtiene una velocidad de fondo móvil promedio en la sección, y ambos métodos no utilizan GPS.

Para la medición de caudal y el método del lazo se desplazó el instrumento desde el puente con ayuda de la soga, mientras que los estacionarios se realizaron manejando el ADCP desde las márgenes también con la soga. En la figura 51 se observa la ubicación del ADCP durante una medición estacionaria.



Figura 51: Ubicación del ACP en una medición estacionaria.

5.5.2 Metodología de Medición con Muestreadores de Sedimento en Suspensión

Para la medición del transporte de sedimentos en suspensión se utilizó el método por vadeo. Para éste se divide la sección en una cantidad de puntos equidistantes y el operador va colocando el instrumento en cada vertical, realizando así la medición como puede verse en la figura 52.



Figura 52: Medición con el muestreador DH - 48.

En la campaña realizada se utilizó un muestreador DH-48, tipo integrado. Se tomaron tres muestras en cada punto de la sección (equidistantes cada 8m). El tiempo de medición fue entre 15 y 30 segundos, adoptada en función de la velocidad media del agua. Este tiempo se utilizó para sumergir y subir el muestreador, ya que es un dispositivo integrado en vertical.

5.5.3 Metodología de medición con la trampa Halley-Smith

Para las mediciones del transporte de fondo con la trampa Halley–Smith también se utilizó el método por vadeo, pero se realizaron solo en dos puntos de la sección: uno ubicado a 8 m de la margen izquierda y el otro a 16 m. El tiempo de medición fue entre 2 y 3 minutos. Cabe destacar que la presencia de dunas dificultó esta tarea, ya que el operador debió moverse según la ubicación del valle o cresta, ya que en la primera el transporte era prácticamente nulo, mientras que en la cresta el mismo era máximo.

5.5.4 Metodología de medición para el material de fondo

Para el material de fondo se tomaron muestras del lecho del río. Las muestras obtenidas fueron utilizadas para obtener la curva granulométrica del lecho y obtener el diámetro característico (diámetro 50), como puede observarse en la figura 53.



Figura 53: Medición de fondo con baldes.

Capítulo 6:

RESULTADO DE TRABAJO DE CAMPO

CAPÍTULO 6: RESULTADOS DE TRABAJO DE CAMPO

6.1 INTRODUCCIÓN:

En este capítulo se analiza el trabajo de campaña realizado en Villa María el día 23 de octubre del 2015. En primer lugar se presenta el análisis granulométrico de las muestras de material de lecho por medio de un tamizado, luego se presentan los resultados de las mediciones con ADCP, que incluye medición de caudal, obtención de velocidad de fondo por método estacionario, evaluación estacionaria de fondo móvil y por el método del lazo y por último los resultados de transporte de sedimentos medidos con las técnicas convencionales.

6.2 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Para asegurar que la muestra sea representativa se propuso el Método de análisis mecánico mediante tamices. En este ensayo se utiliza una serie de tamices con diferentes diámetros (T 4, T 10, T 16, T 30, T 40, T 100 y T 200) que son ensamblados formando una columna. 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 siguiente ecuación.

$$\%P = 100 - (\sum Ri \cdot PT \cdot 100)$$

Donde Pt es el peso total de la muestra y Ri es el peso retenido en cada tamiz de abertura de malla superior a la abertura sobre la cual se quiere obtener el porcentaje pasante. Algunas muestras se realizaron vía húmeda, y otras por vía seca dejándolas secar al sol durante 24hs (Díaz Lozada, 2014).

En las siguientes tablas (tabla 18, tabla 19, tabla 20, tabla 21 y tabla 22) se presentan los resultados de los tamizados, indicando a que punto de la sección corresponden (2 m, 8 m, 16 m y 24 m, todos respecto a la margen izquierda).

Abertura(mm)	Tamices(n°)	Peso retenido(g)	% retenido	% retenido acum	% pasante acum
4,75	4	143,50	13,07	13,07	86,93
2,00	10	300,10	27,34	40,41	59,59
1,18	16	335,30	30,55	70,96	29,04
0,60	30	187,30	17,06	88,02	11,98
0,43	40	131,50	11,98	100,00	0,00
0,15	100	0,00	0,00	100,00	0,00
0,08	200	0,00	0,00	100,00	0,00
		1097,70	100,00		

Tabla 18: Material de fondo a 2m de la margen izquierda, tamizado vía Húmeda.

Abertura(mm)	Tamices(n°)	Peso retenido(g)	% retenido	% retenido acum	% pasante acum
4,75	4	25,50	2,69	2,69	97,31
2,00	10	216,20	22,83	25,53	74,47
1,18	16	282,50	29,84	55,37	44,63
0,60	30	252,90	26,71	82,08	17,92
0,43	40	99,10	10,47	92,54	7,46
0,15	100	62,10	6,56	99,10	0,90
0,08	200	8,50	0,90	100,00	0,00
		946,80	100,00		

Tabla 19: Material de fondo a 8m de la orilla, tamizado en seco.

Abertura(mm)	Tamices(n°)	Peso retenido(g)	% retenido	% retenido acum	% pasante acum
4,75	4	111,10	9,99	9,99	90,01
2,00	10	582,20	52,34	62,33	37,67
1,18	16	375,00	33,71	96,04	3,96
0,60	30	44,00	3,96	100,00	0,00
0,43	40	0,00	0,00	100,00	0,00
0,15	100	0,00	0,00	100,00	0,00
0,08	200	0,00	0,00	100,00	0,00
		1112,30	100,00		

Tabla 20: Material de fondo a 16m de la margen izquierda (punto 3), tamizado vía Húmeda.

Abertura(mm)	Tamices(n°)	Peso retenido(g)	% retenido	% retenido acum	% pasante acum
4,75	4	80,70	5,07	5,07	94,93
2,00	10	785,30	49,33	54,40	45,60
1,18	16	507,60	31,89	86,29	13,71
0,60	30	218,20	13,71	100,00	0,00
0,43	40	0,00	0,00	100,00	0,00
0,15	100	0,00	0,00	100,00	0,00
0,08	200	0,00	0,00	100,00	0,00
		1591,80	100,00		

Tabla 21: Material de fondo a 24m de la margen izquierda, tamizado vía Húmeda.

Abertura(mm)	Tamices(n°)	Peso retenido(g)	% retenido	% retenido acum	% pasante acum
4,75	4	67,20	6,95	6,95	93,05
2,00	10	516,00	53,38	60,33	39,67
1,18	16	279,20	28,88	89,21	10,79
0,60	30	84,30	8,72	97,93	2,07
0,43	40	20,00	2,07	100,00	0,00
0,15	100	0,00	0,00	100,00	0,00
0,08	200	0,00	0,00	100,00	0,00
		966,70	100,00		

Tabla 22: Material de fondo a 24m de la margen izquierda. Tamizado en seco.

En la tabla 23 y tabla 24 podemos ver el promedio de todos los tamizados como así también el resultado obtenido por Díaz Lozada 2014 acompañado de la figura 54 que se usó para determinar el D_{50} .

	2m	8m	16m	24m	24m
Abertura(mm)	% pasante acum				
4,75	86,93	97,31	90,01	94,93	93,05
2,00	59,59	74,47	37,67	45,60	39,67
1,18	29,04	44,63	3,96	13,71	10,79
0,60	11,98	17,92	0,00	0,00	2,07
0,43	0,00	7,46	0,00	0,00	0,00
0,15	0,00	0,90	0,00	0,00	0,00
0,075	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 23: Porcentajes pasantes de tamizados según distancia a la margen izquierda.

A continuación en la tabla 24 se muestran los resultados promedios de los análisis granulométricos en la sección.

Abertura Tamiz (mm)	Promedio Campaña 23/10/2015	Resultado Díaz Lozada 2014
4,75	92,41	100
2	51,52	77
1,18	20,44	68
0,6	6,39	54
0,43	1,49	37
0,15	0,18	3
0,075	0	2

Tabla 24: Granulometría promedio de la campaña 23/10/2015 y granulometría del trabajo Díaz Lozada 2014.

En la figura 54 podemos ver que se han graficado los % pasantes correspondientes a las distintas ubicaciones respecto a una misma sección (2 m, 8 m, 16 m y 24 m), además también se puede observar la curva con los promedios y el D_{50} que es lo que queríamos calcular.

