







# **EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE COEFICIENTES DE DISPERSIÓN EN RÍOS UTILIZANDO ADCP**

**INFORME FINAL DE PRÁCTICA SUPERVISADA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA  
*Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*

**Autor: FEDERICO CAMINAL**

**Tutor: CARLOS MARCELO GARCÍA RODRÍGUEZ**

**Supervisores Externos: ANA MARÍA COSSAVELLA y JOSÉ MANUEL  
DÍAZ LOZADA**

**Año: 2014**



**Título del Trabajo:** “Evaluación Experimental de Coeficientes de Dispersión en Ríos utilizando ADCP”.

**Nombre del Autor:** Caminal, Federico

**Matrícula:** 35580754

**Carrera:** Ingeniería Civil.

**Plan:** 2005, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba.

**Palabras Claves:** ADCP, Dispersión, Mezcla, Cuenca Río Carcarañá.

### RESUMEN

La cuenca del río Carcarañá, incluyendo a sus principales tributarios, tales como el río Tercero o el Saladillo, entre otros, es una de las principales cuencas superficiales de agua de la Provincia de Córdoba, lo que la convierte en una potencial fuente de agua para consumo de muchas personas y actividades.

Sin embargo, la calidad del recurso hídrico en su cuenca se ve amenazada por la presencia de distintos polos industriales o descargas no controladas de desechos y otras sustancias a lo largo de sus principales cursos de agua. Para evaluar la calidad de este recurso se realiza en este trabajo la caracterización de la hidrodinámica de distintos tributarios del río Carcarañá con fines ambientales y uno de los aspectos más importantes a analizar es la evaluación de la capacidad de mezcla del mismo a través de la determinación de los coeficientes de dispersión (vertical, transversal y longitudinal).

En este trabajo se determina experimentalmente el coeficiente de dispersión longitudinal en distintos tramos de los ríos pertenecientes a la cuenca en estudio en base a mediciones de velocidad con Perfiladores de Corriente Acústicos Doppler - ADCP, utilizando dos tipos de información hidráulica del tramo estudiado. En primer lugar sólo se utilizan las variables hidráulicas globales del río obtenidas del muestreo realizado con ADCP (por ejemplo caudales, velocidades y profundidades medias), y en segundo lugar se tiene en cuenta, además, la distribución transversal de las velocidades longitudinales del flujo y de la geometría de la sección.

A su vez, se describen las técnicas, instrumental y programas computacionales utilizados a lo largo de todo el proceso de análisis, desde la obtención de datos en campo hasta la determinación del coeficiente de dispersión longitudinal buscado.

Finalmente, se contrastan los resultados obtenidos con ambas metodologías y se las compara con resultados estimados utilizando ábacos empíricos disponibles en la literatura, los que fueron construidos con información de ríos con características similares a los analizados en este trabajo.



## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1 - MARCO DE REFERENCIA .....</b>	<b>15</b>
1.1 INTRODUCCIÓN .....	15
1.2 SISTEMA DE ESTUDIO .....	16
1.3 CONCEPTOS BÁSICOS .....	17
1.3.1 Caracterización del Flujo en un sistema fluvial.....	17
1.3.2 Procesos de mezcla en ríos.....	18
1.4 MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE DISPERSIÓN LONGITUDINAL .....	19
1.4.1 Determinación del coeficiente de dispersión longitudinal en base a ecuaciones empíricas .....	19
1.4.2 Determinación del coeficiente de dispersión longitudinal utilizando una ecuación integral y una caracterización hidrodinámica detallada .....	20
1.5 OBJETIVOS DEL TRABAJO .....	22
1.5.1 Objetivo General .....	22
1.5.2 Objetivos Específicos.....	22
1.6 METODOLOGÍA.....	23
<b>CAPÍTULO 2 - INSTRUMENTAL UTILIZADO: ADCP (PERFILADOR DE CORRIENTE ACÚSTICO DOPPLER).....</b>	<b>27</b>
2.1 DESCRIPCIÓN DEL INSTRUMENTO.....	27
2.2 VENTAJAS DEL ADCP SOBRE OTRAS TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE VELOCIDAD DE FLUJO Y CAUDALES .....	30
2.3 ARMADO DEL DISPOSITIVO MÓVIL.....	32
2.4 PROGRAMAS COMPUTACIONALES .....	33
2.4.1 RiverSurveyor Live.....	33
2.4.2 VMT: Programa para el post-procesamiento de datos. ....	40
2.5 RECOMENDACIONES PARA LA MEDICIÓN.....	40
<b>CAPÍTULO 3 - CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE LA HIDRODINÁMICA DEL FLUJO.....</b>	<b>45</b>
3.1 CAMPAÑAS DE MEDICIÓN.....	45
3.2 SITIOS DE MEDICIÓN.....	46
3.3 CARACTERÍSTICAS HIDRODINÁMICAS DE LAS SECCIONES ANALIZADAS.....	53

<b>CAPÍTULO 4 - DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE DISPERSIÓN LONGITUDINAL.....</b>	<b>61</b>
4.1 CONSIDERACIONES PREVIAS .....	61
4.2 RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LAS ECUACIONES EMPÍRICAS PARA ESTIMAR EL COEFICIENTE DE DISPERSIÓN LONGITUDINAL.....	61
4.3 RESULTADOS DE LA ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE DISPERSIÓN LONGITUDINAL UTILIZANDO LA ECUACIÓN INTEGRAL CON CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DETALLADA .....	62
4.3.1 Resultados obtenidos sobre las secciones promediadas .....	64
4.3.2 Resultados obtenidos sobre las secciones promediadas con una mejor aproximación .....	77
4.4 CONTRASTE DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LAS DISTINTAS METODOLOGÍAS EN LAS SECCIONES ANALIZADAS .....	81
4.5 CONTRASTE DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LOS DISPONIBLES EN LA BIBLIOGRAFÍA.....	82
<b>CAPÍTULO 5 - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>89</b>
5.1 CONCLUSIONES GENERALES .....	89
5.2 CONCLUSIONES DE LA PRÁCTICA.....	90
5.3 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS .....	90
5.4 DIFUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....	91
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>93</b>
<b>ANEXO.....</b>	<b>97</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Zona de estudio. ....	16
Figura 1.2. Recursos hídricos estudiados. ....	17
Figura 1.3. Advección, a la izquierda; dispersión, a la derecha. ....	19
Figura 1.4. Perfil de velocidades en función del coeficiente alfa ( $\alpha = \beta$ ). ....	21
Figura 1.5. Distribución asimétrica de velocidades, con $\alpha < \beta$ . ....	21
Figura 1.6. Forma del fondo en función del coeficiente rho. ....	22
Figura 2.1. Funcionamiento del ADCP (extraído del folleto RiverSurveyor - Sontek). .	28
Figura 2.2. Descripción del instrumento utilizado (adaptado del folleto RiverSurveyor - Sontek).....	28
Figura 2.3. Elementos necesarios para el correcto funcionamiento del ADCP. ....	30
Figura 2.4. Módulo de energía y comunicación (extraído del folleto RiverSurveyor - Sontek).....	29
Figura 2.5. Molinete de eje horizontal. ....	31
Figura 2.6. Barco de medición con todos los dispositivos instalados (YSI/Sontek). ....	33
Figura 2.7. Interfaz del programa RiverSurveyor.....	34
Figura 2.8. Información general de la medición.....	35
Figura 2.9. Ajustes del sistema. ....	35
Figura 2.10. Profundidad del transductor -P- y distancia de monitoreo -L-. ....	36
Figura 2.11. Ajustes sobre la medición. ....	36
Figura 2.12. Interfaz del programa RiverSurveyor Live. ....	38
Figura 2.13. Visualización de la pestaña "Muestras" en el programa. ....	39
Figura 2.14. Planilla de resumen de todas las transectas realizadas en una determinada sección.....	40
Figura 2.15. Áreas medidas y áreas estimadas por el ADCP.....	41
Figura 3.1. Ubicación del balneario respecto de la ciudad de Río Tercero.....	46
Figura 3.2. Ubicación de las secciones de medición en el balneario de Río Tercero para la campaña de medición 1. ....	47
Figura 3.3. Balneario de la ciudad de Río Tercero. ....	47
Figura 3.4. Sección sobre el río Saladillo, aguas arriba del cruce de la Ruta Provincial de Córdoba N°6.....	48
Figura 3.5. Realización de transectas durante la campaña de medición 4, río Saladillo. ....	48
Figura 3.6. Realización de transectas durante la campaña de medición 6, río Saladillo.....	48
Figura 3.7. Confluencia de los ríos Tercero y Saladillo. ....	49
Figura 3.8. Sección sobre el río Carcarañá en el cruce de la Ruta Provincial de Santa Fe N°15, relevada en la campaña de medición 6 .....	49

Figura 3.9. Imagen tomada durante la campaña de medición 6, río Carcarañá -Cruz Alta-.....	50
Figura 3.10. Sección aforada sobre el río Carcarañá durante las campañas de medición 6 y 7, en el Parque Sarmiento de la localidad de Carcarañá.....	50
Figura 3.11- Imagen tomada durante la campaña de medición 7, sobre el río Carcarañá -Parque Sarmiento, Carcarañá-.....	50
Figura 3.12. Sección aforada durante la campaña de medición 7 sobre el río Carcarañá, cerca de la localidad de Inrville.....	51
Figura 3.13. Imagen tomada sobre el río Carcarañá durante la campaña de medición 7 -Inrville-.....	51
Figura 3.14. Arroyo Tortugas, en Santa Fe.....	52
Figura 3.15. Imagen tomada durante la campaña de medición 7 en el arroyo Tortugas.....	52
Figura 3.16. Medición sobre cursos angostos, remolcando el ADCP desde las orillas.....	53
Figura 3.17. Medición sobre cursos anchos, remolcando el ADCP desde un puente.....	53
Figura 3.18. Sección promediada, río Tercero, 11-06-12.....	54
Figura 3.19. Sección promediada, río Tercero, 10-09-12.....	55
Figura 3.20. Sección promediada, río Tercero, 12-11-12.....	55
Figura 3.21. Sección promediada, río Saladillo, 11-06-13.....	55
Figura 3.22. Sección promediada, río Saladillo, 11-09-13.....	56
Figura 3.23. Sección promediada, río Carcarañá (Carcarañá), 30-09-13.....	56
Figura 3.24. Sección promediada, río Carcarañá (Cruz Alta), 30-09-13.....	56
Figura 3.25. Sección promediada, río Saladillo, 30-09-13.....	57
Figura 3.26. Sección promediada, río Saladillo, 19-11-13.....	57
Figura 3.27. Sección promediada, río Carcarañá (Carcarañá), 19-11-13.....	57
Figura 3.28. Sección promediada, río Carcarañá (Inrville), 19-11-13.....	58
Figura 3.29. Sección promediada, arroyo Tortugas, 20-11-13.....	58
Figura 4.1. Comparación entre valores de velocidades medias en la vertical registradas en una transecta obtenida al promediar múltiples transectas (4), para sección sobre el río Tercero, campaña de medición 1, 11/06/2012.....	63
Figura 4.2. Comparación entre batimetrías registradas en una transecta obtenida al promediar múltiples transectas (4), para sección sobre el río Tercero, campaña de medición 1, 11/06/2012.....	63
Figura 4.3. Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,821$ y perfil de fondo con $\rho = 1,455$ para río Tercero, 11/06/2012.....	65
Figura 4.4. Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,112$ y perfil de fondo con $\rho = 1,582$ para río Tercero, 10/09/2012.....	66
Figura 4.5. Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,457$ y perfil de fondo con $\rho = 2,072$ para río Tercero, 12/11/2012.....	67



Figura 4.6. Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,180$ y perfil de fondo con $\rho = 1,212$ para río Saladillo, 11/06/2013. ....	68
Figura 4.7. Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,172$ y perfil de fondo con $\rho = 1,404$ para río Saladillo, 11/09/2013. ....	69
Figura 4.8. Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 2,244$ y perfil de fondo con $\rho = 3,070$ para río Carcarañá (Carcarañá), 30/09/2013. ....	70
Figura 4.9. Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 2,022$ y perfil de fondo con $\rho = 1,192$ para río Carcarañá (Cruz Alta), 30/09/2013. ....	71
Figura 4.10. Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,288$ y perfil de fondo con $\rho = 1,087$ para río Saladillo, 30/09/2013. ....	72
Figura 4.11. Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,149$ y perfil de fondo con $\rho = 1,898$ para río Saladillo, 19/11/2013. ....	73
Figura 4.12. Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,411$ y perfil de fondo con $\rho = 10,745$ para río Carcarañá (Carcarañá), 19/11/2013.....	74
Figura 4.13. Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,457$ y perfil de fondo con $\rho = 14,837$ para río Carcarañá (Inrville), 19/11/2013. ....	75
Figura 4.14. Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,519$ y perfil de fondo con $\rho = 5,061$ para arroyo Tortugas, 20/11/2013. ....	76
Figura 4.15. Ábaco para el cálculo del coeficiente de dispersión longitudinal en base a $\alpha$ y $\rho$ , para $Q = 20 \text{ m}^3/\text{s}$ . ....	77
Figura 4.16. Ajuste de perfil de velocidades con función polinómica para río Tercero, 11/06/2012.....	78
Figura 4.17. Ajuste de perfil de fondo con función polinómica para río Tercero, 11/06/2012.....	79
Figura 4.18. Ajuste de perfil de fondo con función polinómica para río Tercero, 12/11/2012.....	79
Figura 4.19. Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 0,960$ y $\beta = 1,412$ para río Saladillo, 19/11/2013. ....	80
Figura 4.20. Ajuste de perfil de velocidades con función polinómica para río Carcarañá (Inrville), 19/11/2013. ....	80
Figura 4.21. Ajuste de perfil de fondo con función polinómica para río Carcarañá (Inrville), 19/11/2013. ....	81
Figura 4.22. Comparación gráfica entre los valores del coeficiente de dispersión longitudinal ( $D \text{ [m}^2/\text{s]}$ ) obtenidos con las ecuaciones empíricas y con la integral detallada. ....	82
Figura 4.23. Relación entre el coeficiente de dispersión longitudinal y el caudal (Rutherford, 1994). ....	83
Figura 4.24. Valores obtenidos con las ecuaciones empíricas y valores reportados por Rutherford (1994). ....	83
Figura 4.25. Valores obtenidos con la ecuación integral con caracterización hidrodinámica detallada y valores reportados por Rutherford (1994). ....	84
Figura 4.26. Comparación gráfica entre ambas metodologías y los valores reportados por Rutherford (1994).....	84

Figura 4.27. Valores obtenidos en base a funciones particulares ajustadas a cada perfil para proveer un mejor ajuste..... 85

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Características ADCP RiverSurveyor S5 utilizado en este trabajo (Manual Sontek 2010).....	30
Tabla 3.1. Campañas de medición realizadas.....	46
Tabla 3.2. Parámetros principales de las secciones analizadas.....	54
Tabla 4.1. Estimación del Coeficiente de Dispersión Longitudinal con las ecuaciones empíricas. ....	61
Tabla 4.2. Estimación del coeficiente de dispersión longitudinal en base a la ecuación integral de Fischer (1979). ....	64
Tabla 4.3. Estimación del coeficiente de dispersión longitudinal en base a la ecuación integral propuesta por Fischer (1979) con un mejor ajuste de interpolación. ....	78
Tabla 4.4. Comparación de los valores obtenidos con las metodologías empleadas. .	82

# CAPÍTULO 1

## MARCO DE REFERENCIA





## CAPÍTULO 1 - MARCO DE REFERENCIA

### 1.1 INTRODUCCIÓN

Actualmente, en todo el mundo se analizan los problemas existentes por el hecho que el agua es un recurso limitado, frente a las demandas crecientes que se tienen de la misma para la realización de las actividades cotidianas. Por esto, es de vital importancia poder evaluar la cantidad y calidad del recurso, para así controlar los cambios que hay en su consumo y disponibilidad.