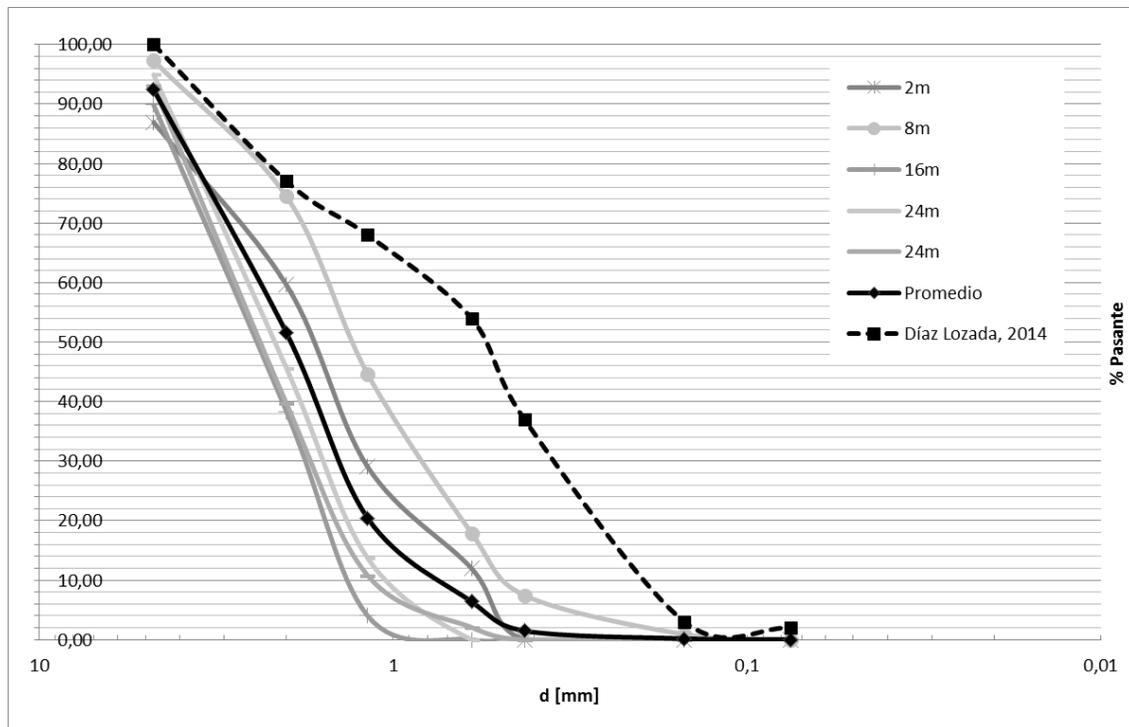


Figura 54: Curvas granulométricas.

Como se puede apreciar en la figura 54, el D₅₀ es de aproximadamente 1,9mm, mientras que en el trabajo del Ing. Díaz Lozada es 0,75 mm (Díaz Lozada, 2014). Esta diferencia radica en que el análisis granulométrico anterior se hizo sobre una muestra tomada en las cercanías de la margen, mientras que el análisis del presente trabajo se hizo sobre muestras tomadas en distintos puntos de la sección.

6.3 MEDICIONES CON EL ADCP (CAUDAL, ESTACIONARIOS, SMBA, Y LOOP)

Las mediciones que se realizaron con el ADCP en la campaña del día 23 de octubre del 2015 en Villa María fueron:

- Medición de Caudal
- Medición Estacionaria
- Método SMBA
- Método Loop

6.3.1 Medición de caudal

Se realizaron dos mediciones de caudal, una al comienzo de la campaña y otra al finalizar, con el objeto de verificar que no se modificaron las condiciones del flujo. Para la primera se realizaron cuatro transectas, arrojando un caudal promedio de 13,18 m³/s. En la figura 55 se ve el perfil de velocidades promedio resultante de esta medición. También se puede apreciar la batimetría de la sección, en donde se reconoce claramente influencia de las pilas del puente en el fondo del río.

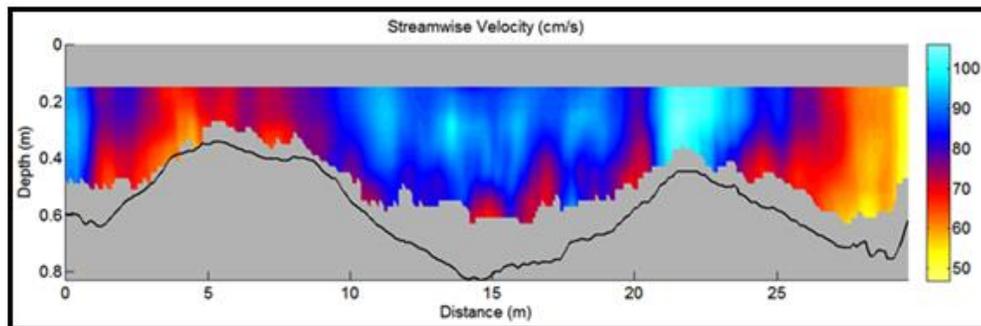


Figura 55: Batimetría y perfil de velocidades de la sección medida en campaña.

Para la segunda medición se realizaron solamente dos transectas de verificación. El caudal en este caso dio 13,51 m³/s.

6.3.2 Mediciones Estacionarias

Las mediciones estacionarias consisten en dejar el instrumento en una posición fija midiendo durante un tiempo determinado midiendo. Ya que el instrumento tiene dos formas diferentes de referenciarse, GPS y Bottom Track (seguimiento de fondo), al haber transporte de fondo aparece una diferencia en la trayectoria según estos dos modos. Para el GPS el ADCP está fijo mientras que para el Bottom Track el instrumento recorre una distancia hacia aguas arriba. Conociendo esta distancia y el tiempo de medición se calcula una velocidad de fondo, denominada "Vmb"

En la tabla 25 podemos ver las velocidades Vmb calculadas a partir de las mediciones estacionarias y por último el promedio según el método estacionario.

Ubicación	Distancia a m. izq. [m]	Transecta	BMG-GMG-mag	tiempo(s)	Vmb(m/s)
1	2	154810	12,28	510	0,024
2	8	160054	32,87	363	0,091
3	15	132402	153,98	1356	0,114
3	17	122639	53,93	948	0,057
4	24	134945	40,33	910	0,044
5	30	142046	3,99	917	0,004
Promedio					0,056

Tabla 25: Velocidades Vmb y promedio según método estacionario.

Mientras que en la figura 56 y la figura 57 podemos ver las distintas velocidades graficadas en la sección de análisis.

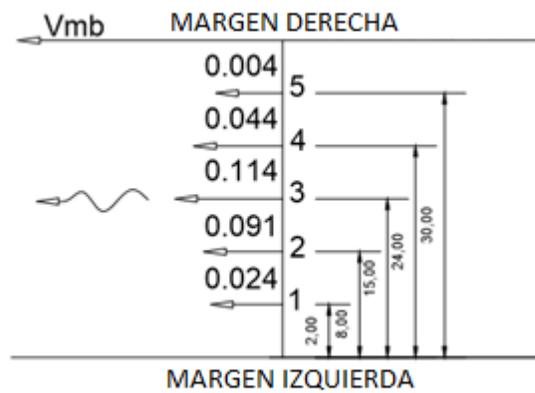


Figura 56: Perfil de velocidades con el punto 3 a 15m de la orilla.

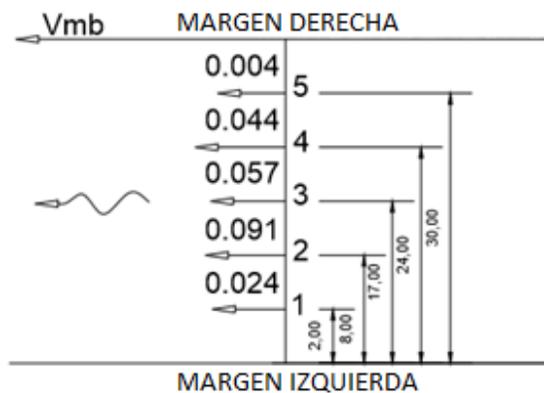


Figura 57: Perfil de velocidades con el punto 3 a 17m de la orilla.

6.3.3 Método SMBA

El SMBA (Stationary Moving Bed Assesment) es un tipo de medición estacionaria que se utiliza para evaluar el transporte de fondo. Para este tipo de medición la velocidad de flujo se calcula con menor precisión.

En la figura 58, figura 59, figura 60 y figura 61 se ven las capturas de pantalla del programa RiverSurveyor Live de estas mediciones. Al igual que en los estacionarios, en color azul se puede ver la trayectoria detectada por el Bottom Track, mientras que en amarillo la posición según el GPS. A partir de la distancia recorrida por Bottom Track se puede calcular una velocidad de fondo V_{mb} .

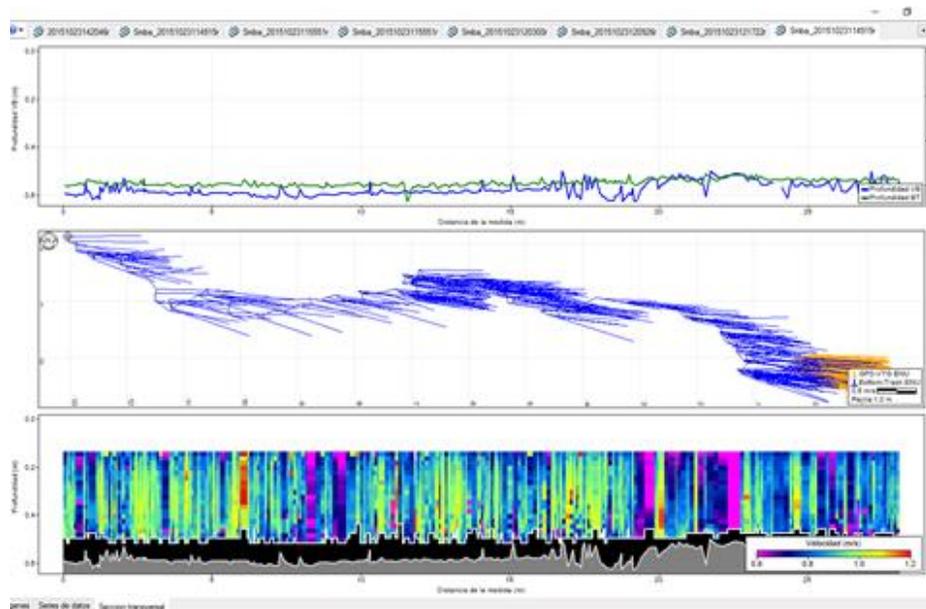


Figura 58: Captura de pantalla del SMBA 114915.

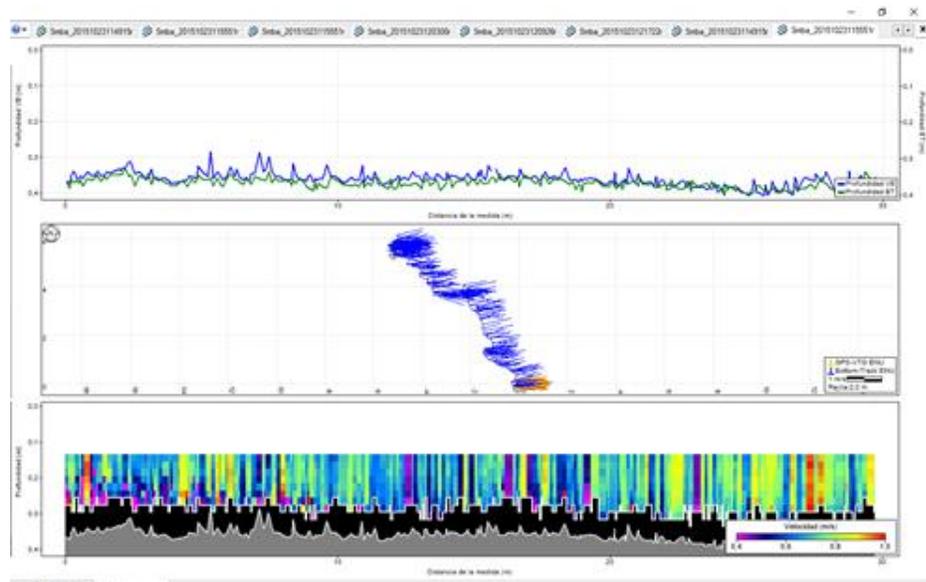


Figura 59: Imagen de transecta 11551 de la sección del río.

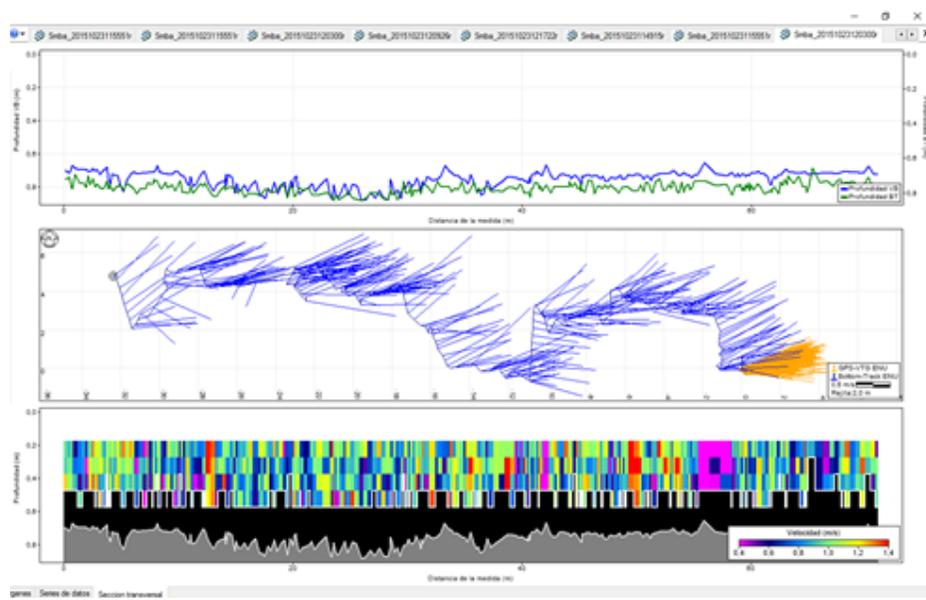


Figura 60: Imagen de transecta 120300 de la sección del río.

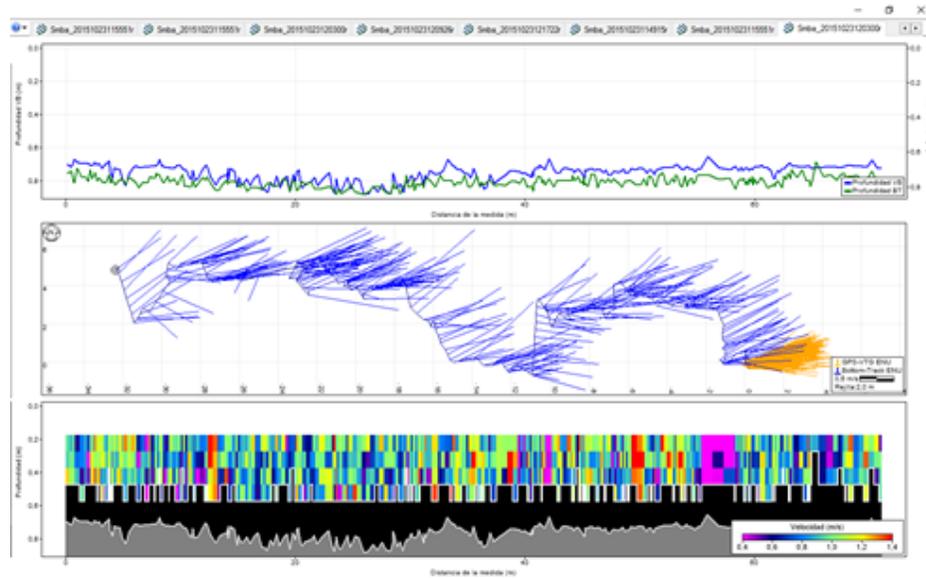


Figura 61: Imagen de transecta 120926 de la sección del río.

En la figura 62 se puede ver el resumen de las velocidades obtenidas con el SMBA en cada punto.

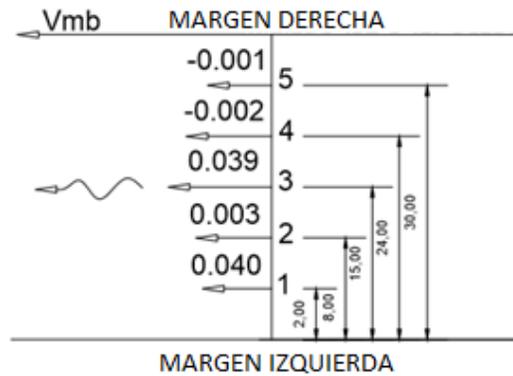


Figura 62: Perfil de velocidades con el punto 3 a 15m de la orilla.

En la tabla 26 podemos ver las velocidades de fondo móvil (Vmb) en cada uno de los puntos de la sección como así también el promedio.

Ubicación	Distancia a m. izq. [m]	Transecta	Vmb(m/s)
1	2	114915	0,040
2	8	115551	0,003
3	16	120300	0,039
4	24	120926	-0,002
5	30	121722	-0,001
Promedio			0,016

Tabla 26: Velocidades Vmb y promedio según método SMBA.

Los resultados del SMBA no fueron muy buenos ya que aparecen velocidades de fondo móvil muy bajas o incluso negativas. Además, comparando Vmb promedio de los SMBA en la sección con la Vmb del Loop Method da muy diferente.

6.3.4 Método LOOP

Para el método Loop la captura de pantalla del programa RiverSurveyor Live se puede ver en la figura 63.