Particularmente, en la provincia de Córdoba se da la situación de que el agua es un recurso escaso comparado con la población que actualmente allí vive y las actividades que allí se realizan. La sumatoria de caudales superficiales de todos los ríos que escurren en la Provincia no superan los 200 m<sup>3</sup>/s, siendo 100 m<sup>3</sup>/s aproximadamente escurridos en el río Dulce (el cual no puede ser tenido en cuenta, ya que abastece de agua a una reserva, la Laguna Mar Chiquita).

Entre los otros ríos, la cuenca más importante es la del río Carcarañá y sus tributarios más significativos, tales como el río Tercero, el río Saladillo, y el arroyo Tortugas. Esta cuenca transporta aproximadamente unos 80 m<sup>3</sup>/s cerca de su desembocadura en la estación de Pueblo Andino, es decir, más de la mitad del caudal que escurre en la provincia, sin contar, como se dijo, al río Dulce, por lo que su conservación y adecuada explotación son fundamentales a fin de preservar su utilidad como fuente de abastecimiento para las numerosas poblaciones e industrias abastecidas actualmente por el mismo.

En este aspecto la Secretaría de Recursos Hídricos del Gobierno de la Provincia de Córdoba, y la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba (FCEFyN – UNC) vienen realizando desde hace un tiempo y en forma periódica monitoreos de calidad de agua y aforos mediante métodos convencionales, como por ejemplo, por vadeo con molinetes. En la actualidad se ha agregado al instrumental utilizado para los aforos un Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP), que permite mejorar los muestreos obtenidos con técnicas convencionales, logrando mayor resolución espacial y temporal de las velocidades del flujo, como así también mayor precisión en el relevamiento de la morfología del cauce. Esta información disponible puede ser utilizada en forma complementaria para lograr una comprensión más acabada de procesos físicos presentes en el tramo del río analizado.

A tal efecto, no de los procesos que pueden ser estudiados con mayor detalle en la cuenca de aporte al río Carcarañá es la dispersión de contaminantes en los cursos de agua. Para simular este proceso, la mayoría de los modelos de mezcla requieren como dato de entrada el coeficiente de dispersión, el cual depende de las características geométricas del cauce y de flujo.

Este coeficiente de dispersión ha sido generalmente estimado con fórmulas empíricas utilizando variables globales de flujo (Fischer et al., 1979) o con estudios de trazadores. Estos últimos, considerados más precisos, requieren una gran inversión en planificación, personal y análisis posterior (Carr y Rehmann, 2007). Por otra parte, el uso de variables globales no tiene en cuenta las características particulares del flujo. Es por esto que es de utilidad obtener una metodología experimental que represente una mejora a las ecuaciones empíricas sin los costos y la laboriosidad de los estudios con trazadores.

## 1.2 SISTEMA DE ESTUDIO

El sistema fluvial analizado en este trabajo se localiza en el tercio central de la Provincia de Córdoba, iniciándose en la zona oeste de la misma y escurriendo hacia al este, formando parte de un sistema de ríos interprovincial, ya que su curso continúa hacia Santa Fe (Figuras 1.1 y 1.2).

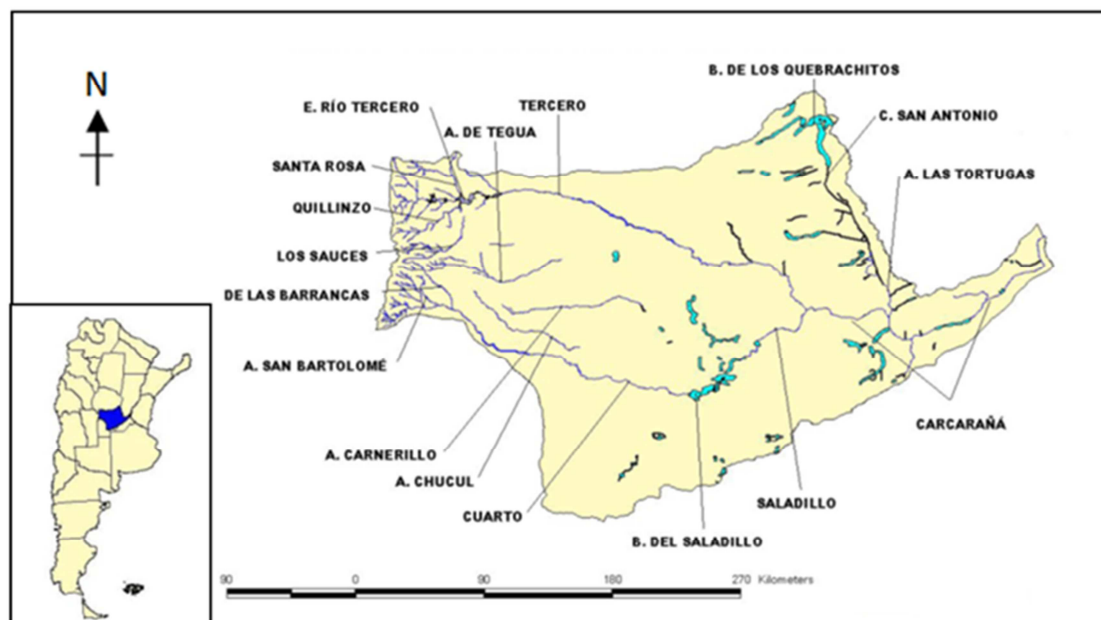


Figura 1.1. Zona de estudio.

Lo que se aprecia en la zona resaltada con azul en el mapa de Argentina y ampliado a la derecha, es una aproximación al área estudiada en este trabajo. La parte central de la Provincia de Córdoba se corresponde con la subcuenca del río Tercero, la zona sureste de dicha provincia con la subcuenca del río Saladillo, mientras que en el este de la Provincia de Córdoba, cerca del límite con Santa Fe, escurre el arroyo Tortugas. Estos tributarios confluyen a lo largo del este de la Provincia de Córdoba formando así el río Carcarañá -junto con otros tributarios de menor importancia-, el cual escurre hacia la Provincia de Santa Fe.

El río Tercero, también llamado Ctlamochita, nace en el Embalse de Río Tercero, aunque su caudal es regulado desde el Embalse Piedras Moras, situado a las afueras de la localidad de Almafuerte. Es aquí en donde se puede hacer una diferenciación entre la Cuenca Alta -que nace en las Sierras Comechingones, al oeste de la provincia, y desemboca en el Embalse de Río Tercero, abarcando unos 3300Km<sup>2</sup>- y la Cuenca Baja -que nace en dicho embalse y desemboca en el río Carcarañá, abarcando aproximadamente 6280Km<sup>2</sup>-.

El río Saladillo nace en una zona de bañados hacia el este de la Ciudad de Río Cuarto. Esos bañados se forman por aporte de lluvias y otros afluentes menores, así como por el agua que viene por el río Cuarto, que se dispersa en parte escurriendo y formando grandes lagunas inestables temporalmente, generando este sistema de bañados de aproximadamente 80Km de largo. Allí el río Saladillo se encauza y viaja hacia el este.

Aguas abajo, los ríos Saladillo y Tercero confluyen cerca de la localidad de Monte Buey, en el este provincial (Figura 1.2). Allí nace el río Carcarañá, el cual escurre hacia el este, ingresando en la provincia de Santa Fe, y en su trayecto recibe aportes de otros tributarios, de los cuales se destaca el arroyo Tortugas, que es el de mayor importancia en la cuenca baja del río Carcarañá. Este arroyo fue construido artificialmente para transportar el agua proveniente de desagües pluviales urbanos y del escurrimiento superficial en campos de la región centro-este de la Provincia de Córdoba y del oeste de la Provincia de Santa Fe. Es muy importante conocer las características de cada uno de los tributarios por separado y ver cómo se acoplan al confluir los mismos, cuantificando la capacidad de mezcla de cada uno y del conjunto.

Los usos del agua que provee este sistema son múltiples: agrícola, insumo industrial, consumo doméstico, y recreación, entre otros. Ya desde su nacimiento, los tributarios del río Carcarañá atraviesan varias localidades y asentamientos industriales, motivo por el cual van acumulando a lo largo de su trayecto varios desechos producidos por las actividades humanas, por lo que su capacidad de dispersión es fundamental para que la calidad del recurso se mantenga. Dentro de las principales sustancias contaminantes, podemos mencionar la descarga de sustancias químicas de las industrias -reconociendo un peligro importante en la localidad de Río Tercero, en donde se localiza un foco industrial-, la descarga de líquidos cloacales no debidamente tratados en las diversas localidades, y desechos originados por actividades agrícolas y ganaderas.

Por ello, es conveniente realizar mediciones en distintas secciones a lo largo de cada río a fines de analizar cómo cambia la calidad del recurso entre las mismas, para identificar de la manera más precisa posible las causas del deterioro y poder cuantificarlas.

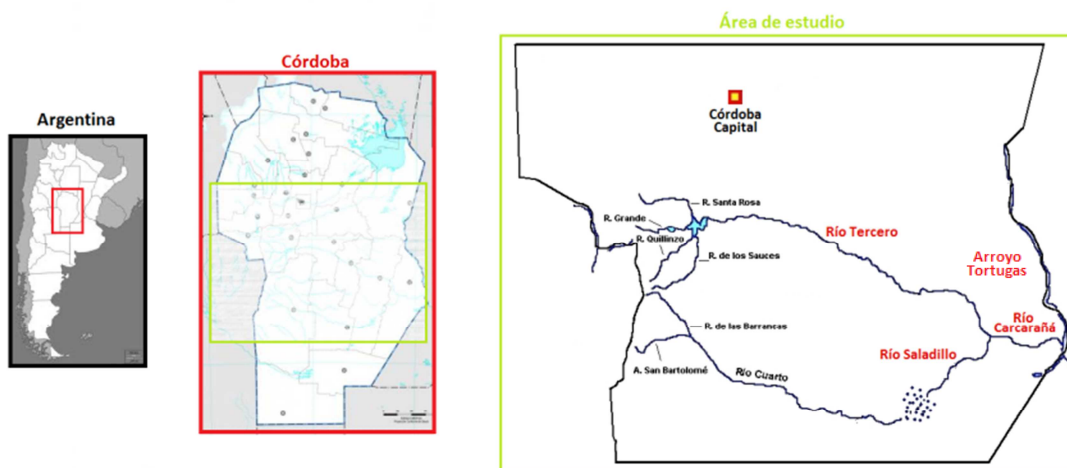


Figura 1.2. Recursos hídricos estudiados.

## 1.3 CONCEPTOS BÁSICOS

### 1.3.1 Caracterización del Flujo en un sistema fluvial

Al realizar estudios experimentales sobre un río, debe entenderse al mismo como un sistema complejo, en donde el flujo se mueve en trayectorias irregulares, generándose una turbulencia muy difícil de predecir a pequeña escala. Es por esto que las propiedades del río tienen gran variabilidad temporal y espacial, y están fuertemente atadas a las condiciones locales. Debe comprenderse que la turbulencia es una

característica del flujo, no del fluido, y se ve muy afectada por las condiciones de borde y la geometría del curso, generándose vórtices y movimientos aleatorios cambiantes con el tiempo.

Además, parte del agua que lleva el curso se evapora, otra se infiltra hacia sistemas subterráneos; una parte del agua llega al curso de tributarios distribuidos irregularmente, otra parte de descargas puntuales y distribuidas, por lo que el sistema es complejo, con numerosas entradas y salidas difíciles de cuantificar. Muchas veces es imposible conocer el origen preciso de aportes y pérdidas, y debe considerarse que los mismos no son constantes en el tiempo, dependiendo de la variabilidad espacio-temporal de los procesos hidrometeorológicos en la cuenca de aporte, por lo que los resultados están fuertemente afectados a esta variabilidad.

En este sentido, cuando se habla de caracterizar experimentalmente el flujo en un sistema fluvial, se habla de la determinación de un cierto número de parámetros cuantificables que representen adecuadamente el comportamiento del río bajo determinadas circunstancias. A tal fin, se dispone actualmente de equipos que pueden automáticamente cuantificar estos efectos y proporcionar información más detallada y simplificada a fines de poder tomar en consideración la mayor cantidad de variables. En efecto, el Perfilador de Corriente Acústico Doppler (o ADCP, según sus siglas en inglés, y como se lo denominará posteriormente) es una técnica experimental utilizada en la actualidad en todo el mundo para caracterizar sistemas fluviales debido a su relativamente alta resolución temporal y espacial cuando se la compara con técnicas convencionales.

### 1.3.2 Procesos de mezcla en ríos

Al modelar conceptual, numérica o hidráulicamente un río con fines ambientales, interesa en gran medida evaluar la capacidad de mezcla que el sistema fluvial tiene, a fin de comprender su capacidad amortiguadora a descarga de contaminantes y otras perturbaciones. Es a tal fin que deben establecerse parámetros o coeficientes para que dichas características de la capacidad de mezcla puedan ser cuantificadas, controladas y comparadas a lo largo del tiempo con estándares de calidad perseguidos que garanticen la calidad del recurso.

Al ser descargado un pulso de un contaminante en el río, al principio el mismo viaja de acuerdo a la velocidad que lleva el curso de agua, manteniéndose dentro de ciertas fronteras imaginarias; a este fenómeno se lo denomina *advección*. A medida que va avanzando a lo largo de la trayectoria, otros procesos entran en juego, y ya el movimiento no es en conjunto, sino que las partículas del contaminante comienzan a tener movimientos aleatorios debido a la turbulencia propia del río; esto último es lo que se conoce como *dispersión* (Chapra, S. 1997 y Naved, A. 2008) (Figura 1.3).

Las posibles direcciones de mezcla en un río son tres: vertical, horizontal, y longitudinal. Es para cada una de ellas que puede evaluarse un coeficiente de dispersión, pero sucede que los contaminantes llegan a mezclarse rápidamente en la vertical y horizontal, pero perduran sin mezclarse totalmente por grandes longitudes, entonces el parámetro que se utiliza para la evaluación de la calidad del agua será este último valor, el del Coeficiente de Dispersión Longitudinal, denominado  $D$  en este trabajo. Detalles sobre las ecuaciones y formas de determinar estos coeficientes se exponen en la próxima sección.

En la determinación de  $D$  se consideran únicamente los procesos de mezcla debido al corte, o sea, producidos por diferencias en las velocidades entre dos capas sucesivas,



bajo la hipótesis de que es dicho comportamiento el que gobierna la mezcla, más allá de otros fenómenos que puedan darse, tales como la energía cinética propia del contaminante al ingresar al curso de agua, la turbulencia del agua, etc.

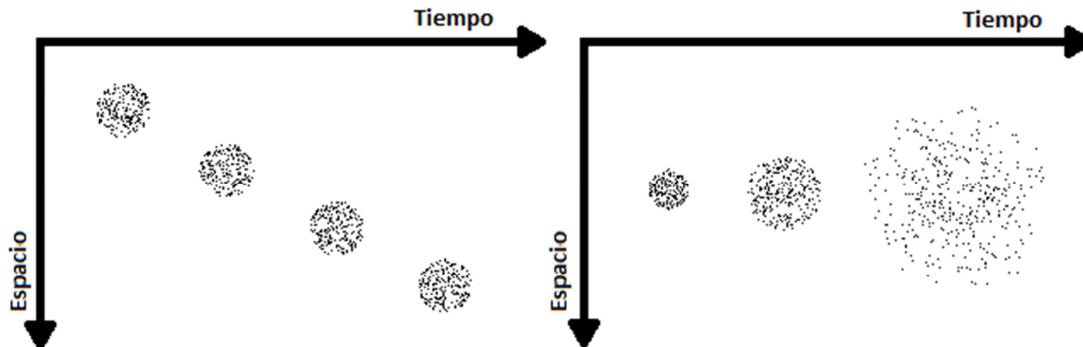


Figura 1.3. Advección, a la izquierda; dispersión, a la derecha.