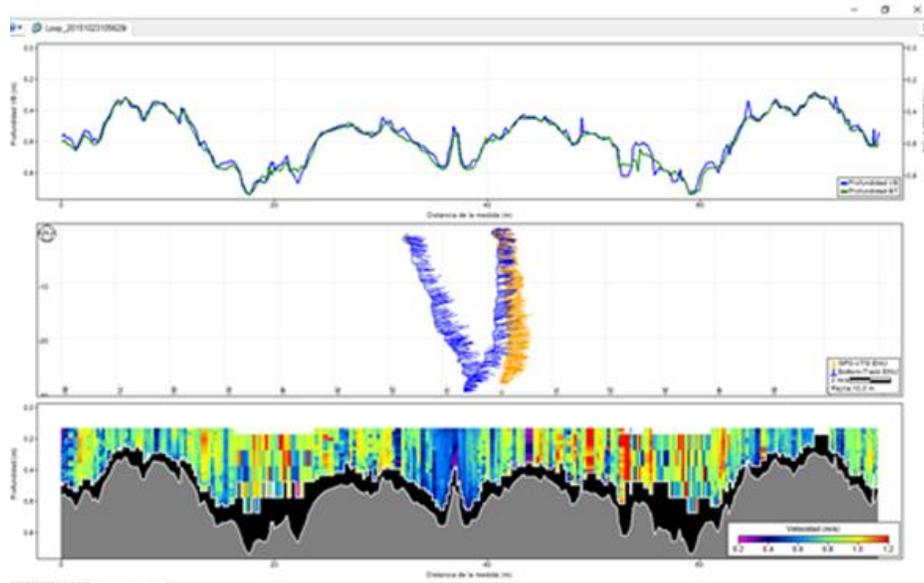


Figura 63: Imagen del método Loop en la sección de medición.

Como se puede observar en la figura 63 se forma una 'V' en la trayectoria del ADCP según Bottom Track, lo que indica que hay transporte de fondo. La velocidad promedio resultante del Loop method es de $V_{mb} = 0,06$ m/s.

En la figura 64 podemos observar los puntos de medición como así también las velocidades resultantes de los métodos Estacionarios, SMBA y Loop Method.

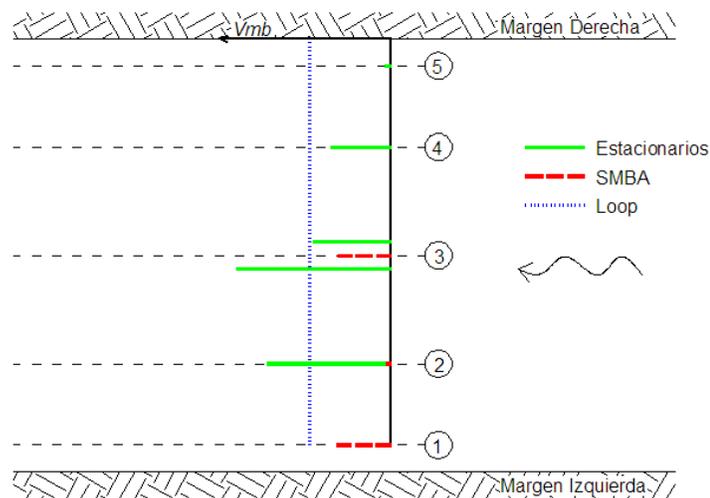


Figura 64: Velocidades resultantes - método Estacionario, SMBA y Loop Method.

6.4 CONCLUSIONES DE LAS MEDICIONES CON ADCP:

-Calculando el promedio de las velocidades de fondo de los distintos puntos para el método estacionario, tenemos que $V_{mb1}=0,055$ m/s, $V_{mb2}=0,044$ m/s, por lo tanto

$$V_{mb(EST)} = 0,050 \text{ m/s}$$

-Calculando el promedio de las velocidades de fondo móvil de todos los puntos medidos, pero SMBA, se tiene que:

$$V_{mb(SMBA)} = 0,0158 \text{ m/s.}$$

(Notar que hay 2 velocidades que dan negativas)

-Considerando la velocidad medida por medio del método Loop, tenemos que

$$V_{mb(LOOP)} = 0,06 \text{ m/s}$$

A partir de los valores anteriores se puede observar que los resultados de velocidad de fondo móvil obtenido con las mediciones estacionarias comunes fueron más precisos que los del SMBA, esto comparando con la velocidad promedio de la sección obtenida

con el método Loop. Hay que considerar que las mediciones estacionarias se realizaron más largas que las del SMBA (alrededor de 5 minutos, 300 segundos).

6.5 MEDICIÓN DE TRANSPORTE DE FONDO CON LA TRAMPA TIPO HALLEY-SMITH

En la tabla 27 se puede ver el análisis de las muestras de transporte de fondo de la trampa tipo Halley–Smith. La medición con este instrumento resultó difícil ya que por la presencia de formas de fondo (dunas) según dónde se ubicara la trampa era la cantidad de sedimento que ingresaba. Cuando estaba aparentemente en un valle (mayor profundidad) la trampa salía vacía, mientras que cuando estaba en una cresta (menor profundidad) ingresaban mayor cantidad de sedimentos.

Ubicación	Hora [hs]	Tiempo [min]	Peso [g]	Q1a [g/s]	Q1b [g/s.m]	Q1b prom [Kg/s.m]
2	15:32	3	397,10	2,21	25,36	0,02
2	16:20	8	440,00	0,92	10,54	
2	16:33	6	660,60	1,84	21,09	
3	16:45	6	867,80	2,41	27,71	0,03
3	16:58	6	1178,90	3,27	37,64	

Tabla 27: Análisis de muestras de campaña con trampa tipo Halley-Smith.

Dónde:

Q1a: Este caudal representa la cantidad de gramos de sedimentos por segundo que entran en la trampa.

Q1b: Este caudal representa la cantidad de gramos de sedimentos por segundo y por unidad de longitud que entran en la trampa.

6.6 RESULTADOS DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN

Luego de analizar las muestras obtenidas en campaña realizadas con las trampas tipo DH - 48, se llegó a la conclusión rápidamente de que el sedimento en suspensión era prácticamente despreciable, esto se puede ver en la figura 65.



Figura 65: Medición de sedimentos en suspensión – Trampa DH - 48.

Capítulo 7:

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

- Si bien los estudios relacionados con el transporte de sedimentos son numerosos, pocos hasta la actualidad han estudiado la relación entre el rebote acústico del ADCP SonTek S5 para aguas poco profundas y la concentración de sedimentos, resultando en un área de vacancia con mucho potencial.
- A través de los ensayos en el tanque de fibrocemento resultó que los instrumentos acústicos (ADV y ADCP) presentan gran potencial para utilizarse como estimadores de la concentración de sedimentos en suspensión, a través de una relación logarítmica con el SNR medido. Se obtuvieron mejores resultados con el ADV, alcanzando la curva de ajuste un coeficiente de correlación de 0,93 de la relación concentración-SNR y uno igual a 0,94 la relación concentración-amplitud. Discriminando por el tipo de sedimento utilizado se mejoró el ajuste, superando la correlación el 0,96 en todos los casos. Por lo tanto, para el ADV se hallaron buenas curvas de calibración.
- Por otro lado, con el ADCP se encontró una baja relación entre la concentración y el SNR al utilizar suelo pasante del tamiz 200 como sedimentos (diámetro inferior a 0,074 mm), ya que los coeficientes de correlación fueron 0,25 y 0,63 para el modo coherente e incoherente respectivamente. Utilizando arcilla y la fracción pasante tamiz 100 y retenido tamiz 200 del suelo de Ciudad Universitaria los resultados fueron mejores, con coeficientes de correlación mayores a 0,90. Sin discriminar por tipo de sedimento los resultados no son buenos, por lo que para aplicar esta metodología resulta necesario conocer el tamaño de sedimento a analizar. Comparando los dos modos de medición coherente incoherente este último resultó entre 15 y 20 % mayor al del modo coherente.
- Las experiencias de campaña en el trabajo de campo reflejaron los verdaderos problemas e inconvenientes que se pueden encontrar para la realización de una medición. El ADCP es un aparato fiel siempre que se tomen los recaudos necesarios y se trabaje bajo las condiciones de fabricación del mismo, por ejemplo influyen en la calidad de las mediciones el lugar que se elige para

recorrer la sección, la ubicación para la calibración de la brújula (cantidad de satélites que intervienen en la medición, presencia de antenas de teléfonos, torres de alta tensión, etc.) ubicación segura para el operario, entre otras cuestiones.

- Sobre las técnicas de medición de transporte de sedimentos convencionales las incertidumbres son mayores importantes, por eso hay que tener ciertos cuidados. Por ejemplo cuando se midió con la trampa Halley – Smith (transporte de fondo) se debió modificar el punto de medición debido a la presencia de formas de fondo (dunas) afectaba la muestra, siendo máxima en la cresta y prácticamente nula en el valle, además del tiempo y la posición del instrumento en el fondo y respecto al flujo.
- En relación a las mediciones de sedimentos se observó que las trampas Halley – Smith (que se utilizan para el transporte de fondo) además de ser peligrosas para el operario, los resultados presentan una gran dispersión. Esto es así según dónde se coloca el aparato, el cual debe estar apoyado sobre el fondo y no enterrado entre otras cosas, y en caso de haber formas de fondo si se mide en una cresta o un valle de dunas, por ejemplo. En relación a las trampas tipo DH-48 en este caso fueron de poca utilidad ya que el transporte por suspensión en el día de la campaña era prácticamente nulo, aun así se aprendió la metodología de medición.
- Tipo y cantidad de transporte de sedimentos
 - Según el material fondo recolectado con la trampa tipo Halley – Smith los resultados dieron un caudal sólido por unidad de longitud de $Q = 0,02-0,03$ Kg/s.m.
 - Según el material en suspensión medido con la trampa tipo DH-48, este fue escaso casi despreciable.
 - El D50 medido se determinó a partir de la curva granulométrica, obtenida del tamizado de las muestras analizadas por de vía húmeda y en seco, arrojó un valor $D50 = 1,09$ mm, mientras que para Díaz Lozada fue $D50 = 0,75$ mm.