## 1.4 MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE DISPERSIÓN LONGITUDINAL

### 1.4.1 Determinación del coeficiente de dispersión longitudinal en base a ecuaciones empíricas

Las ecuaciones empíricas que permiten cuantificar los procesos de mezcla vertical, transversal y longitudinal utilizan parámetros globales hidráulicos del río, no teniendo en cuenta la distribución de los mismos en la sección, lo cual puede generar errores en ciertas situaciones. Las ecuaciones empíricas que se utilizan son las siguientes, según Fischer et al. (1979):

$$u^* = (g * R_h * S)^{0,5} \quad (1.1)$$

$$\varepsilon_v = 0,067 * H * u^* \quad (1.2)$$

$$\varepsilon_t = 0,6 * H * u^* \quad (1.3)$$

$$D = 0,011 * \frac{U^2 * B^2}{H * u^*} \quad (1.4)$$

En donde,  $u^*$  es la velocidad de corte media de la sección,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $R_h$  es el radio hidráulico medio,  $S$  es la pendiente media,  $\varepsilon_v$  se corresponde con el estimador del coeficiente de dispersión vertical,  $\varepsilon_t$  es el coeficiente de dispersión transversal,  $D$  es el estimador del coeficiente de dispersión longitudinal,  $B$  es el ancho de la sección,  $U$  es la velocidad promedio de la sección, y  $H$  es la profundidad promedio de la sección.

El coeficiente 0,011 que aparece en la ecuación (1.4) es resultado de un ajuste empírico, de tal forma de poder tener en cuenta los fenómenos de corrientes secundarias y turbulentas que se dan en los ríos. El coeficiente 0,6 de la ecuación (1.3) tiene en cuenta la influencia en la mezcla de curvas (poco pronunciadas), rugosidad de las márgenes, y otras irregularidades presentes en cauces naturales.

### 1.4.2 Determinación del coeficiente de dispersión longitudinal utilizando una ecuación integral y una caracterización hidrodinámica detallada

El coeficiente de mezcla longitudinal en ríos puede determinarse mediante la ecuación integral propuesta por Fisher (1979):

$$D = -\frac{1}{A} \int_0^B u'(y)h(y) \int_0^y \frac{1}{\varepsilon_t h(y)} \int_0^y u'(y)h(y) dy dy dy \quad (1.5)$$

En donde  $A$  es el área de la sección transversal,  $u'(y)$  es la diferencia entre la velocidad longitudinal en la progresiva transversal  $y$ , con respecto a la velocidad media global en la sección  $U$ ,  $h(y)$  es la profundidad medida desde el pelo de agua y  $\varepsilon_t$  es el coeficiente de dispersión transversal, calculado mediante la ecuación (1.3).

La ecuación (1.5) asume un flujo unidimensional, es decir que el contaminante debe estar bien mezclado tanto en la vertical como en la transversal. Debido a esta limitación, esta ecuación sólo puede ser utilizada en zonas donde no hay recirculación o donde no hay fuertes corrientes secundarias. Además, esta ecuación asume que la tensión de corte transversal es quien gobierna el proceso de mezcla y no la tensión vertical, por lo tanto solo puede ser aplicada a ríos donde el ancho ( $B$ ) sea mucho mayor que la profundidad media ( $H$ ). Por último, cabe decir que esta ecuación supone que el mecanismo de dispersión por corte predomina sobre los demás mecanismos de mezcla.

Las ecuaciones integrales pueden aplicarse directamente con los datos relevados con el ADCP, y pueden también aplicarse sobre distribuciones transversales típicas susceptibles de ser integradas. Los datos relevados con ADCP no están equiespaciados en la transversal y presentan ruido Doppler, lo que puede afectar la estimación de  $D$ . Por ello, una opción es ajustar perfiles a dichos datos relevados.

Para aplicar la ecuación integral desarrollada por Fischer, se aproximan los valores de velocidad en la trasversal a través de una función de distribución de velocidades. Una de las distribuciones de velocidades adoptada para un sistema fluvial es aquella desarrollada por Seo y Baek (2000) (ecuación 1.6), la cual genera una distribución de velocidades a partir de distribuciones gamma.

$$\frac{u(y)}{U} = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{y}{B}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{y}{B}\right)^{\beta-1} \quad (1.6)$$

Donde  $\alpha$  y  $\beta$  son parámetros de la distribución gamma,  $u(y)$  es la velocidad en la progresiva  $y$ , y  $U$  es la velocidad promedio de la sección. Cuando  $\alpha = \beta$  la distribución es simétrica, pero cuando  $\alpha > \beta$  la curva se sesga hacia la derecha, y cuando  $\alpha < \beta$  la curva se sesga hacia la izquierda. A continuación se obtienen los distintos perfiles de velocidad generados en base a la distribución gamma mencionada (Figura 1.4).

Como se dijo, si bien por simplicidad se adopta que  $\alpha$  y  $\beta$  tienen el mismo valor, es posible que se presenten situaciones en las que claramente las velocidades estén sesgadas hacia alguno de los márgenes. En la Figura 1.5 se presenta una distribución de velocidades con  $\alpha < \beta$ .

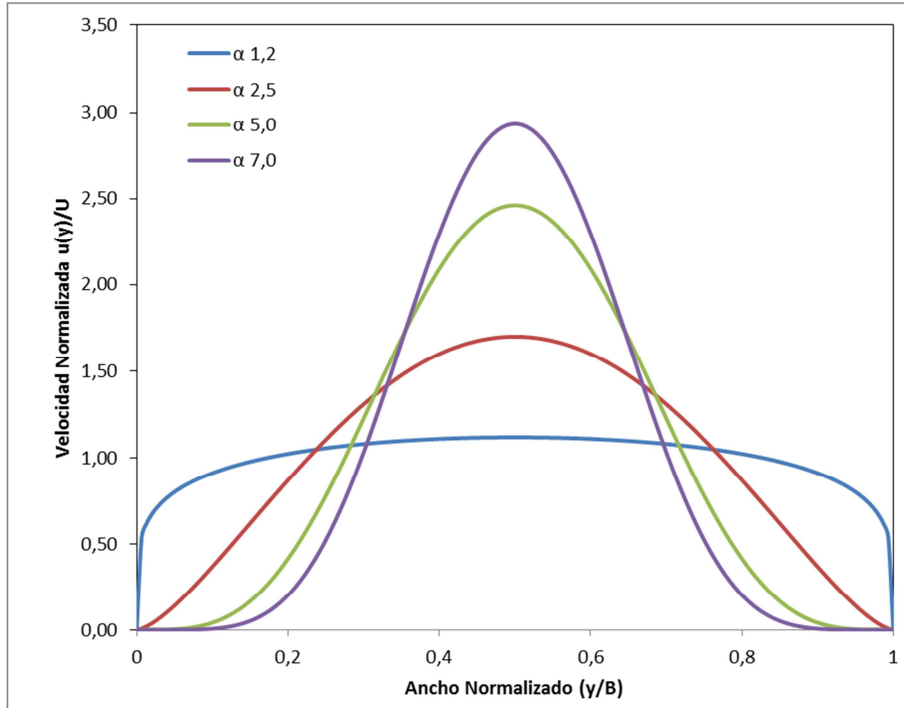


Figura 1.4. Perfil de velocidades en función del coeficiente alfa ( $\alpha = \beta$ ).

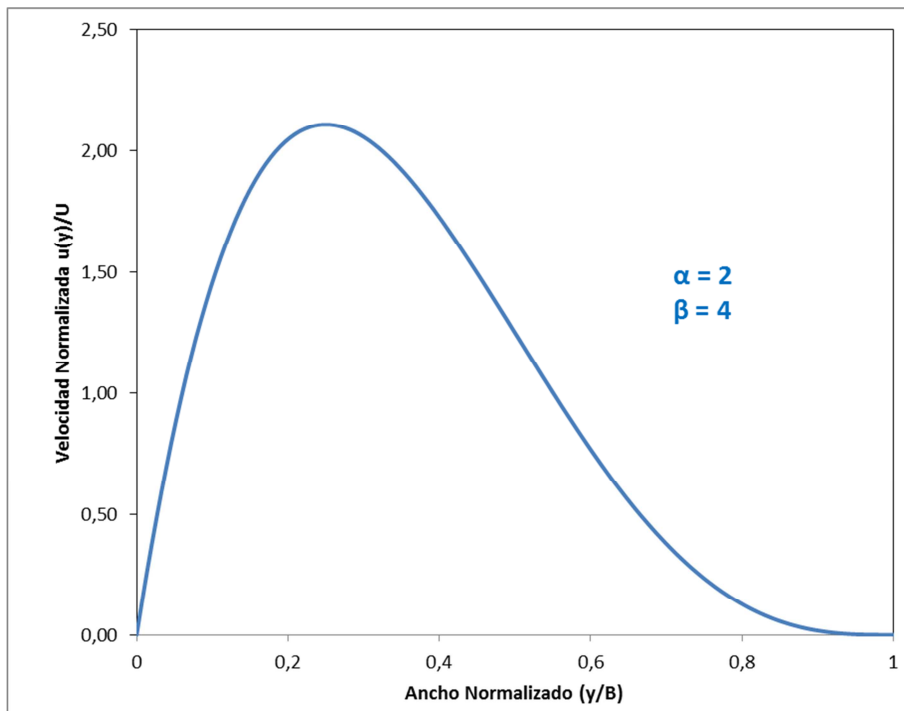


Figura 1.5. Distribución asimétrica de velocidades, con  $\alpha < \beta$ .

La forma del fondo de la sección puede ser estimada sobre la base de la distribución dada por la ecuación (1.7) (Deng et al. 2001), tal que:

$$\frac{h(y)}{H_m} = 1 - \left[ \frac{2y}{B} - 1 \right]^p \quad (1.7)$$

En donde  $h(y)$  es la profundidad en la progresiva  $y$ ,  $H_m$  es la profundidad máxima,  $B$  es el ancho total de la sección y  $\rho$  es el parámetro que determina la forma de la función. Al ir variando rho ( $\rho$ ) se obtienen diferentes perfiles de fondo, teniéndose que para  $\rho=1$  el perfil es triangular, para  $\rho=2$  es parabólico, y para valores mayores de  $\rho$  el perfil va tomando una forma cada vez más rectangular, dándose en la práctica que el perfil rectangular puede aproximarse con un error despreciable tomando  $\rho=1000000$ , aunque teóricamente el rectángulo se alcanza si  $\rho$  tiende al infinito (Figura 1.6).

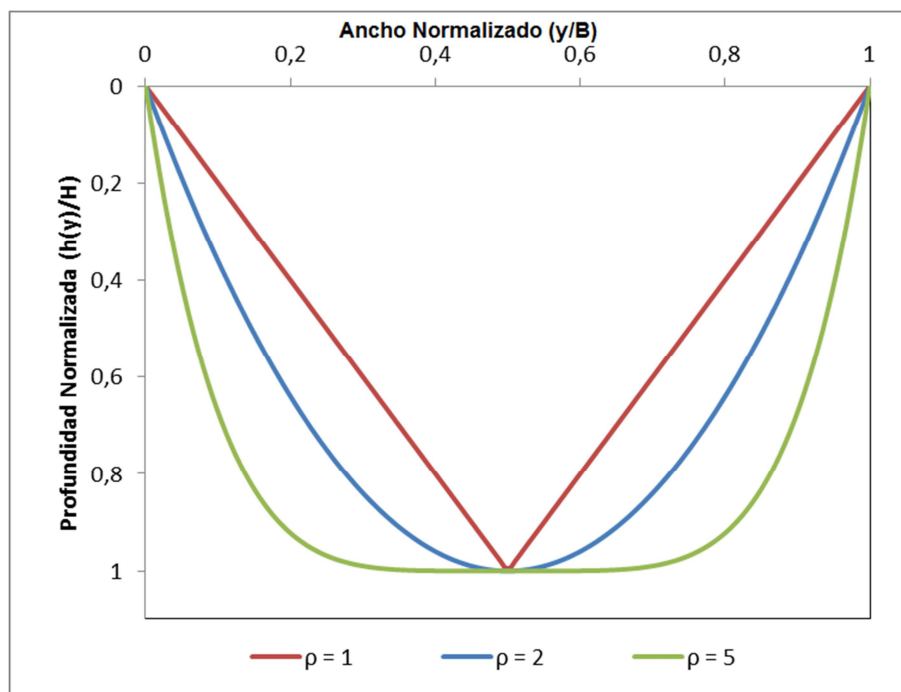


Figura 1.6. Forma del fondo en función del coeficiente rho.

## 1.5 OBJETIVOS DEL TRABAJO

### 1.5.1 Objetivo General

El objetivo general perseguido por este trabajo es realizar una evaluación experimental del coeficiente de dispersión longitudinal en ríos mediante el empleo de datos relevados con ADCP. Se aplica esta técnica sobre los principales tributarios del río Carcarañá a fines de estimar dicho coeficiente sobre estos ríos.

Debe hacerse notar que los resultados son directamente aplicables para las secciones analizadas y bajo las condiciones experimentales ensayadas. Sin embargo, la importancia de esta investigación radica en el desarrollo de un enfoque metodológico sencillo, lo que la hace fácil de emplear bajo otras condiciones, obteniéndose así resultados experimentales de una forma rápida y precisa.

### 1.5.2 Objetivos Específicos

Para cumplimentar el objetivo general mencionado se proponen los siguientes objetivos específicos:

1. Capacitar al alumno en la temática referida a los procesos de mezcla en ríos mediante el estudio de la bibliografía existente y los trabajos actualmente disponibles sobre la temática en cuestión.

2. Entrenar al alumno en el uso de instrumentos específicos para la caracterización experimental de la hidrodinámica del flujo, así como del soporte computacional requerido para el posterior análisis de los datos relevados en campo.
3. Realizar una caracterización experimental de la hidrodinámica del flujo en las secciones elegidas para el desarrollo de este trabajo.
4. Determinar el coeficiente de dispersión longitudinal bajo distintas condiciones y con el empleo de diferentes técnicas de evaluación, contrastando los resultados obtenidos con cada una de ellas.

## 1.6 METODOLOGÍA

En primer lugar, el estudiante realizó una capacitación para poder comprender los procesos de mezcla presentes en un río, y de esa forma poder abordar la problemática planteada.

Luego, se realizó un entrenamiento en el uso del ADCP, técnica que permite la obtención de datos para la realización de este trabajo, y que será explicada en detalle en el Capítulo 2.

A partir del conocimiento de la técnica de medición, del sistema en estudio, y del marco teórico propuesto, se realizó la caracterización experimental de la hidrodinámica en distintas secciones transversales de los tributarios y en el río Carcarañá. Este trabajo experimental se describe en el Capítulo 3.

En base a estos resultados, se realiza posteriormente en el Capítulo 4 la determinación del coeficiente de dispersión longitudinal, principal objetivo de este trabajo.

Finalmente, en el Capítulo 5 se detallan las principales conclusiones a las que se arribaron a lo largo del estudio, y se plantean las recomendaciones pertinentes para trabajos futuros.

En adición, y como manera de difusión de los resultados obtenidos, se presenta al final de este informe el trabajo presentado en el Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos 2013, desarrollado en la ciudad de Santa Fe en noviembre de 2013.



## CAPÍTULO 2

**INSTRUMENTAL  
UTILIZADO:  
ADCP  
(PERFILADOR  
DE CORRIENTE  
ACÚSTICO  
DOPPLER)**







## **CAPÍTULO 2 - INSTRUMENTAL UTILIZADO: ADCP (PERFILADOR DE CORRIENTE ACÚSTICO DOPPLER)**

### **2.1 DESCRIPCIÓN DEL INSTRUMENTO**

Para la obtención de los diferentes parámetros hidráulicos en distintas secciones del sistema fluvial analizado, se utilizó el 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. Este aparato cuenta con la tecnología acústica Doppler más usada actualmente en todo el mundo a la hora de caracterizar flujos turbulentos en sistemas fluviales y canales artificiales de aguas poco profundas.

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, el ADCP 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 dispositivo no posee movilidad propia, motivo por el cual es necesario colocar el ADCP en una balsa o bote capaz de transportarlo a través de la sección sobre la que se realizará la medición. Esto puede apreciarse en la Figura 2.1.

El equipo RiverSurveyor S5 cuenta con una nueva incorporación tecnológica, el "SmartPulseHD", el cual es un micro controlador inteligente que en base a la profundidad, velocidad y niveles de turbulencia del flujo, ajusta de manera automática el esquema de pulso acústico con el fin de proveer la máxima resolución de datos. La cantidad de celdas determinan la mayor o menor definición de los resultados. De esta manera, en aquellas situaciones críticas con grandes cambios de las variables medidas, pueden obtenerse celdas de hasta 2 cm; lo mismo sucede en zonas bajas, en donde el perfil es muy variable en su escasa profundidad, lo que requiere que la precisión de la medición aumente. Todos estos ajustes en el sistema se realizan automáticamente, sin necesidad de que el usuario realice cambios.

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 2.2.

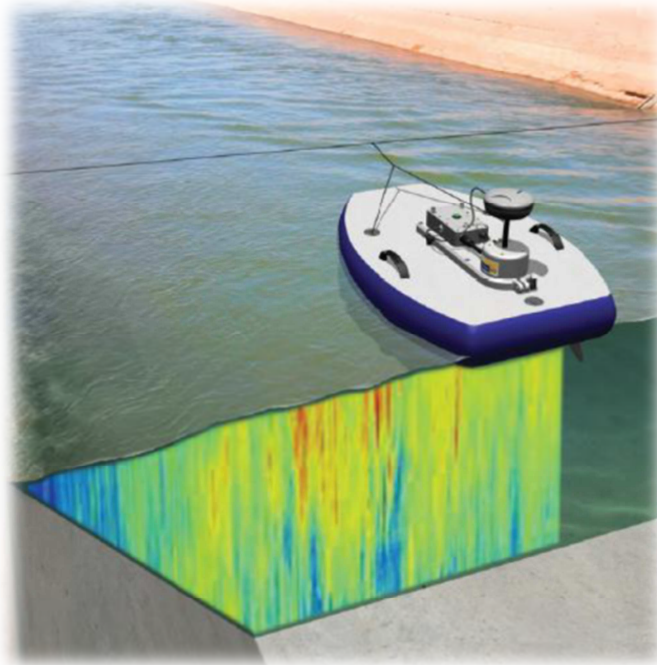


Figura 2.1. Funcionamiento del ADCP (extraído del folleto RiverSurveyor - Sontek).

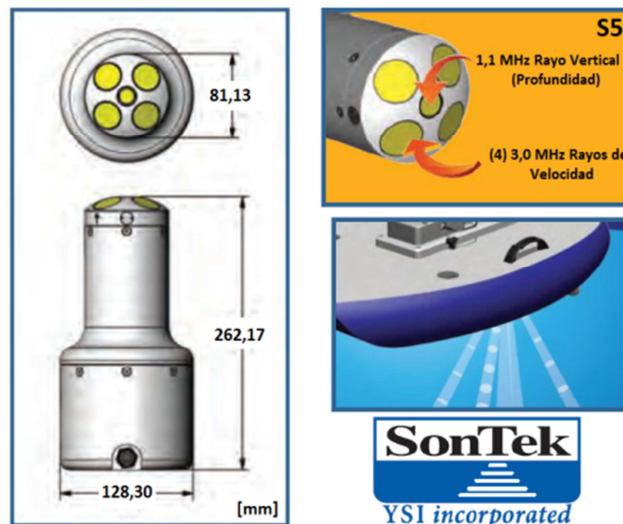
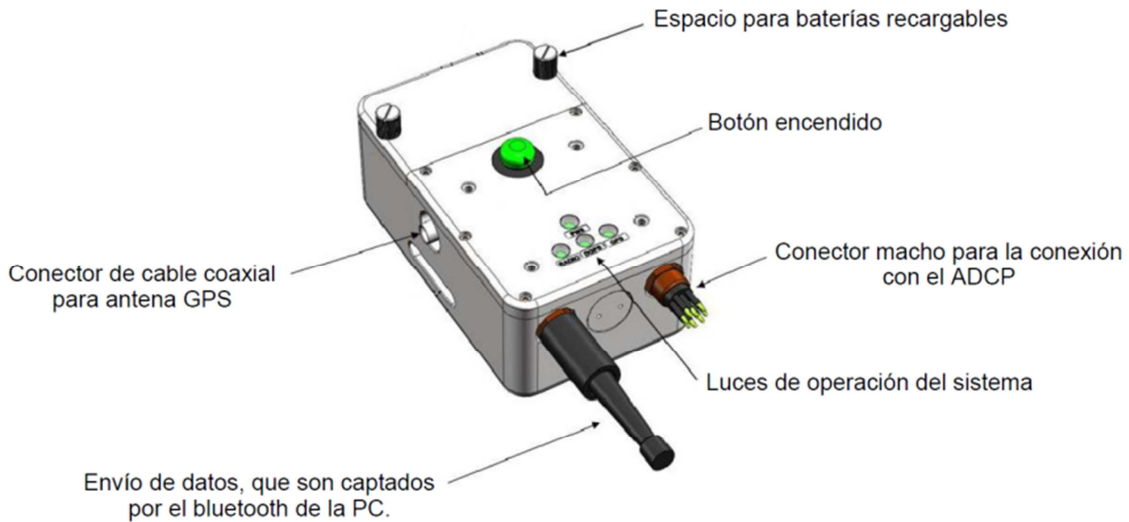


Figura 2.2. Descripción del instrumento utilizado (adaptado del folleto RiverSurveyor - Sontek).

Además del sistema de rayos acústicos, para el funcionamiento del equipo hacen falta otros elementos (Figura 2.3), a saber:

- Un módulo de energía y comunicación (Figura 2.4), o “PCM” por sus siglas en inglés (Power and Communications Module), el cual posee dos funciones básicas: proporcionar una alimentación de energía al ADCP mediante una batería recargable, y permitir comunicaciones

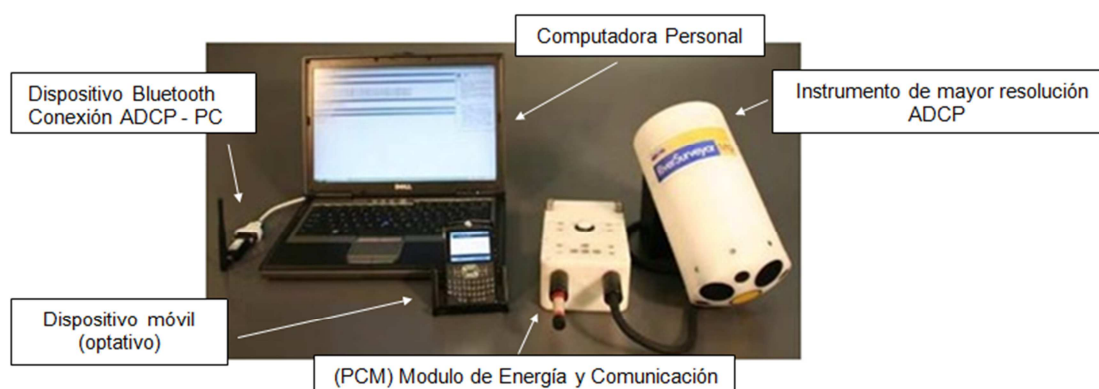
remotas del equipo con una computadora o con un teléfono celular a través de un enlace con ondas de radio.



**Figura 2.3. Módulo de energía y comunicación (extraído del folleto RiverSurveyor - Sontek).**

- Un dispositivo Bluetooth de tecnología avanzada y largo alcance, de tal forma de que se permita la comunicación remota con el equipo receptor de la señal (en el caso del instrumento disponible en el Laboratorio de Hidráulica - FCEFyN, una computadora personal). Al operar con una computadora, puede lograrse un alcance de hasta 200 metros con la señal, mientras que con los teléfonos celulares regulares pueden lograrse alcances de hasta 60 metros aproximadamente.
- Un GPS, el cual se coloca en la misma balsa sobre la cual se encuentra el ADCP, de tal forma de poder comparar las señales de movimiento del equipo (obtenidas con este elemento) y las del ADCP, y para poder referenciar geográficamente la sección de las mediciones desde otros programas. El dispositivo GPS se conecta también al PCM.
- Una computadora portátil o dispositivo móvil capaz de soportar el programa computacional RiverSurveyor Live v.2.00 y el soporte RiverSurveyor v1.00 del instrumental, para ejecutar y correr dicho programa, que recibe, ordena y muestra los datos registrados por el ADCP en tiempo real, permitiendo realizar un seguimiento de los resultados de manera simultánea con la medición misma.
- Fichas de adaptación, que permitan la conexión de todos los dispositivos anteriormente mencionados. Deben permitir conexiones estancas y seguras, ya que muchos de estos dispositivos se colocan en el agua.

Cada uno de los elementos nombrados debe verificarse de tal forma de que el conjunto trabaje de forma correcta, y que no haya interferencias entre las señales de los distintos dispositivos.



**Figura 2.4. Elementos necesarios para el correcto funcionamiento del ADCP.**

A continuación se adjuntan las especificaciones técnicas del ADCP disponible en el Laboratorio de Hidráulica - FCEFyN utilizado en este trabajo (Tabla 2.1).

**Tabla 2.1. Características ADCP RiverSurveyor S5 utilizado en este trabajo (Manual Sontek 2010).**

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

## **2.2 VENTAJAS DEL ADCP SOBRE OTRAS TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE VELOCIDAD DE FLUJO Y CAUDALES**

Si bien la técnica ADCP es relativamente nueva en comparación con otras utilizadas universalmente, presenta ciertas ventajas que la colocan en una posición de privilegio a la hora de realizar mediciones.

Tradicionalmente se utilizaron, y aún hoy se utilizan para la cuantificación de la velocidad del flujo, y a partir de ello la cuantificación del caudal, molinetes. Estos dispositivos (Figura 2.5) son fáciles de operar y las técnicas son bien conocidas en todo el mundo.



**Figura 2.5. Molinete de eje horizontal.**

El ADCP es un instrumento que va registrando el perfil de velocidades en cada punto de la sección a medida que avanza sobre la misma y en las tres direcciones, mientras que el molinete registra velocidades en puntos aislados de la sección, y únicamente cuando el flujo pasa a través de la cabeza de la hélice en dirección paralela a su eje.

Los molinetes permiten determinar de forma mecánica la velocidad en cierta zona de la sección mediante la relación entre la velocidad angular de la hélice que poseen y la velocidad del agua en dicha región, relación calibrada para cada tipo de molinete. Básicamente, lo que se hace es obtener la cantidad de vueltas que da la hélice en cierto intervalo de tiempo, a través de un contador electrónico. El método consiste entonces en dividir la sección en fajas de área conocida, y medir la velocidad característica de las mismas a cierta profundidad, y con dichos valores se obtiene el caudal. Por otro lado la técnica ADCP genera campos tridimensionales de velocidad del flujo en una amplia zona de la sección relevada.

El ADCP es capaz de medir profundidades, velocidades en corrientes de agua tridimensionales y definir el caudal total con un error de aproximadamente 2% o 3%. El molinete considera un flujo unidimensional solamente, y su precisión es bastante inferior. Según se presenta en diferentes estudios, la incertidumbre de los molinetes en la determinación del caudal es del orden del 10% (Hernandez, J. et al., 2008).

Para el uso del ADCP se necesita, como se mencionó anteriormente, por lo menos de tres operarios, mientras que el molinete requiere solamente uno. Sin embargo el tiempo de medición de una sección con ADCP es inferior al tiempo requerido con molinetes.

A la hora de la puesta en marcha, el molinete requiere poco tiempo de armado, y generalmente vienen calibrados de fábrica; solamente requieren una verificación de funcionamiento de sus componentes mecánicos. En cambio, el ADCP requiere de un tiempo de calibración de los accesorios del sistema (brújula), la preparación del dispositivo inalámbrico y conexión al dispositivo receptor, como así también cruzar la soga de una orilla hacia la otra para poder guiar el instrumento. Además requiere de

una serie de accesorios que condicionan la posibilidad de su utilización, como es el caso de un bote o un puente para poder hacer pasar el ADCP a través del río.

El ADCP es capaz de medir varios parámetros con una precisión muy buena, tales como el área de la sección, mientras que en el caso del molinete, la misma se aproxima mediante fajas de ancho conocido y profundidad promedio entre dos puntos.

Si bien se comparó al ADCP con el molinete por ser el método más utilizado históricamente, cabe aclarar que no son las únicas técnicas de medición empleadas. De acuerdo a la precisión buscada, se utilizan métodos más simples o más complejos, que van desde la medición del tiempo que tarda un cuerpo en recorrer cierta distancia en un río tomando dicho parámetro como la velocidad promedio o una fracción de ella y multiplicando dicha velocidad por un área estimada o medida con métodos sencillos, hasta la instalación de vertederos, con los cuales se puede conocer el caudal midiendo la altura de agua sobre la cresta y conociendo la curva de descarga. Todo depende de los fines para los cuales se necesita la información, y de la justificación económica a la hora de buscar una mayor o menor precisión en los resultados. Los estudios de trazadores, considerados más precisos, requieren una gran inversión en planificación, personal y análisis posterior (Carr, M. L. y Rehmann, C. R., 2007).

### **2.3 ARMADO DEL DISPOSITIVO MÓVIL**

Para la puesta en marcha del equipo, deben realizarse una serie de tareas. Las mismas comprenden, en orden de ejecución:

1. Todos los elementos deben ir desarmados para su transporte, por lo que se necesita acoplarlos. Se comienza por el barco, el cual consiste en una superficie flotante sintética que traslada el ADCP, GPS, y demás elementos. Lo primero que se hace con el mismo es colocar las quillas plásticas en su cara inferior (sumergida) de tal forma de darle estabilidad.
2. Se colocan y aseguran el ADCP y el PCM en los espacios asignados a tal fin, procurando evitar golpes, y considerando que es muy importante que el cabezal de medición del ADCP no sea dañado en la operación.
3. Se encastra y se asegura el GPS en el barco y se conectan posteriormente todos los dispositivos, verificando que enciendan.
4. Se conectan con Bluetooth el equipo y la computadora.
5. En la proa del barco, se asegura un arnés de sujeción el cual lo vinculará con la soga destinada para trasladar todo el conjunto. Sin embargo, no se amarra el barco a la soga hasta no terminar la calibración del programa. El equipo queda así completamente armado y puede procederse a su configuración.

En la Figura 2.6 se pueden apreciar las distintas partes que componen el equipo en su conjunto. Además de los elementos enunciados, puede apreciarse que el barco posee a sus costados dos amarres que son de utilidad en el traslado del equipo y a la hora de realizar la calibración. Debido a su tamaño y su peso, no es fácil manipular el barco, y además debe tenerse sumo cuidado porque un golpe podría afectar seriamente a cualquiera de los dispositivos, los cuales quedarían obsoletos para la



realización de la medición, con las correspondientes pérdidas económicas y en tiempo que generan los equipos rotos y las campañas fallidas.



Figura 2.6. Barco de medición con todos los dispositivos instalados (YSI/Sontek).

## 2.4 PROGRAMAS COMPUTACIONALES

### 2.4.1 RiverSurveyor Live

La configuración de registro del ADCP, y la recepción y visualización de los datos no pueden ser realizadas 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 2.7). El mismo permite configurar el instrumento y registra toda la información enviada por el equipo y genera 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. La interfaz del programa es amigable, y el mismo no requiere gran poder de procesamiento, por lo que prácticamente cualquier dispositivo puede soportarlo.

Este programa es capaz de definir la configuración de registros y analizar los datos que el ADCP envía en tiempo real, permitiendo al usuario la lectura de resultados parciales mientras la medición se está llevando a cabo. Sin embargo, para poder analizar los datos de manera correcta, el programa necesita cierta información que debe ser proporcionada antes de realizar las mediciones. La puesta a punto del programa para su utilización se discute en el apartado 2.4.1.1.

El programa viene incluido en la adquisición de los productos, y puede ser actualizado a través de la página de YSI/Sontek, desde donde también puede pedirse soporte técnico y repuestos, entre otras cosas.