➤ **Conclusión personal:**

Ser parte de este gran grupo y poder colaborar en un proyecto tan grande como es el de la caracterización de sedimentos sin duda abrió la expectativa de querer el día de mañana trabajar en algo similar.

Los conocimientos adquiridos a partir de la elaboración de esta Práctica Supervisada si bien son de carácter de laboratorio o científico, sirvieron para darme cuenta de que tan importantes son estas herramientas para resolver problemas cotidianos que están presentes en todos los ríos. La caracterización de sedimentos es una vacante importante para estimar el/los daños que puedan causar ya sea en pilas de puentes, márgenes de ríos, socavaciones, colmatación de presas entre otras cosas.

Las materias como lo son Mecánica de los fluidos, Hidrología y procesos Hidráulicos y Obras Hidráulicas fueron pilares fundamentales para poder comprender estos estudios y cada uno de los dispositivos empleados para este trabajo (ADCP y ADV entre otros).

7.2 RECOMENDACIONES

Algunas de las recomendaciones que se pueden dar para continuar con los ensayos son:

- Usar sedimentos de diferentes granulometrías para los ensayos de laboratorio ya sea para el dispositivo ADCP como para el dispositivo ADV.
- Realizar ensayos con un tanque de fibrocemento más grande.
- Realizar ensayos con una sección cajón para simular un río con mejor aproximación.
- En campaña se podría medir con ADCP y con métodos convencionales al mismo tiempo para saber efectivamente cual es el error que se tiene en la estimación del transporte de sedimentos.
- Se debería buscar una sección de canal tal que para cualquier punto de la sección que se tome, las mediciones con el ADCP estén cubiertas con la mayor cantidad de satélites.

REFERENCIAS

- **Barchiesi, G.** (2014). "Cuantificación y caracterización del escurrimiento superficial en la cuenca del río Carcarañá". Práctica profesional supervisada de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba.
- **Gaeuman, D.; Jacobson, R.B.** (2006). "Acoustic bed velocity and bed load dynamics in a large sand bed river," *Journal of Geophysical Research*, 111, F02005.
- **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; 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" *Elsevier, Marine Geology*, v. 211, p. 169–187.
- **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
- **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.
- **Jamieson, E. C., Rennie, C. D., Jacobson, R. B., and 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). "Measurement of flow velocity and sediment transport with an acoustic Doppler current profiler," *Geomorphology*; Vol. 68, 25-37.
- **Latosinski, F. G.; Szupiany, R. N.; García, C. M.; Gallego, M.; Amsler, M. L. y Pujol, A.** (2011). "Estimación de la Concentración y Transporte de Sedimentos

- de Fondo en Suspensión con Perfilador Acústico Doppler”. Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos 2011.
- **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.
 - **Rennie, C. D., Millar, R. G., and Church, M. A.** (2002). “*Measurement of bedload velocity using an acoustic Doppler current profiler,*” J. Hydraulic Engineering, 128(5), p. 473-483.
 - **Rennie, C.D., Villard, P.V.** (2004); “*Site specificity of bedload measurement using an ADCP,*” Journal of Geophysical Research (Earth Surface); Vol. 109.
 - **Sontek, 2013,** “*RiverSurveyor S5/M9 System Manual*”. Manual del usuario para la operación de ADCP S5/M9.
 - **Szupiany, R. N.; Amsler M. L.; Parsons D. R., and 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.
 - **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.
 - **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.
 - **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.
 - **Wikipedia** (2016). “Río Tercero”.
 - **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
 - **Wood, M.; Fosness, R.; Pachman, G.; Lorang, M.; Tonolla, D.** (2015). “*Evaluation of Multiple-Frequency, Active and Passive Acoustics as Surrogates for Bedload Transport*”. *SEDHYD 2015, 10th Federal Interagency Sedimentation Conference, 19-23 Abril 2015.*

ANEXO

ANEXO

CURSO “USING ADCPS IN MOVING BED CONDITIONS”

Capítulo N° 1: Efecto de un lecho móvil de medición de descarga

1- ADCP

Los ADCPs comenzaron a utilizarse para medir el caudal en numerosos lugares debido a su precisión y eficiencia. La medición con estos instrumentos presenta algunas dificultades para casos de crecidas con altas concentraciones de sedimentos, ya que bajo estas condiciones se puede estar midiendo con un lecho móvil. El efecto del fondo móvil es importante, porque afecta al cálculo de la velocidad de flujo y por lo tanto al caudal.

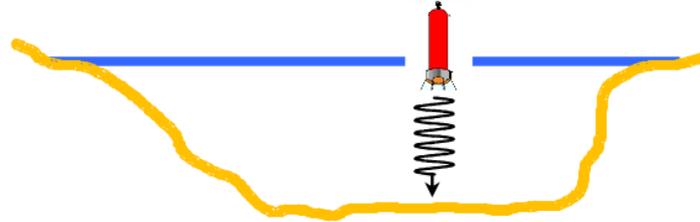
2- Medición de velocidad con ADCP

La velocidad medida con ADCP con plataforma móvil es una velocidad relativa al instrumento, entre la velocidad del agua y la del bote. Por lo tanto, para calcular la velocidad del agua realiza una operación algebraica entre la velocidad medida y la velocidad del bote. Es por eso que la velocidad del bote debe ser medida.



3- Bottom Track

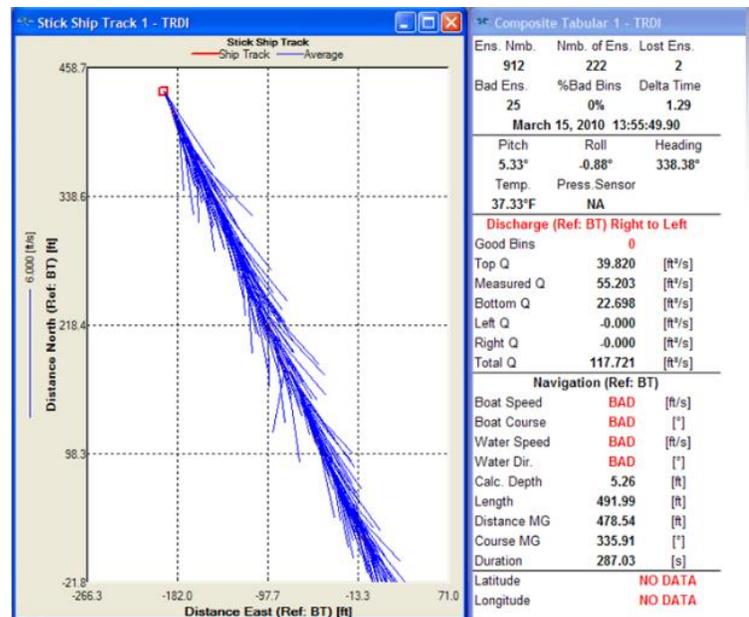
La velocidad (magnitud y dirección) del bote puede ser medida por el ADCP, usando la técnica llamada “Bottom Track” en donde se utiliza el efecto Doppler y el instrumento usa como referencia el fondo. Para ello utiliza uno de los sensores ubicado verticalmente con una frecuencia diferente a la de los de medición de velocidad. Asumiendo que el lecho del río no se mueve, las mediciones dan como resultado la velocidad del agua.



4- Ejemplo de medición con lecho móvil

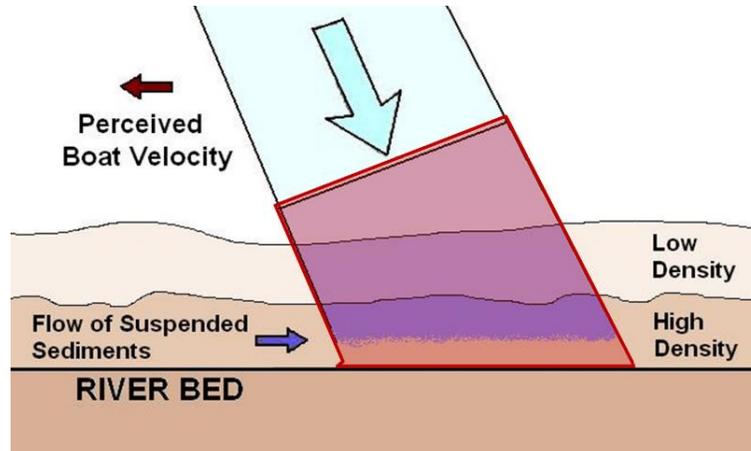
Si se utiliza el Bottom Track para medir la velocidad el lecho debe ser estacionario, de lo contrario el transporte de sedimentos y otros materiales en suspensión y agregado rodando y saltando sobre el lecho lo modifican, invalidando esta hipótesis. Este transporte es la causa del algoritmo para mediciones con Bottom track que permiten calcular la velocidad de transporte de fondo.