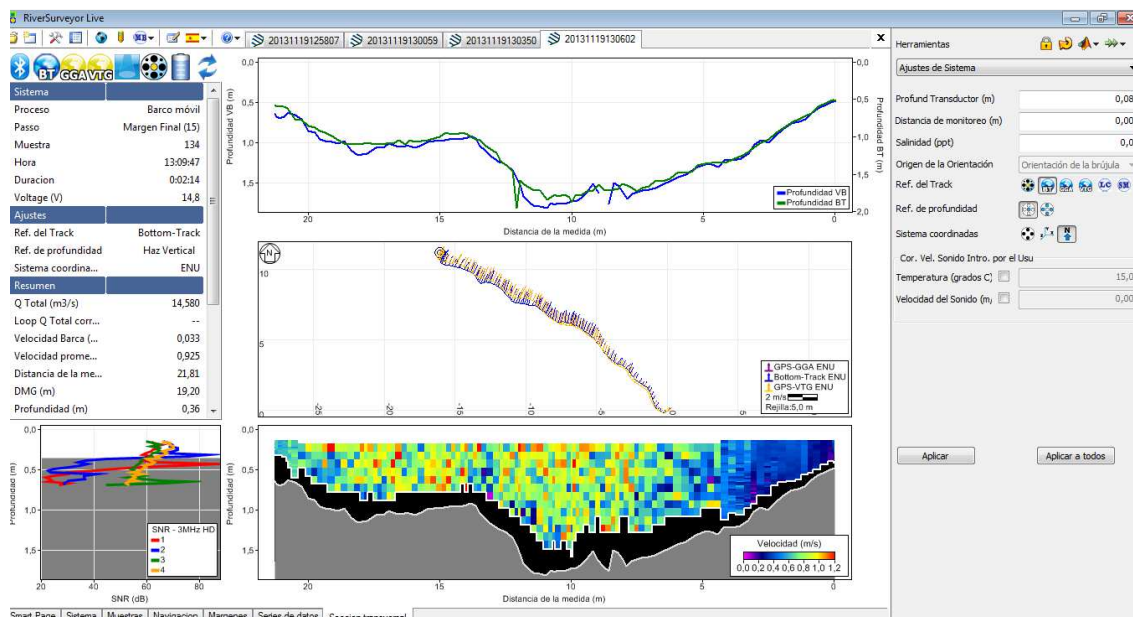


Figura 2.7. Interfaz del programa RiverSurveyor.

#### 2.4.1.1 Configuración de registro del ADCP

Para la definición de la configuración de registro se deben seguir los siguientes pasos:

1. Se inicializa el programa River Surveyor Live y se abre la hoja de configuración del sistema. Allí debe introducirse toda la información referente al lugar, siendo conveniente no solamente completar los campos que el programa requiere, sino también escribir una descripción detallada sobre la medición, ya que esto muchas veces ayuda a posteriori para describir las tareas realizadas y para poder ordenar las diferentes campañas. Se ingresan entonces la fecha, características del lugar de la campaña, operarios de los equipos, etc., según se muestra en la Figura 2.8.
2. Luego se introducen los ajustes del sistema (Figura 2.9), los cuales consisten en valores que, a diferencia de lo introducido anteriormente, sí van a afectar de forma directa los resultados de la medición. Los mismos son: **profundidad del transductor**, que se refiere a la distancia vertical que hay desde el pelo del agua hasta la base del rayo vertical, obteniéndose este valor en base a pruebas con cada tipo de bote ("P" en la Figura 2.10 - para el equipo disponible en el Laboratorio de Hidráulica - FCEfyN esta profundidad en de 7,5cm-); **distancia de monitoreo**, que es la distancia vertical entre la base del rayo vertical y la sección a partir de la cual se comienzan a registrar datos ("L" en la Figura 2.10); **salinidad**, la cual debe medirse con algún elemento in situ; **declinación magnética**, referente a dicha magnitud en la zona de la sección a medir, la cual puede obtenerse de la siguiente página web: <http://www.ngdc.noaa.gov/geomagmodels/struts/calcDeclination>, introduciendo los valores de latitud, longitud y día de la medición; **referencia de fondo**, para el cálculo de las velocidades, en donde se debe elegir si el seguimiento de las coordenadas del instrumento se hace con respecto al fondo (Bottom Track) o utilizando GPS; **referencia de profundidad**, en donde debe



seleccionarse si se utiliza el rayo vertical o el valor promedio de los cuatro rayos inclinados, de manera de obtener la batimetría; y **sistema de coordenadas**, de tal forma de poder referenciar los datos medidos, eligiendo entonces ENU (este-norte-vertical).

Nombre de Archivo: 20120611094240.rv Imprimir

Tipo de medida: Barco móvil

**Información de la Estación**  
 Introduzca la información que describa mejor el sitio y las condiciones de la medida

- Cambiar Información de la Estación**

Estación	Bañero Río III
Estación Nº	1 AA
Localización	sanitario
Equipo	FN HH MG
Plataforma	hydroboard
Medida Nº	1
Comentarios	viento en la dirección corriente

**Configuración**

Estación(25Caracters): Bañero Río III

Estación Nº(10Caracters): 1 AA

Localización(25Caracters): sanitario

Equipo(25Caracters): FN HH MG

Plataforma(15Caracters): hydroboard

Medida Nº(10Caracters): 1

Comentarios(50Caracters): viento en la dirección

OK Cancelar

Tipo de sistema	RS-S5
Numero de serie	1387
Version del Firmware	1.00

Profund. Transductor (m)	0,07
Distancia de monitoreo (m)	0,0
Salinidad (ppt)	0,0
Declin. magnetica (grados)	-3,8
Ref. del Track	Bottom-Track
Ref. de profundidad	Haz Vertical
Sistema coordinadas	ENU

**Medida de Caudal**

Margen de Inicio: Margen Izquierda

Caudal teórico (m<sup>3</sup>/s): 0,0

Calidad de la medida: --

**Estimación de los margenes**

Dist. del margen (m)	1,5	Margen pendiente	Dist. del margen (m)	2,0
Metodo de cálculo del margen izquierdo			Metodo de cálculo del margen derecho	Margen pendiente

**Extrapolación del Perfil**

Ajuste al modelo superior	Ajuste potencia (0,167)	Ajuste al modelo de fondo	Ajuste potencia (0,167)
Usar las celdas superiores	Todo perfil	Usar las celdas del fondo	Todo perfil
Descartar las ultimas	10,0% de perfil		

Figura 2.8. Información general de la medición.

**Ajustes de Sistema**

Profund. Transductor (m): 0,07

Distancia de monitoreo (m): 0,00

Salinidad (ppt): 0,0

Declin. magnetica (grados): -3,8

Ref. del Track: Bottom-Track

Ref. de profundidad: Haz Vertical

Sistema coordinadas: ENU

OK Cancelar

Figura 2.9. Ajustes del sistema.

- Se define antes de monitorear cada transecta cuál es el margen desde el que se comenzará a medir. Además, en caso de tenerse una estimación de caudal por otro medio (por ejemplo, a partir de un nivel y una curva altura-caudal), puede colocarse el caudal esperado de tal forma de que exista un elemento de control (Figura 2.11). Es importante tener en cuenta que en caso de no introducir correctamente el sentido de medición (de margen derecha a margen

izquierda, o al revés) los caudales resultarán negativos en aquellas mediciones en las que se haya introducido el origen erróneamente. Este error, sin embargo, puede ser subsanado corrigiendo luego en la hoja de información de cada transecta en particular el origen.

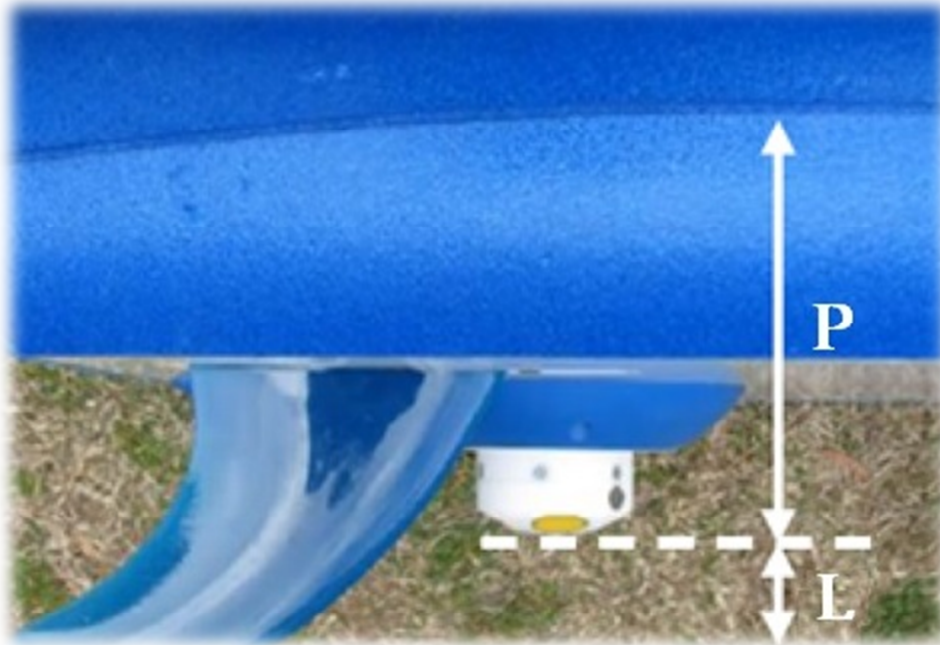


Figura 2.10. Profundidad del transductor -P- y distancia de monitoreo -L-.

Nombre de Archivo: 20120611094240.rv Imprimir

Tipo de medida: Barco móvil

**Información de la Estación**  
 Introduzca la información que describa mejor el sitio y las condiciones de la medida

Estación	Bañerío Río III
Estación Nº	1 AA
Localización	Sanitario
Equipo	FN HH MG
Plataforma	hydroboard
Medida Nº	1
Comentarios	vento en la dirección corriente

[Cambiar Información de la Estación](#)

**Configuración de Sistema**

Tipo de sistema	RS-S5
Año de serie	1397
Version del Firmware	1.00

**Ajustes de sistema**  
 Modifica ajustes de sistema

[Cambiar Ajustes](#)

**Ajustes de la medida**

Margen de inicio	Margen Izquierda
Caudal teórico (m3/s)	0,00
Calidad de la medida	--

**Medida de Caudal**  
 Modificar ajustes de la medida para

[Cambiar Ajustes de Medida](#)

Margen de Inicio	Margen Izquierda
Caudal teórico (m3/s)	0,0
Calidad de la medida	--

**Estimación de los márgenes**

Dist. del margen (m)	1,5	Dist. del margen (m)	2,0
Metodo de cálculo del margen izquierdo	Margen pendiente	Metodo de cálculo del margen derecho	Margen pendiente

**Extrapolación del Perfil**

Ajuste al modelo superior	Ajuste potencia (0,167)	Ajuste al modelo de fondo	Ajuste potencia (0,167)
Usar las celdas superiores	Todo perfil	Usar las celdas del fondo	Todo perfil
Descartar las ultimas	10,0% de perfil		

Figura 2.11. Ajustes sobre la medición.

4. Antes de colocar el equipo en el agua, se realiza la calibración de la brújula, girando el ADCP a través de dos círculos completos que

deben ser realizados en un tiempo mayor a 60 segundos y menor a 120 segundos al variar cabeceo y balanceo, girando sobre un eje e inclinando el barco hacia los costados con ángulos menores a 15°, hacia atrás y hacia adelante, simulando el movimiento del agua. De esta manera se compensan los efectos de campos magnéticos para que no se produzcan variaciones, ya que el equipo utiliza el norte magnético para referenciarse espacialmente. Esta tarea debe verificarse simultáneamente con el programa correspondiente, el cual indicará al final de la calibración la calidad de la misma mediante dos valores, uno precedido de la letra M (que debe ser lo menor posible) y un valor precedido de la letra Q (que debe ser lo más cercano a diez posible). De esta forma el equipo está listo para comenzar las mediciones, por lo tanto se lo debe colocar en el agua y presionar el botón de inicio en el programa para que comience a registrar datos.

En caso de presentarse inconvenientes, los mismos podrán notarse en la interfaz del programa. Debe llevarse un registro escrito del nombre de los archivos, sobre todo de aquellos que no serán tomados en cuenta en el posterior análisis debido a distintas causas.

#### **2.4.1.2 Visualización de resultados de las mediciones en el programa**

El programa permite varias maneras de muestras de datos. Incluso permite que los resultados mostrados en el resumen de la medición sean calculados en base a distintos métodos. Es por esto que es importante conocer las opciones que el programa permite configurar y su incidencia sobre los resultados, así como saber ubicar las herramientas necesarias para poder ordenar rápidamente los archivos y obtener la información deseada sin pérdidas de tiempo.

Como se puede apreciar en la Figura 2.12, la interfaz del programa cuenta con distintas partes fácilmente diferenciables: en primer lugar, arriba a la izquierda puede verse la lista de los Comandos Básicos, en donde básicamente pueden ajustarse los parámetros descritos en la sección 2.4.1.1, de tal forma de establecer los criterios de procesamiento de los datos; desde allí también es posible la apertura de archivos y el cambio en la disposición de la información mostrada en la interfaz. Por otro lado, en la parte superior al centro y a la derecha pueden encontrarse los archivos que se encuentran abiertos, visualizados en orden de apertura (por defecto, el programa abre los archivos de una campaña en el orden que fueron obtenidos, pero esto puede modificarse). En la parte izquierda de la pantalla se encuentra un breve resumen de cada archivo, de tal forma de obtener los datos que uno seleccione junto con las imágenes de la sección. Además, en la parte inferior izquierda se encuentra una serie de pestañas que se corresponden con las Opciones de Visualización, desde las cuales puede elegirse qué ver en la pantalla. En la Figura 2.12 se eligió la opción “Sección Transversal”, mostrándose así un corte de la sección con las velocidades en el fondo de la sección obtenido con el rayo acústico vertical y el promedio de los cuatro rayos inclinados, y el recorrido del barco utilizando GPS y el sistema de seguimiento de fondo. La opción “Sección Transversal” es la más útil visualmente, pero para el procesamiento de datos se eligen otras opciones que muestran la información en otro formato, como ser la opción “Muestras”, que da en pantalla una tabla con los datos de cada celda relevada.

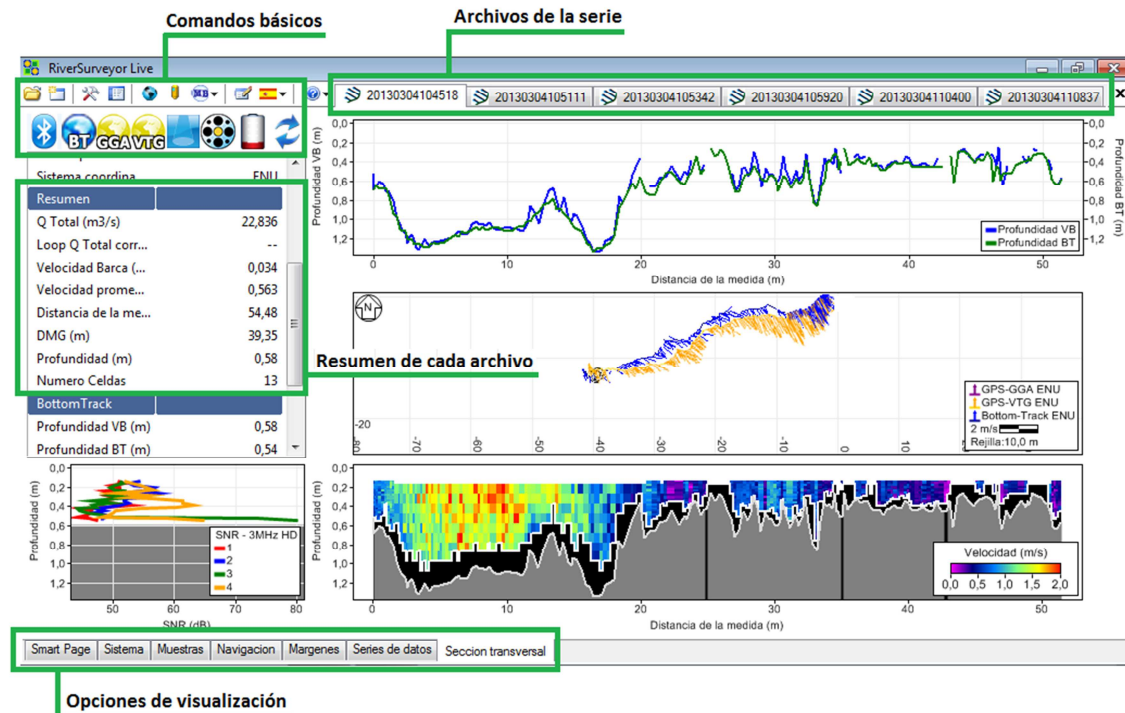


Figura 2.12. Interfaz del programa RiverSurveyor Live.