La siguiente captura de pantalla ilustra las mediciones del movimiento del bote, en donde la línea azul representa los vectores de la velocidad del agua y el cuadrado pequeño el bote. La posición del es fija, pero el Bottom track es afectado por el transporte de sedimentos. El ADCP reconoce como si el bote se moviera, pero en realidad es el lecho del río el que se mueve.



5- Causa de un lecho móvil

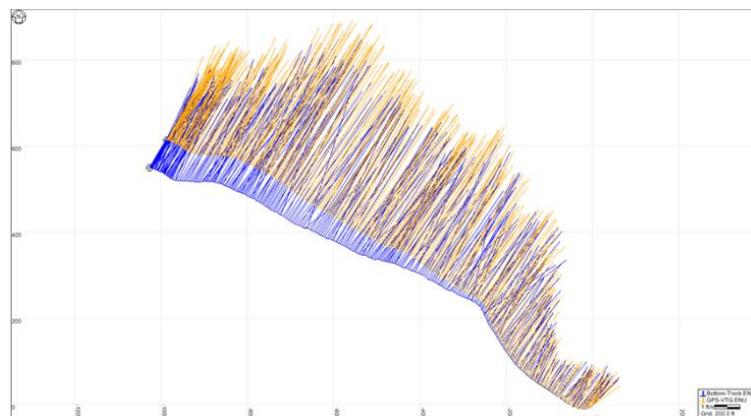
Una de las posibles causas es el transporte de material (sedimentos o material orgánico). Respecto al lecho este material rola o salta como puede observarse en la siguiente imagen.



El movimiento del lecho es llamado wáter bias, y este afecta a la medición de la velocidad del bote y a la profundidad, es por eso que resulta necesario usar un GPS.

6- Transecta con movimiento de fondo

En esta imagen se observa una transecta usando el GPS, en donde el movimiento del bote (color amarillo) se compara con el movimiento del fondo del lecho (color azul). La diferencia entre estas trayectorias señala la presencia de fondo móvil, aunque resulta de gran importancia la calibración magnética para que esto no sea por un error del GPS.



En resumen:

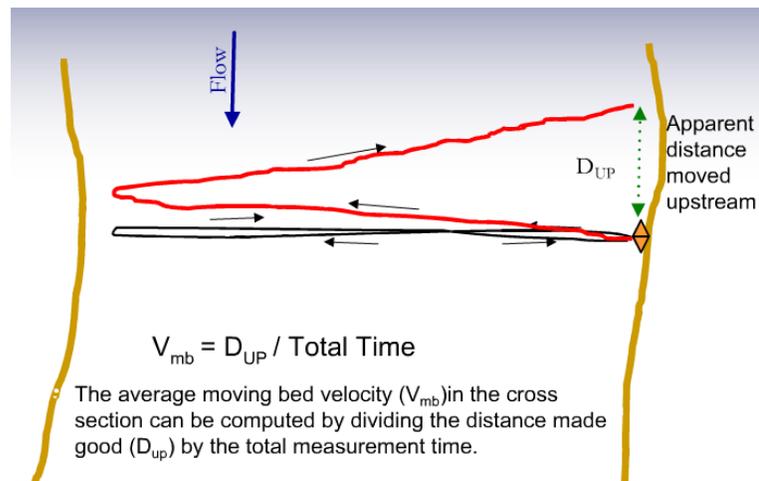
- El movimiento del lecho causa una falsa velocidad del bote aguas arriba.

- El movimiento de un lecho causa disminución de la velocidad y la descarga.
- Utilizando Bottom track se asume que el fondo es estacionario, sin embargo si hay transporte del material de fondo esto no es del todo válido.
- Si el Bottom track es afectado por el transporte de sedimentos, la medición de la velocidad del bote será parcial y en dirección contraria al movimiento del sedimento. Además en condición de lecho móvil el bote aparecerá aguas arriba en el gráfico de trayectorias.
- Los métodos de medición para condiciones de lecho móvil son:
 - Método GPS.
 - Loop Method.
 - Test múltiple de lecho móvil.
 - Método secc-mid.
 - Método de corrección azimuth.

Capítulo N° 2: Determinación de las condiciones de un lecho móvil – Método Loop

El método Loop (también conocido como método del lazo) se basa en realizar el recorrido de la sección midiendo con el ADCP de una margen a la otra del río y así de vuelta, volviendo al mismo punto de salida. En caso de existir un movimiento del fondo éste será el causante de distorsionar el Bottom track aguas arriba. Básicamente lo que mide el instrumento es el tiempo total en atravesar el río y la distancia Made good “Dup”, que sirve para calcular la velocidad del agua, y así calcula una velocidad de fondo móvil “ V_{mb} ”

$$V_{mb} = \frac{Dup}{Tiempo\ total}$$



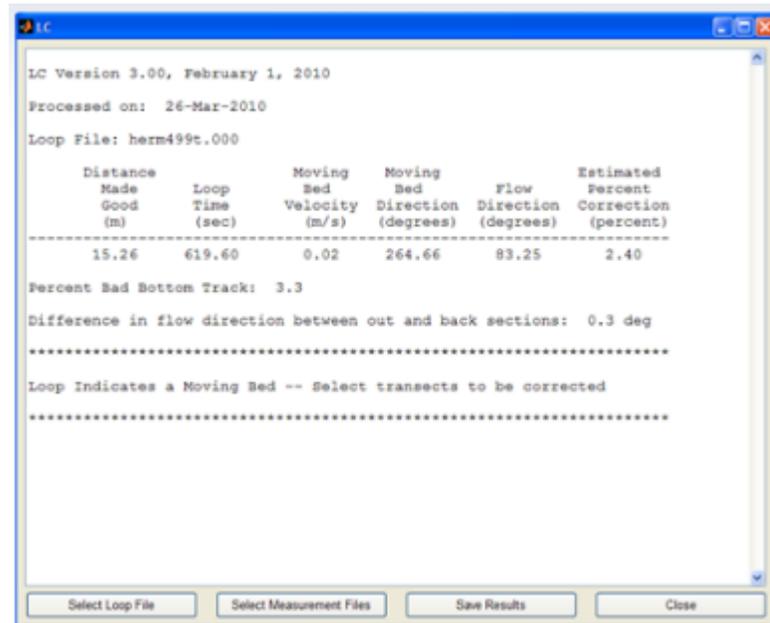
Hay que tener en cuenta que errores de la brújula afectan el método Loop. Una de las causas de los errores suele ser la distorsión con objetos magnéticos (acero, hierro). Según el tipo de material la distorsión puede ser mayor o menor, y es por eso que la brújula se calibra en el campo.

Método Loop paso a paso:

- 1- Establecer una marca al comenzar la medición (para referenciarse).
- 2- Calibrar la brújula del ADCP.
- 3- Realizar un lazo cruzando el río y volviendo a la posición de inicio. Considerar mantener uniforme la velocidad del barco, utilizar Bottom track y que la duración sea mayor a tres minutos.
- 4- Computar la velocidad V_{mb} y conocer la velocidad media del flujo V_{mean} .
- 5- ¿Existe el movimiento del lecho?

Hay fondo móvil si $V_{mb} > 0,04\text{ft/s}$ y $V_{mb}/V_{\text{mean}} > 0,01$

- 6- Realizar transectas para medir caudal.
- 7- Computar los caudales con la corrección por fondo móvil. Para la corrección de caudal por lecho móvil se recomienda el uso del software "LC", considerando las siguientes recomendaciones:
 - Verificar error de cierre en la dirección aguas arriba (cuando la dirección del moving bed es aproximadamente 180° de la dirección del flujo se aplica esta corrección).
 - Minimizar el % de error del Bottom track (menor al 5% es lo recomendable).
 - Chequear el error de la brújula (éste se da cuando la dirección del flujo excede los 5° respecto de la sección atrás del loop).
 - Aplicar el criterio para determinar si es necesaria la corrección (Cuando la velocidad del fondo es insignificante, entonces no debemos hacer la corrección).



Capítulo N° 3: Determinación de fondo móvil usando el Método estacionario.

En principio el método estacionario se usa cuando el método Loop no es apropiado, esto es cuando:

- El instrumento no posee brújula.
- La brújula no se puede calibrar.
- El Bottom track no se mantiene a lo largo de la sección.
- El instrumento no regresa a la posición inicial.

Criterios para la medición por método estacionario

- La necesidad para una corrección o uso de GPS se basa sobre el % de error potencial (velocidad del lecho móvil / velocidad media del agua).