Es la pestaña de Muestras la que más sirve en el análisis que se realizó en esta investigación, ya que desde allí se encuentran los datos de magnitud de velocidad de flujo promediados en la vertical. La información que se tiene es la siguiente:

- **Paso:** se refiere al lugar de la sección al cual corresponden los datos medidos (Margen de Inicio, En sección transversal, Margen Final).
- **Muestra y Hora:** cantidad de datos medidos y la hora registrada por el instrumento. Como se explicó antes, la frecuencia de registro de datos del instrumento es de 1 dato por segundo.
- **Distancia de la medida:** es la distancia que realmente recorre el equipo a lo largo de la sección, sea el recorrido curvo, recto, o en cualquier dirección, incluso bucles.
- **DMG (Distance Made Good):** es la distancia desde la posición inicial hasta la posición actual, es decir, la distancia en línea recta entre ambos puntos.
- **Profundidad:** es la distancia medida hasta el lecho del río.
- **Número de Celdas:** es lo que va a definir la mayor o menor resolución en los resultados, ya que el aparato va ajustando el número de celdas para la toma de datos en las distintas partes de la sección, tomando un gran número de celdas en los márgenes (bajas velocidades).

- **Satélites:** muestra la cantidad de satélites presentes durante la medición. A mayor cantidad de satélites, hay menor posibilidad de errores o interferencias.
- **Velocidad Promedio:** es la magnitud de velocidad media del flujo en la vertical.
- **Caudal Total:** va registrando el caudal acumulado hasta la medición actual, considerando las distintas áreas y velocidades medidas en cada parte de la sección.

La forma con la que se visualiza la pestaña Muestras es mostrada en la Figura 2.13.

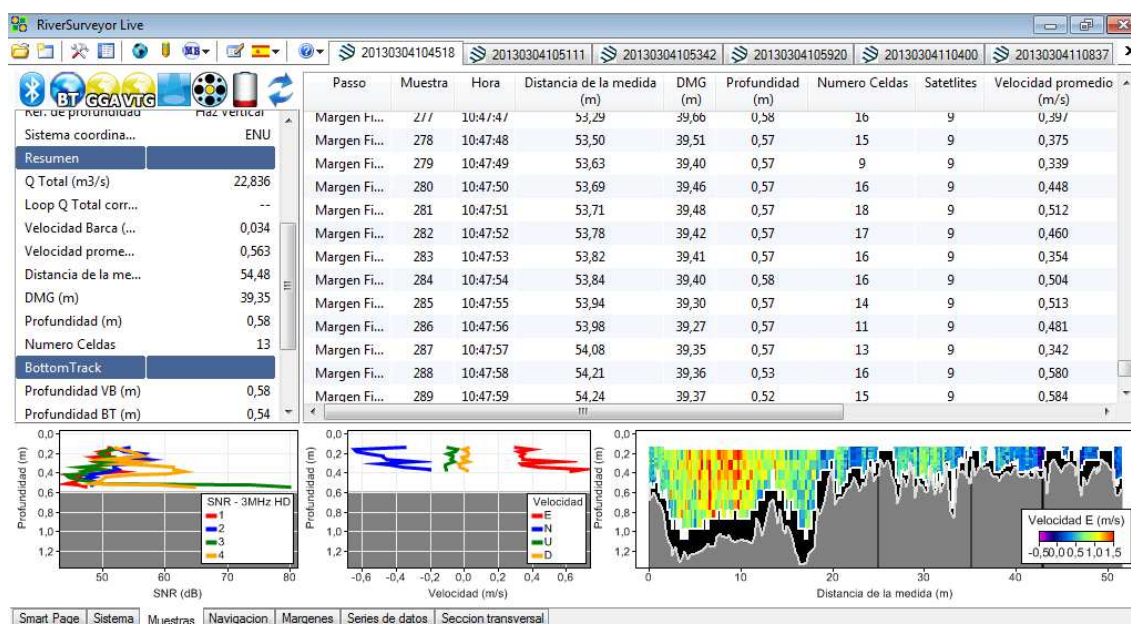


Figura 2.13. Visualización de la pestaña "Muestras" en el programa.

Dentro de los Comandos Básicos, una opción permite visualizar (Figura 2.14) el resumen de todas las mediciones de la sección elegida, obteniéndose para cada transecta el tiempo empleado en completarla, el caudal obtenido, la velocidad promedio, el área de sección relevada, la longitud de la sección y la hora en que fue realizada, entre otras cosas, permitiendo así compararlas, de tal forma de identificar valores alejados de la media, y poder definir si la calidad de las mediciones es aceptable o si las mismas deben realizarse de nuevo. La planilla incluye las desviaciones en cada una de las variables tomadas en cuenta, y además permite incluir o no algunas transectas en el cálculo de los promedios, para realizar un análisis de sensibilidad con la inclusión o no de alguna de estas series de datos medidas.

De la información incluida en esta pestaña se utilizarán los caudales, velocidades, áreas y anchos promedio. Los perfiles transversales de velocidad y fondo se promediarán mediante el empleo del programa VMT (ver sección 2.4.2), por lo que no se verán de la forma en la que se visualizan en el programa.



Archivo	del mai (m)	del mai (m)	Fecha...	Hora ...	Durac...	ia de la (m)	DMG (m)	Ancho (m)	Area (m2)	dad pro (m/s)	idad B (m/s)	Izquierc (m3/s)	! Derech (m3/s)	Q Total (m3/s)	Total cc (m3/s)	Medid (%)
20130...	1,00	2,00	04/03...	10:43:...	0:04:53	54,48	39,35	42,346	27,910	0,818	0,186	0,37	0,46	22,836	--	58,4
20130...	1,00	3,00	04/03...	10:49:...	0:02:01	47,76	35,71	39,711	28,459	0,809	0,395	0,40	0,27	23,028	--	60,7
20130...	1,00	3,00	04/03...	10:51:...	0:04:44	57,17	36,38	40,384	28,530	0,805	0,201	0,34	0,00	22,961	--	63,8
20130...	1,00	3,00	04/03...	10:57:...	0:04:10	59,00	36,27	40,265	27,009	0,871	0,236	0,36	0,15	23,524	--	63,1
20130...	1,00	3,00	04/03...	11:01:...	0:04:07	52,34	34,68	38,677	26,577	0,861	0,212	0,39	0,00	22,886	--	60,1
20130...	1,00	3,00	04/03...	11:06:...	0:02:48	54,74	35,93	39,931	27,593	0,864	0,326	0,41	0,17	23,853	--	61,0
Prom...					0:03:47	54,25	36,39	40,219	27,680	0,838	0,259	0,38	0,18	23,181	--	61,2
Devia...					0:01:02	3,59	1,44	1,101	0,714	0,028	0,076	0,02	0,16	0,376	--	1,8
COV					0,000	0,066	0,039	0,027	0,026	0,033	0,292	0,065	0,905	0,016	0,000	0,030

Figura 2.14. Planilla de resumen de todas las transectas realizadas en una determinada sección.

#### 2.4.2 VMT: Programa para el post-procesamiento de datos.

Al realizar mediciones con el ADCP, tal cual se explicó, se efectúan varias transectas (en general más de cuatro) en cada sección elegida. Como se mencionó anteriormente, el ADCP registra un perfil de las tres componentes del vector velocidad cada un segundo (frecuencia = 1 Hz). A medida que se desplaza en la sección transversal los perfiles transversales registrados presentan fluctuaciones debido a los patrones medios de flujo presentes, a los procesos turbulentos y al ruido Doppler. Para minimizar estas dos últimas contribuciones se recomienda promediar múltiples transectas en la misma sección.

Para calcular los perfiles medios de velocidad se procede al análisis de los mismos con VMT, según su nombre en inglés, Velocity Mapping Tool. VMT es un programa computacional desarrollado en Matlab para el procesamiento y visualización de los datos recopilados a lo largo de múltiples transectas ADCP en ríos u otros cuerpos de agua. VMT permite un rápido procesamiento, visualización y análisis de una serie de conjuntos de datos medidos con ADCP, e incluye utilidades para exportar datos de ADCP a archivos compatibles con ArcGIS, Tecplot y Google Earth. Este programa computacional puede ser utilizado para explorar patrones de movimiento del fluido tridimensional a través de varios métodos para el cálculo de los flujos secundarios. VMT también incluye capacidades para el análisis de la retrodispersión acústica y los datos batimétricos del ADCP. Una interfaz gráfica de usuario (GUI) mejora la funcionalidad del programa y proporciona fácil acceso a los datos. Además, las funciones de graficado en tres dimensiones permiten una visualización rápida del campo de la velocidad del flujo, la retrodispersión, y los datos de batimetría (<http://hydroacoustics.usgs.gov/movingboat/VMT/VMT.shtml>).

### 2.5 RECOMENDACIONES PARA LA MEDICIÓN

Si bien es cierto que el equipo realiza la mayor parte de las actividades durante la medición de forma automática, debe verificarse que se lleven a campaña todos los elementos necesarios para poder realizar las mediciones, así como verificar su correcto funcionamiento. Es por ello que se detallan a continuación algunas de las recomendaciones a considerar a la hora de realizar la medición:

- Selección del sitio de medición: si bien el objetivo de una medición es obtener datos en una determinada sección, no es posible realizar mediciones en cualquier sección del río debido a impedimentos que el

mismo terreno o el entorno plantean. Por ello, debe buscarse una sección del río que sea accesible desde ambos márgenes, o bien desde un puente, de tal forma que el recorrido del equipo pueda ser lo más uniforme posible, evitándose obstrucciones, obteniendo una medición más confiable y fácil de realizar. Además la sección en la que se mide debe presentar un flujo libre de turbulencias y otros efectos producidos por obstáculos naturales o antropogénicos.

- Calibración de la brújula: se debe calibrar la brújula antes de realizar las mediciones. La calibración debe ser realizada en la zona donde se hará la medición. La presencia de estructuras de metal y líneas de alta tensión pueden afectar significativamente el resultado.
- Definir con precisión las zonas no medidas: cabe aclarar que el ADCP no puede medir a lo largo de toda la sección, ya que necesita una profundidad mínima para poder registrar celdas. Es por ello que en los márgenes muchas veces debe frenarse el equipo a cierta distancia, la cual debe ser registrada para posteriormente realizar las interpolaciones necesarias (Figura 2.15). A estos fines, el equipo debe permanecer inmóvil durante unos instantes para que el error posterior en la interpolación sea mínimo, y pueda tomarse en cuenta la porción de la sección no medida con la mayor precisión posible. Además, otra región de la sección que el ADCP no puede considerar es la porción de agua que queda comprendida entre la base del rayo vertical y el pelo del agua, ya que dicho espacio no es alcanzado por los rayos; y tampoco puede medirse la porción cercana al fondo del río, ya que las ondas que allí rebotan presentan mucho ruido. Sin embargo, el equipo es capaz de interpolar los parámetros de la sección para todos estos casos (Figura 2.15).

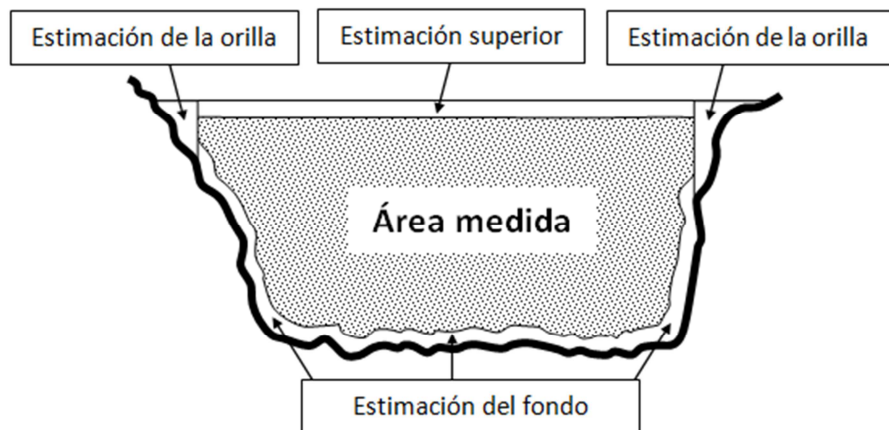


Figura 2.15. Áreas medidas y áreas estimadas por el ADCP.

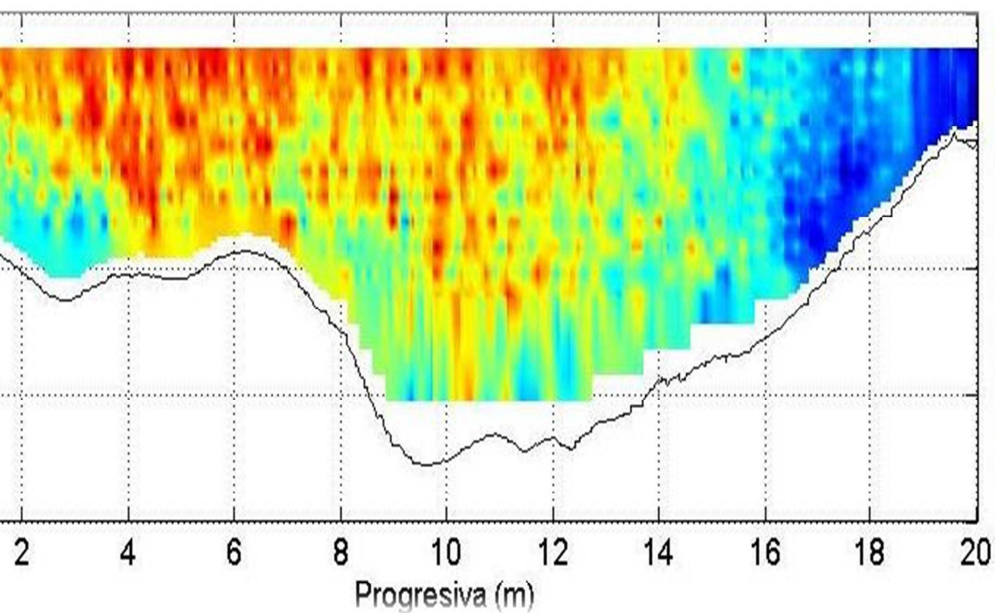
- Al realizar las transectas, debe mantenerse la velocidad de la embarcación constante a fines de que las mediciones no se vean afectadas. Es importante también lograr que la velocidad de avance la barca sea siempre menor a la velocidad del agua, de tal forma que el error relativo sea el mínimo posible.
- Actividades previas al trabajo de campo: como recomendación, se debe hacer una lista de chequeo que contemple revisar baterías (del ADCP y

de los dispositivos móviles de recepción de datos), herramientas, barco y accesorios del mismo, soga o elemento de traslación del barco (en caso de que no sea autopropulsada), etc. La comisión precisa de al menos tres operarios, dos para mover el barco con el equipo de lado a lado, y uno para manejar el equipo de recepción (computadora portátil o teléfono celular).

- No siempre se puede acceder a ambas márgenes del río, o bien llegar por tierra a una de ellas no es viable por el tiempo que requiere. En dichos casos, es necesario contar con un bote o kayak capaz de transportar personas de lado a lado del río.



## CAPÍTULO 3



### CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE LA HIDRODINÁMICA DEL FLUJO



## CAPÍTULO 3 - CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE LA HIDRODINÁMICA DEL FLUJO

### 3.1 CAMPAÑAS DE MEDICIÓN

Este informe se elabora en base a trabajos experimentales junto con el equipo de trabajo del CETA (Centro de Estudios y Tecnología del Agua) durante 2012 y 2013, en colaboración con la Sub Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba y la Universidad Nacional de Rosario. Se realizaron varias campañas durante esos dos años en distintas secciones ubicadas a lo largo de los distintos tributarios, como el río Tercero, el río Saladillo, y el arroyo Tortugas, así también sobre el mismo río Carcarañá. Durante estas campañas se monitorearon distintas condiciones de flujo.