Los distintos tipos de estacionarios son:

Stationary Test Deployment	Duration of Test	% Potential Error
Tethered boat	5 min	1%
Manned boat (anchored)	5 min	1%
Manned boat (no anchor, no GPS)	10 min	2%
Manned boat with GPS	5 min	1%

Ensayo Estacionario sin GPS

- 1- Seleccione la localización en la sección de máxima cantidad de sedimentos esperada.
- 2- Mantener el bote en posición estacionaria mientras se mide con el ADCP durante 5 minutos si el bote está anclado y durante 10 minutos si el bote se mueve aguas arriba o aguas abajo.
- 3- Si presenta condición de lecho móvil aparecerá un movimiento aguas arriba en el plot.
- 4- Calcular la velocidad del lecho móvil V_{mb} dividiendo la distancia del movimiento aparente del bote aguas arriba por la duración del ensayo.

$$V_{mb} = \frac{V_{mb}}{V_{avg}} \cdot 100$$

- 5- Computar el error potencial dividiendo la velocidad del lecho móvil por la velocidad del agua para el ensayo.

$$Error\ potencial = \frac{V_{mb}}{V_{avg}} \cdot 100 \text{ Si } > 1\% \text{ se mueve.}$$

El programa computacional RiverSurveyor no reporta el valor de la velocidad V_{avg} , entonces debe estimarse mirando mediciones individuales, a partir de una serie de velocidades normales, visualizando promedios de parcelas del plot o utilizando SMBA.

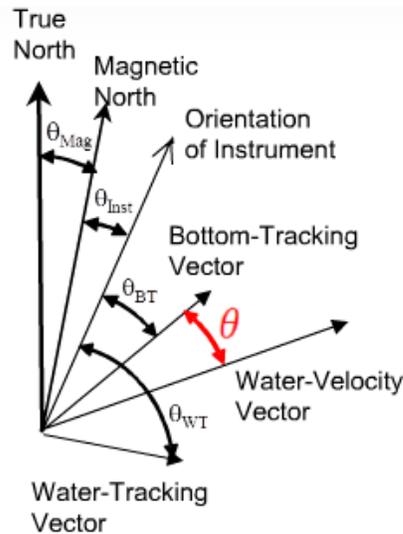
Ensayo Estacionario con GPS

- 1- Seleccione la ubicación para el ensayo en la sección de máxima cantidad de sedimentos esperados.
- 2- Mantener el bote con ADCP en posición estacionaria mientras mide durante 5 minutos.
- 3- Comparar la medición del barco usando Bottom track y usando GPS.
- 4- Calcular la velocidad del lecho móvil dividiendo la distancia del movimiento aparente del bote aguas arriba (BMG-GMG mag) por la duración del ensayo.
- 5- Comparar el error potencial dividiendo la velocidad del lecho móvil por la velocidad del agua para el ensayo.

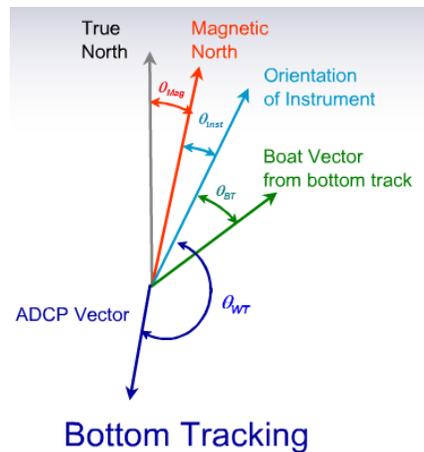
$$\mathbf{Error\ potencial} = \frac{\mathbf{Vmb}}{\mathbf{Vavg}}$$

Capítulo N° 5: Uso del GPS en el Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP).

Para calcular el caudal es necesario conocer el ángulo entre el vector velocidad del agua y el vector velocidad del Bottom track. Cuando se usa el Bottom track no hay problema porque ambos vectores están referenciados al instrumento. Sin embargo, cuando se usa GPS, determinar el ángulo θ resulta más difícil.

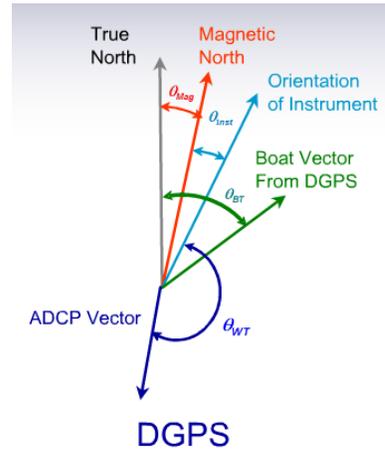


La brújula es importante cuando se utiliza el Bottom track ya que la dirección de la velocidad relativa del agua y la de la velocidad del Bottom track están referenciadas al instrumento.



Cuando se utiliza el GPS diferencial (DGPS) el vector velocidad del bote está referenciado al norte verdadero, mientras que el vector de la trayectoria del agua sigue referenciándose al instrumento. La calibración del compás se usa para determinar la

orientación del instrumento respecto al norte magnético (θ_{inst}) y luego se necesita la declinación magnética (θ_{mag}) para referenciar el instrumento al norte magnético.



Conclusiones:

-Para el Bottom track los errores de la brújula causan un error rotacional en el vector velocidad, pero la magnitud de la velocidad no es afectada.

-Cuando se usa el GPS el efecto de la brújula es importante. Los errores de la brújula pueden causar errores en los caudales medidos que son proporcionales a la velocidad del bote.

La variación magnética es el ángulo entre el campo magnético local y el norte verdadero. Es positivo cuando el norte magnético está hacia el este del verdadero y negativo cuando está hacia el oeste. Varía de lugar a lugar y además con el tiempo.

Errores de la brújula

-Aceleraciones horizontales causadas por el manejo del bote.

-“Hard iron” (un ciclo de error): Imanes permanentes y conductores con corriente.

-“Soft iron” (dos ciclos de errores): Hierro y material magnéticamente permeable cerca del sensor de la brújula.

Recomendaciones:

- Mover el bote lentamente (y suavemente) minimiza el efecto de los errores de la brújula en los caudales.
- Para cada marca del instrumento hay una rutina de calibración de campo.

Calibración de la brújula para el SirverSurveyor:

- Es una multi-calibración inclinada que necesita dos circuitos completos con balance y cabeceo del instrumento (y el bote).

- Una calibración con mínimo cabeceo y balance es aceptable solo si así sea durante la medición. Luego de la calibración el programa da un puntaje y un breve comentario sobre los resultados.

Puntaje de la calibración:

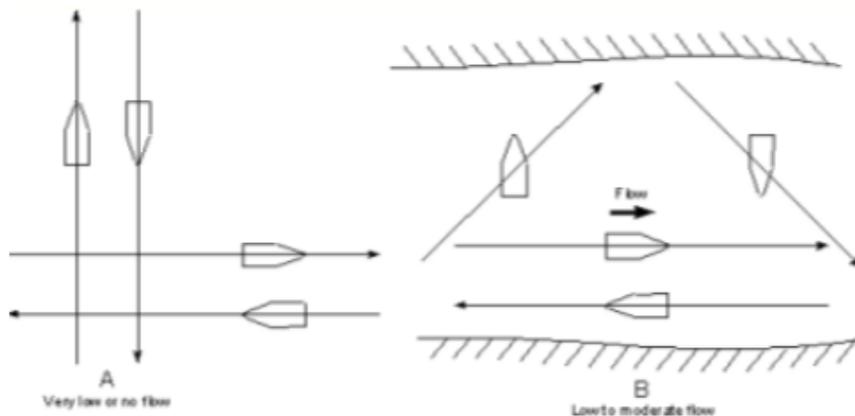
M: Hay una distorsión magnética => tiene que ser muy bajo (<10) / no es tan así cuando el balance y cabeceo es mínimo.

Q: Puntaje de la calibración => tiene que ser muy alto (entre 1 y 10).

Técnica de medición de variación magnética en el campo:

En principio esto es válido cuando no hay fondo móvil.

- 1- Hacer dos pasadas con partidas recíprocas.
- 2- Anotar GC-BC para cada pasada.
- 3- Hacer dos pasadas más con dirección perpendicular a las dos primeras.
- 4- Anotar GC-BC de cada uno.
- 5- Promediar los cuatro valores.



Efecto de la brújula:

- La brújula no afecta los caudales si la referencia es Bottom track. **Si es GPS GGA o GPSTG la brújula es muy importante.**
- Los errores de la brújula pueden resultar de una calibración pobre o de una variación magnética incorrecta.
- Si la brújula tiene error, el caudal medido en cualquier transecta esta sesgado tanto hacia arriba como hacia abajo. Un conjunto de transectas con error de brújula va a mostrar una tendencia (sesgo) bidireccional => las

transectas en una dirección son más grandes (dan mayores caudales) que las transectas en la otra dirección (ida y vuelta).

- Los errores causan un Caudal medido incorrecto y un sesgo direccional en transectas recíprocas.

Comparación entre VTG y GGA:

Características del GPS	VTG	GGA
requiere al menos 4 satélites	si	si
calidad de una información influenciada por PDOP	si	si
Fuertemente influenciado por "multipath" y cambios satelitales		si
afectada por retardos en la señal que rebota en dos objetos o por la distorsión atmosférica		si
requiere corrección diferencial por uso con ADCP		si

Asegurar la calidad de la información del GPS:

- Empieza en el campo => conocer que la información del GPS es pobre.
- Hay tres formas.
 - 1- Chequear las características del GPS.
 - 2- Evaluar la velocidad del bote en series de tiempo.
 - 3- Comparar la trayectoria del bote.

Para el RiverSurveyor Live:

-Altitud: No debe cambiar más de 3m durante la medición.

-Satélites: Muestra el numero de satélites que el receptor esta rastreando y tiene disponible para la determinación de la posición de la velocidad.

Calidad GPS:

- a) 1 para ninguna corrección diferencial.
 - b) 2 para una corrección diferencial SBAS.
 - c) 4 para una corrección diferencial RTK.
- GPS age: Es el tiempo trascurrido desde que se reciben los últimos datos de corrección diferencial.

-HDOP: Es la dilución horizontal de la precisión. HDOP es similar al PDOP que es una medida de la exactitud del GPS relacionada a las posiciones individuales de los satélites que son rastreados por el receptor del GPS. (Valores < 2 son aceptables).

Capítulo N° 8: Método Loop

La incorporación del GPS a la medición de velocidades con el ADCP ha demostrado disminuir los errores sistemáticos o asociados al fondo móvil. Algo importante a tener en cuenta es que el GPS no trabaja en todas las condiciones, por ejemplo: zonas con muchos árboles, cerca de puentes, entre otros.

Cuándo utilizar el método Loop:

- El método Loop debe utilizarse cuando se ha detectado fondo móvil y el GPS no está disponible.
- Es solo aplicable cuando se puede mantener el Bottom track en toda la sección.
- $Q=A.V_{mb}$, esto se utiliza para computar la reducción en el caudal causado por el fondo móvil. Existen dos métodos para establecer esta corrección.
 - Método de corrección de la media.
 - Método de corrección distribuida.

Método de corrección de la media:

Es la forma más simple de computar el caudal perdido debido al fondo móvil.

$$Q_{\text{corregido}} = Q_{\text{media}} + V_{mb}.A_{pf}$$

V_{mb}: Velocidad del fondo móvil medida con el método Loop.

A_{pf}: Área medida perpendicular a la dirección del flujo.

Este método de corrección es simple de aplicar, pero no tiene en cuenta la forma de la sección transversal y la correlación especial del transporte de sedimentos con la distribución especial deseada en la sección transversal.

Método de corrección distribuida:

Este método fue desarrollado para aplicar en secciones irregulares y para velocidades de fondo móvil que no están distribuidas uniformemente. La velocidad de fondo es desconocida en cada punto, pero es razonable suponer que la velocidad del lecho es proporcional a la velocidad del agua cerca del fondo, aunque no siempre es así.

- Computa la velocidad cerca al lecho (10% de la profundidad en cada perfil de la sección) extrapolar la velocidad medida en el última celda usando una ley exponencial a la 1/6.
- Para determinar la corrección, la velocidad del fondo móvil medida en el Loop es distribuida a cada perfil del ADCP según una relación entre la velocidad

cerca al lecho del agua y en cada perfil y la velocidad media cercana al fondo de la sección.

- Las velocidades del fondo móvil distribuidas son aplicadas a las velocidades del bote y del agua, para todas las celdas en cada perfil de la sección medida, para obtener los vectores velocidad del agua y velocidad del bote que son usadas para calcular el caudal medido corregido.
- Finalmente el caudal corregido es calculado usando la relación Q_{mc}/Q_m (corregido/inicial) aplicado al caudal de fondo y de arriba (Q_b :Bottom, Q_t :Top)- Se asume que las velocidades cercana a las márgenes son suficientemente bajas de manera tal que no causan movimiento de fondo, por lo tanto no se aplican correcciones a Q_r y Q_l .

$$Q_{\text{corregido}} = Q_{\text{left}} + Q_{\text{right}} + (Q_{\text{medido}} + Q_{\text{extrap}} + Q_{\text{Bottom extrap}}) \times \frac{Q_{\text{correc medida}}}{Q_{\text{medido}}}$$

- Para el método distribuido se utiliza el programa "LC". Este programa lee la medición Loop y determinará si es necesario una corrección por fondo móvil. En caso de ser necesario le propone el usuario seleccionar las transectas para corregirlas.

Ventajas del método Loop:

- 1- No se necesita GPS.
- 2- Considera el fondo móvil en toda la sección de medición.

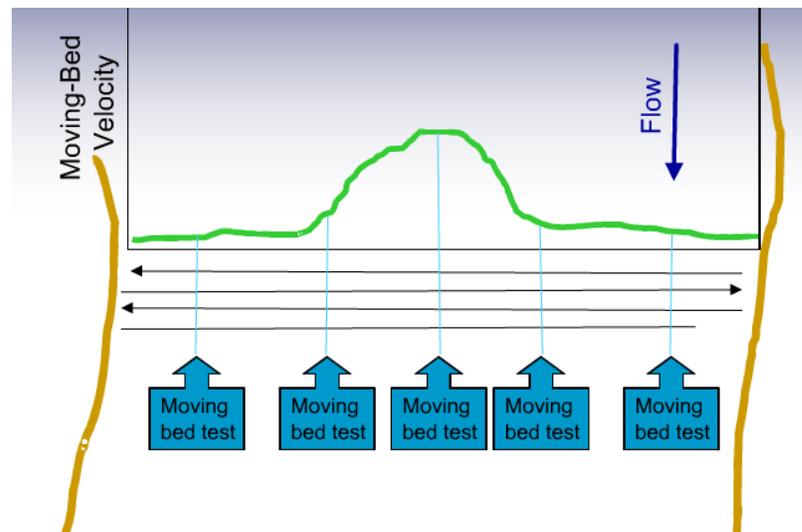
Desventajas del método Loop:

- 1- Se debe establecer un punto de partida y uno de llegada.
- 2- La precisión depende del punto de inicio/llegada.
- 4- Requiere calibrar la brújula.
- 5- Requiere el área perpendicular al flujo.
- 6- Las velocidades aún están sesgadas.
- 7- Se debe mantener el Bottom track.

Capítulo N° 9: Multiple Moving Bed Test Method (SMBA)

Este método se emplea cuando no es conveniente utilizar el método Loop y no se dispone del GSP. También cuando:

- El instrumento no tiene brújula.
- La brújula no puede ser adecuadamente calibrada.
- No se puede mantener el Bottom track.
- El instrumento no puede volver al punto de inicio.



El objetivo de este método es realizar el número suficiente de pruebas estacionarias que permitan un promedio de la velocidad de fondo móvil en la sección. Primero se realizan múltiples estacionarios y luego una medición típica de caudal. Cada SMBA representará el fondo móvil de la mitad de la sección entre el SMBA anterior y el posterior.

Procedimiento:

- 1- Realizar tres SMBA y anotar la ubicación de cada uno; cuanto más se realicen más precisa es la corrección.
- 2- Cada SMBA tiene una duración entre 5-10 minutos dependiendo de la estabilidad.
- 3- Una vez realizado el SMBA se hace la medición de caudal.
- 4- Calcular el caudal corregido usando uno de los tres métodos (A) Método de la subsección, B) Método de la velocidad de fondo móvil promedio, C) Método distribuido usando SMBA)

B) Método de la media

Es el método más simple y puede usarse los cálculos manuales sencillos.

- 1- Calcular la velocidad de fondo móvil V_{mb} para cada estacionario $V_{mb} = DMG/T$.
- 2- Sumar la velocidad V_{mb} de cada transecta y dividirla por la cantidad de ellas.

Ej: si son tres estacionarios, sería:

$$\frac{V_{mb1} + V_{mb2} + V_{mb3}}{3} = V_{mb \text{ promedio}}$$

- 3- Calcular el caudal corregido

$$\sum Q_{\text{corregido}} = Q_{\text{medido}} + \sum (V_{mbi} * A_{pfi})$$

Area debe ser perpendicular al flujo

C) Método distribuido

Se utiliza regresión lineal para encontrar el coeficiente "a" relacionado con la velocidad cercana al fondo y a la velocidad del fondo móvil.

$$V_{mbi} = a * V_{nbi}$$

Si bien la relación entre la velocidad del agua y el transporte de sedimentos no es lineal y también depende de la composición del lecho (que no es tenido en cuenta en este análisis), se han demostrado resultados razonables.

El SMBA calcula las velocidades corregidas del agua y del bote utilizando la relación lineal anterior. Los caudales corregidos son calculados en cada transecta a partir de la velocidad corregida.

$$Q_{mc} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (V_{Eij}^c V_{BNi}^c - V_{nij}^c V_{AEi}^c) b t i$$

$$Q_{tm}^c = Q_l + Q_r + (Q_m + Q_t + Q_b) \frac{Q_{mc}}{Q_n}$$

Ventajas:

- No require DGPS
- No requiere calibración de la brújula.
- Puede usarse en sitios con mal Bottom track

Desventajas:

- Se necesitan múltiples mediciones estacionarias.
- Requiere tiempo.
- No corrige el movimiento del ADCP.
- Las velocidades medidas aún están sesgadas.