La utilidad de contar con mediciones periódicas radica en poder disponer información sobre la variación estacional de las condiciones de los ríos, lo que ayuda a comprender sus comportamientos. Esto se logra gracias a la continuidad que se da a los proyectos de estas características, más allá de las personas que están a cargo en cada momento.

En total, para este trabajo se utilizaron datos relevados en 7 campañas de medición, las cuales se detallan a continuación:

#### Mediciones realizadas en el año 2012

- *11 de junio:* se realizaron mediciones en un tramo del río Tercero en el balneario de la ciudad homónima, en dos secciones separadas aproximadamente por 100 metros entre ellas. Estas secciones, al igual que las que se enuncian a continuación, serán de ahora en adelante referenciadas por la fecha en la que fueron realizadas, agregando a una la denominación “aguas arriba” y a la otra “aguas abajo”, estando esta última aproximadamente unos 120 metros aguas arriba del puente del balneario de la ciudad de Río Tercero.
- *10 de septiembre:* nuevamente se realizaron mediciones en el balneario de la ciudad de Río Tercero, en secciones cercanas a las anteriores.
- *12 de noviembre:* volvió a medirse en la misma zona, pero ahora la sección aguas arriba estaba a unos 200 metros de la ubicada aguas abajo, en lugar de la separación de 100 metros que había entre las secciones aguas arriba y aguas abajo en las otras campañas.

#### Mediciones realizadas en el año 2013

- *11 de junio:* en esta fecha se realizaron mediciones sobre el río Saladillo, aguas arriba del cruce de la Ruta Provincial de Córdoba N°6.
- *11 de septiembre:* se aforó en el río Saladillo, sobre el puente de cruce de la Ruta Provincial de Córdoba N°6.
- *30 de septiembre:* se realizó una campaña de dos días dada la lejanía de los lugares de medición. Se aforaron dos secciones sobre el río Carcarañá, una en las cercanías del Parque Sarmiento, localidad de

Carcarañá, y otra en la localidad de Cruz Alta, y además se aforó el río Saladillo sobre el puente de cruce de la Ruta Provincial de Córdoba N°6.

- 19 de noviembre: se aforaron dos secciones sobre el río Carcarañá (Parque Sarmiento e Inrville), se aforó el río Saladillo sobre el puente de la Ruta Provincial de Córdoba N°6, y se realizó un aforo sobre el arroyo Tortugas.

**Tabla 3.1. Campañas de medición realizadas.**

<b>Campaña</b>	<b>Fecha</b>	<b>Sección de Medición</b>
1	11/06/2012	2 secciones sobre el río Tercero
2	10/09/2012	2 secciones sobre el río Tercero
3	12/11/2012	2 secciones sobre el río Tercero
4	11/06/2013	1 sección sobre el río Saladillo
5	11/09/2013	1 sección sobre el río Saladillo
6	30/09/2012	1 sección sobre el río Saladillo 2 secciones sobre el río Carcarañá
7	20/11/2012	1 sección sobre el río Saladillo 2 secciones sobre el río Carcarañá 1 sección sobre el arroyo Tortugas

### 3.2 SITIOS DE MEDICIÓN

En la Figura 3.1 se muestra la ubicación del balneario de la ciudad de Río Tercero en donde se realizaron las campañas de medición 1, 2 y 3. Luego, en la Figura 3.2 se localizan dentro del balneario las dos secciones medidas en la campaña de medición 1 -las campañas 2 y 3 se realizaron en el mismo balneario, relevándose secciones cercanas a las mostradas en la Figura 3.2-. En la Figura 3.3 se muestra una imagen tomada durante la campaña de medición 2.



**Figura 3.1. Ubicación del balneario respecto de la ciudad de Río Tercero.**



**Figura 3.2.** Ubicación de las secciones de medición en el balneario de Río Tercero para la campaña de medición 1.



**Figura 3.3.** Balneario de la ciudad de Río Tercero.

La sección mostrada en la Figura 3.4 está localizada aguas arriba del puente correspondiente al cruce del río Saladillo y la Ruta Provincial 6 de Córdoba, a unos 200 metros hacia el este de la localidad de Saladillo. En esta sección se aforó durante las campañas de medición 4, 5, 6 y 7. En las Figuras 3.5 y 3.6 se muestran algunas de las imágenes tomadas durante las mediciones.





**Figura 3.4. Sección sobre el río Saladillo, aguas arriba del cruce de la Ruta Provincial de Córdoba N°6.**



**Figura 3.5. Realización de transectas durante la campaña de medición 4, río Saladillo.**



**Figura 3.6. Realización de transectas durante la campaña de medición 6, río Saladillo**

Los dos ríos de las figuras anteriores (río Tercero y río Saladillo) continúan su camino, y la confluencia de los mismos se ubica a unos 2 Km aguas abajo de la sección mostrada en la Figura 3.4, en el este de la Provincia de Córdoba (Figura 3.7), cerca de la localidad de Monte Buey.

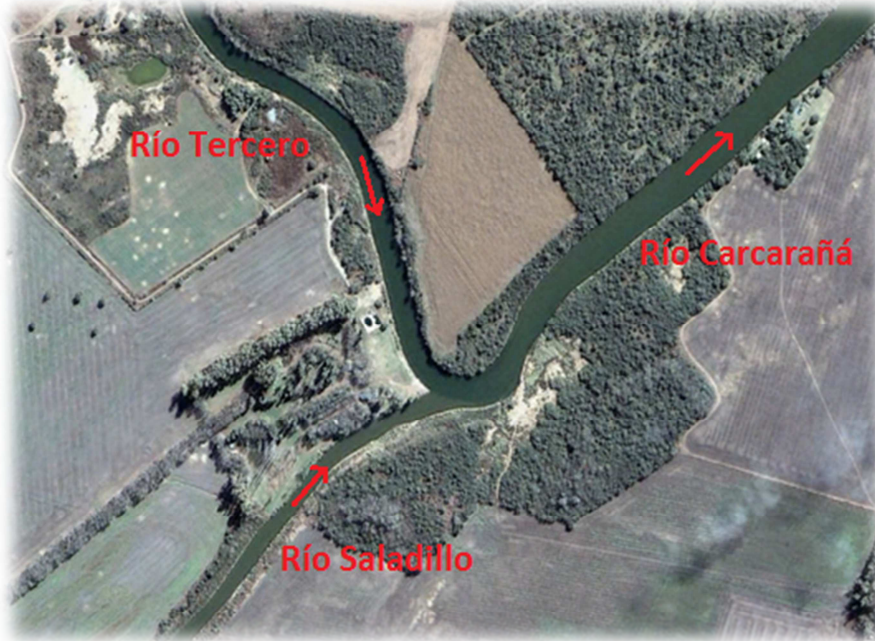


Figura 3.7. Confluencia de los ríos Tercero y Saladillo.

Las secciones aforadas sobre el río Carcarañá que se utilizaron en este trabajo son tres. La primera de ellas está situada aguas abajo del puente correspondiente al cruce de la Ruta Provincial 15 de Santa Fe sobre el río Carcarañá, cerca de la localidad de Cruz Alta, relevada en la campaña de medición 6 (Figuras 3.8 y 3.9).



Figura 3.8. Sección sobre el río Carcarañá en el cruce de la Ruta Provincial de Santa Fe N°15, relevada en la campaña de medición 6.





**Figura 3.9. Imagen tomada durante la campaña de medición 6, río Carcarañá -Cruz Alta-.**

Otra de las secciones aforadas sobre el río Carcarañá durante las campañas de medición 6 y 7 es la que se ubica en el Parque Sarmiento, en la localidad de Carcarañá, Provincia de Santa Fe (Figuras 3.10 y 3.11).



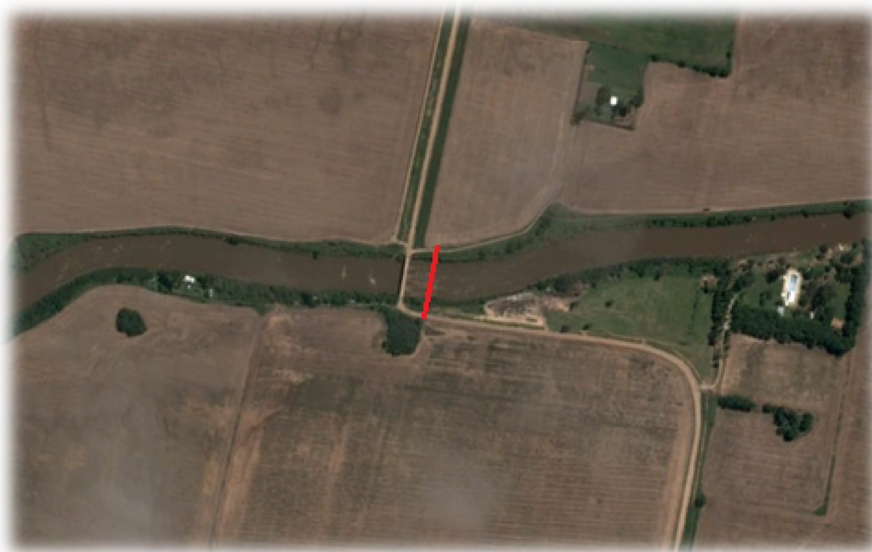
**Figura 3.10. Sección aforada sobre el río Carcarañá durante las campañas de medición 6 y 7, en el Parque Sarmiento de la localidad de Carcarañá.**



**Figura 3.11- Imagen tomada durante la campaña de medición 7, sobre el río Carcarañá - Parque Sarmiento, Carcarañá-.**



La tercera y última sección aforada sobre el río Carcarañá que se emplea en este trabajo es aquella localizada en cercanías de la localidad de Inrville, Provincia de Córdoba, la cual fue relevada durante la campaña de medición 7 (Figuras 3.12 y 3.13).

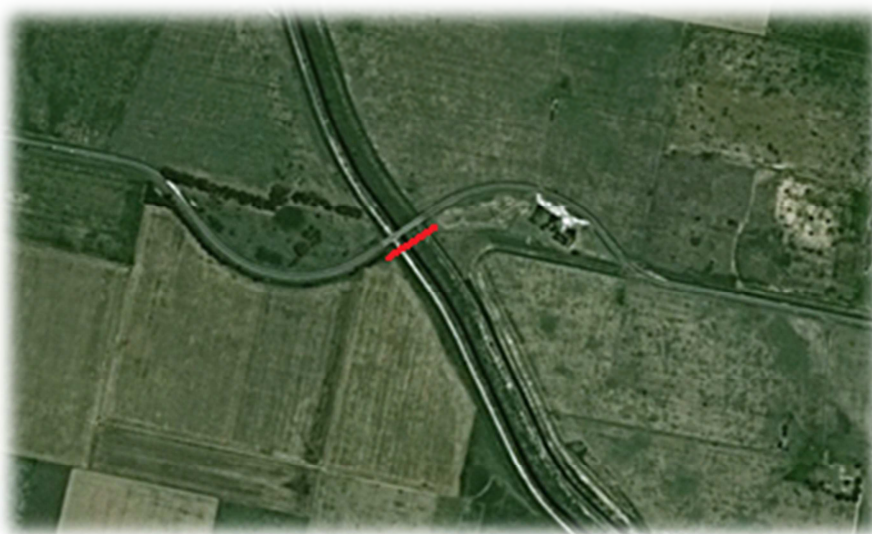


**Figura 3.12. Sección aforada durante la campaña de medición 7 sobre el río Carcarañá, cerca de la localidad de Inrville.**



**Figura 3.13. Imagen tomada sobre el río Carcarañá durante la campaña de medición 7 - Inrville-.**

Por último, se aforó sobre el arroyo Tortugas, el tributario más importante del río Carcarañá (exceptuando los ríos Tercero y Saladillo). La sección se localiza cerca de la localidad homónima al arroyo, en la provincia de Santa Fe (Figuras 3.14 y 3.15).



**Figura 3.14. Arroyo Tortugas, en Santa Fe.**



**Figura 3.15. Imagen tomada durante la campaña de medición 7 en el arroyo Tortugas.**

En cada una de las secciones de aforo se realizaron al menos 4 cruces (transectas). En las secciones de aforo sobre los ríos Tercero y Saladillo, y sobre el arroyo Tortugas, las mediciones se realizaron remolcando la embarcación desde las márgenes, mientras que en algunas secciones del río Carcarañá, la embarcación se operó desde los puentes debido a los anchos significativos las mismas, teniéndose dos metodologías diferentes pero con los mismos resultados (Figuras 3.16 y 3.17). Sin embargo, el efecto de las pilas de los puentes afecta el flujo localmente, generándose a sus alrededores condiciones de mezcla particulares, en las cuales otros procesos de mezcla predominan, lo que muchas veces imposibilita la utilización de dichos datos a la hora del análisis.

Para cada medición se efectúan varias transectas en una misma sección, las cuales son almacenadas por el programa RiverSurveyor Live con un nombre de archivo que

consta de un número de varias cifras, las cuales indican año, mes, día, hora, minutos y segundos, en el orden mencionado, en el que se realizó cada medición. Por ejemplo, el archivo 20130304104518 indica que la medición fue iniciada en 2013, en el mes 03 (marzo), el día 04, a las 10 horas, 45 minutos y 18 segundos.



Figura 3.16. Medición sobre cursos angostos, remolcando el ADCP desde las orillas.



Figura 3.17. Medición sobre cursos anchos, remolcando el ADCP desde un puente.

### 3.3 CARACTERÍSTICAS HIDRODINÁMICAS DE LAS SECCIONES ANALIZADAS

Se exponen a continuación los parámetros relevados para las secciones mencionadas anteriormente. Se colocará para cada una de las campañas la sección promediada obtenida con el empleo de VMT, tal cual como se describió en el Capítulo 2, junto con el caudal ( $Q$ ), la velocidad media de la sección ( $U$ ), el área de la sección ( $A$ ), el ancho ( $B$ ), la pendiente hidráulica ( $S$ ), y la profundidad media ( $H$ ), ya que son estos parámetros los que serán requeridos posteriormente en el cálculo del coeficiente de dispersión longitudinal. Además, se estima para cada sección la velocidad de corte ( $u^*$ ) de acuerdo a la ecuación 1.1.



Tabla 3.2. Parámetros principales de las secciones analizadas.

Fecha	Sección	B [m]	H [m]	A [m <sup>2</sup> ]	U [m/s]	u* [m/s]	S [m/m]	Q [m <sup>3</sup> ]
11/06/2012	Río Tercero	31,58	0,63	20,03	0,91	0,09	0,001125	18,22
10/09/2012	Río Tercero	37,56	0,49	18,49	0,99	0,09	0,001125	18,22
12/11/2012	Río Tercero	31,40	0,68	21,50	0,86	0,09	0,001125	18,51
11/06/2013	Río Saladillo	20,66	1,03	21,26	0,70	0,04	0,000182	14,80
11/09/2013	Río Saladillo	19,08	0,95	18,18	0,50	0,04	0,000182	9,16
30/09/2013	Río Carcarañá (Carcarañá)	41,14	1,60	65,87	0,49	0,07	0,000350	32,08
30/09/2013	Río Carcarañá (Cruz Alta)	44,50	1,14	50,66	0,66	0,06	0,000350	33,39
30/09/2013	Río Saladillo	21,49	0,93	20,01	0,70	0,04	0,000182	13,96
19/11/2013	Río Saladillo	20,09	1,18	23,76	0,62	0,05	0,000182	14,75
19/11/2013	Río Carcarañá (Carcarañá)	46,98	2,07	97,42	0,75	0,05	0,000350	72,97
19/11/2013	Río Carcarañá (Inriville)	34,37	0,99	33,94	0,83	0,05	0,000350	28,12
20/11/2013	Arroyo Tortugas	16,03	2,15	34,40	0,70	0,08	0,000292	24,22

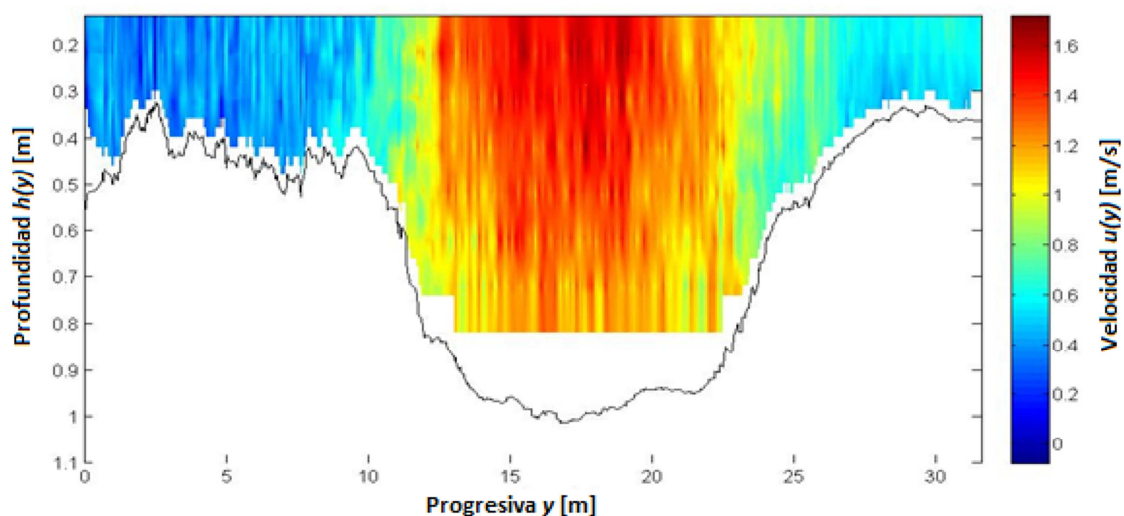


Figura 3.18. Sección promediada, río Tercero, 11-06-12.

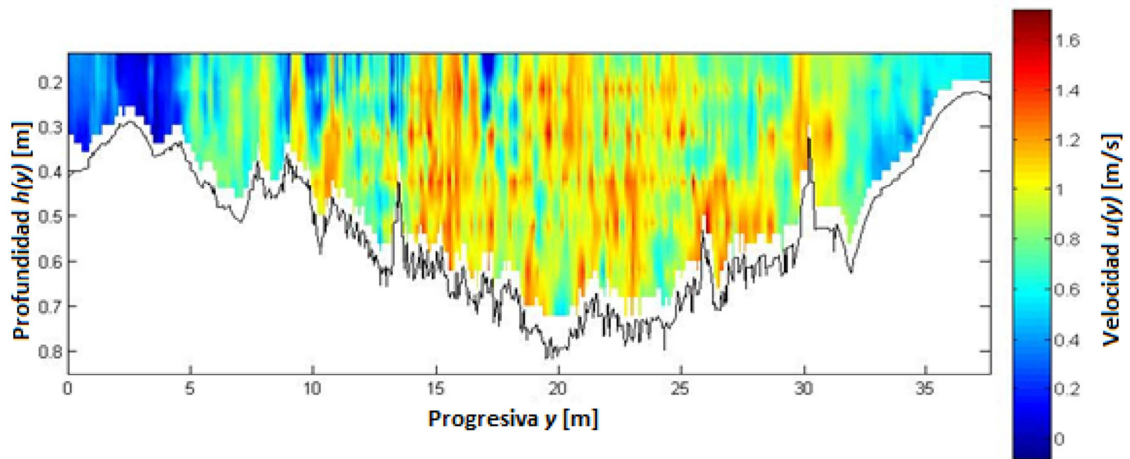


Figura 3.19. Sección promediada, río Tercero, 10-09-12.

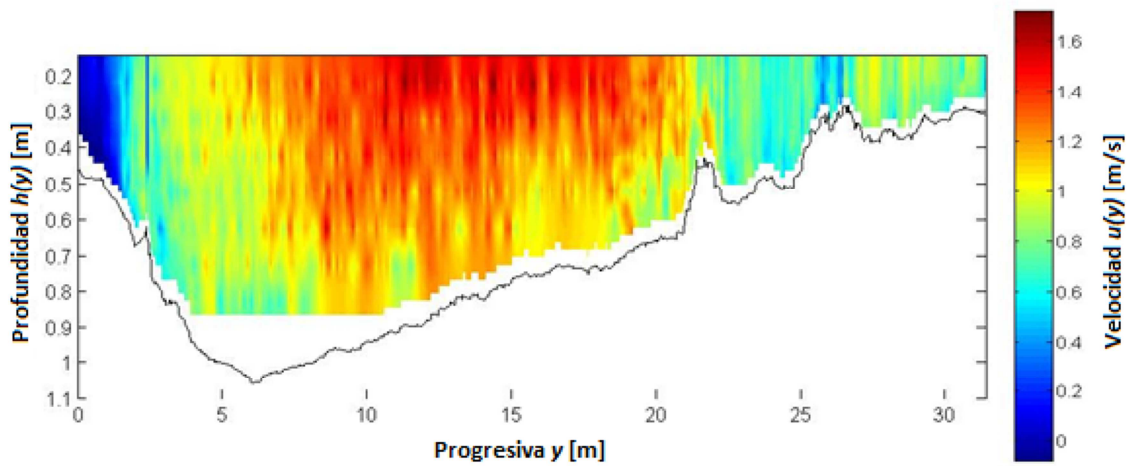


Figura 3.20. Sección promediada, río Tercero, 12-11-12.

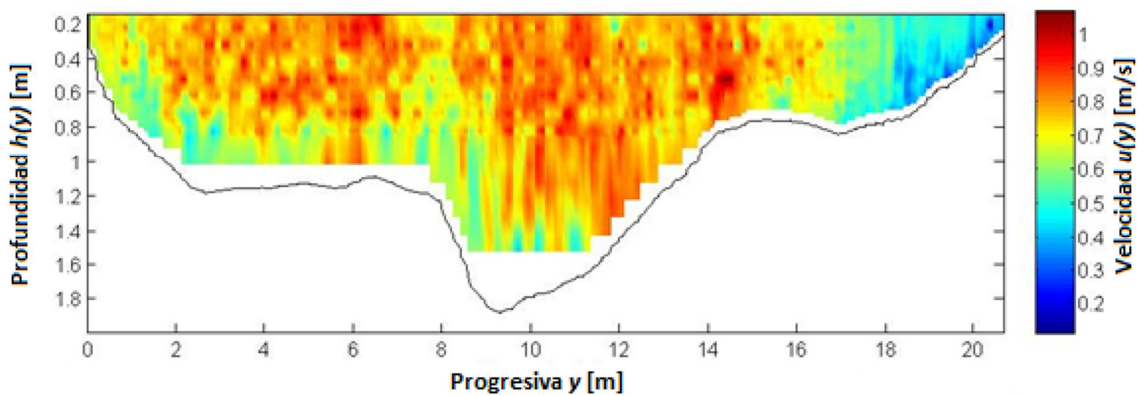


Figura 3.21. Sección promediada, río Saladillo, 11-06-13.

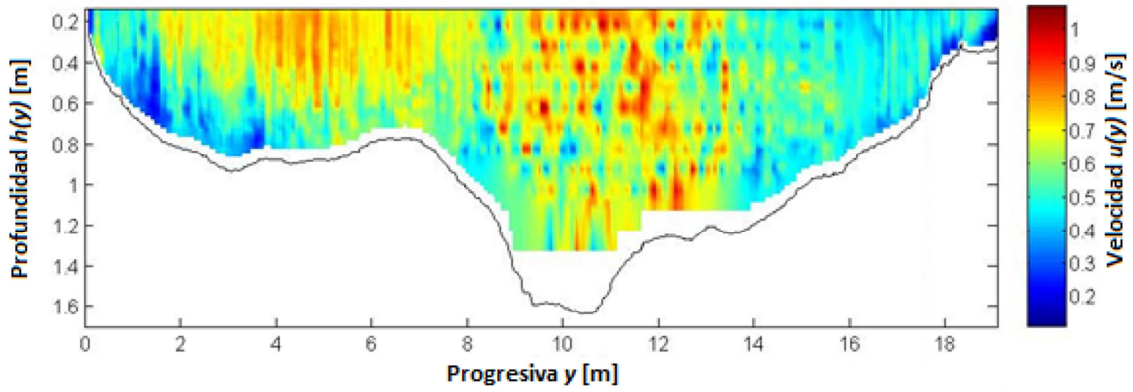


Figura 3.22. Sección promediada, río Saladillo, 11-09-13.

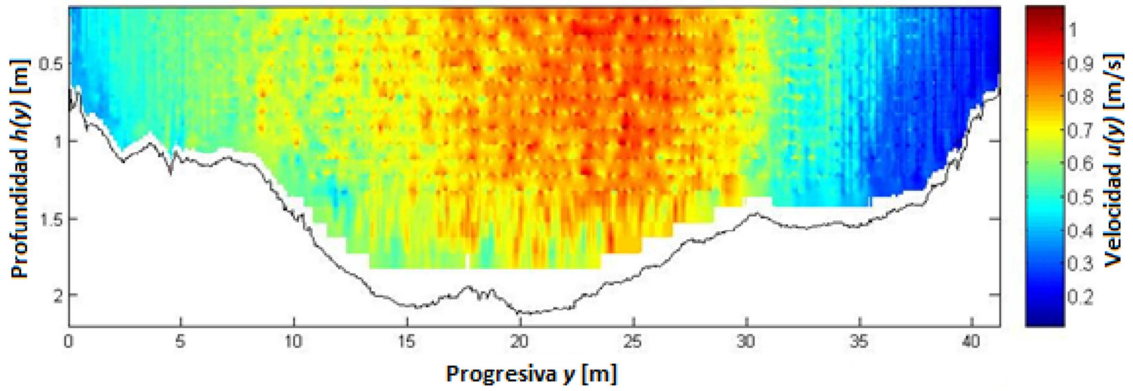


Figura 3.23. Sección promediada, río Carcarañá (Carcarañá), 30-09-13.

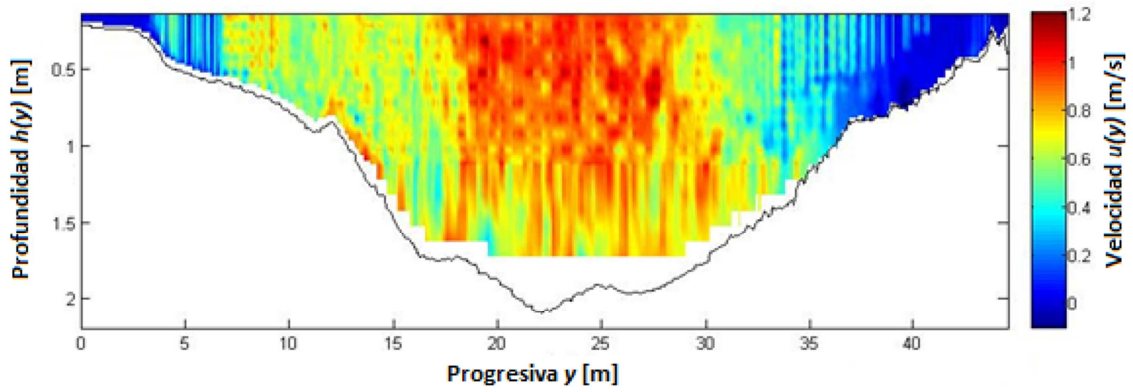


Figura 3.24. Sección promediada, río Carcarañá (Cruz Alta), 30-09-13.

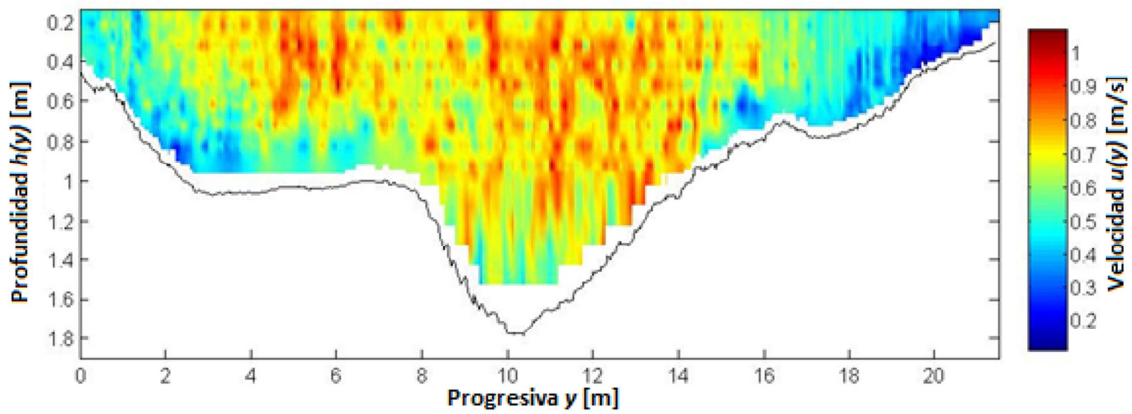


Figura 3.25. Sección promediada, río Saladillo, 30-09-13.

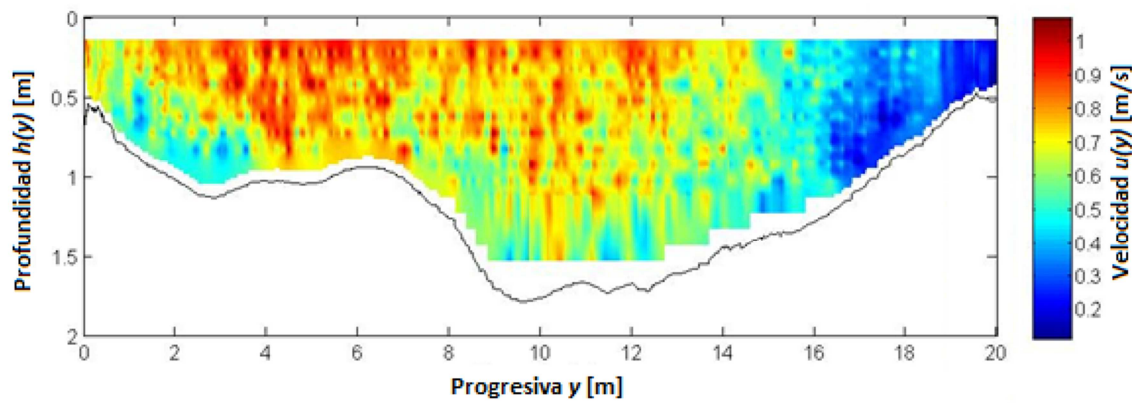


Figura 3.26. Sección promediada, río Saladillo, 19-11-13.

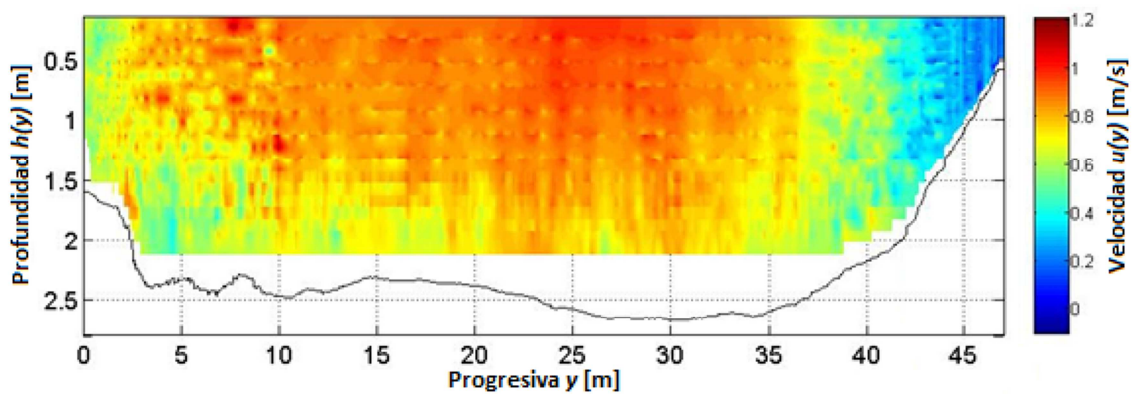


Figura 3.27. Sección promediada, río Carcarañá (Carcarañá), 19-11-13.



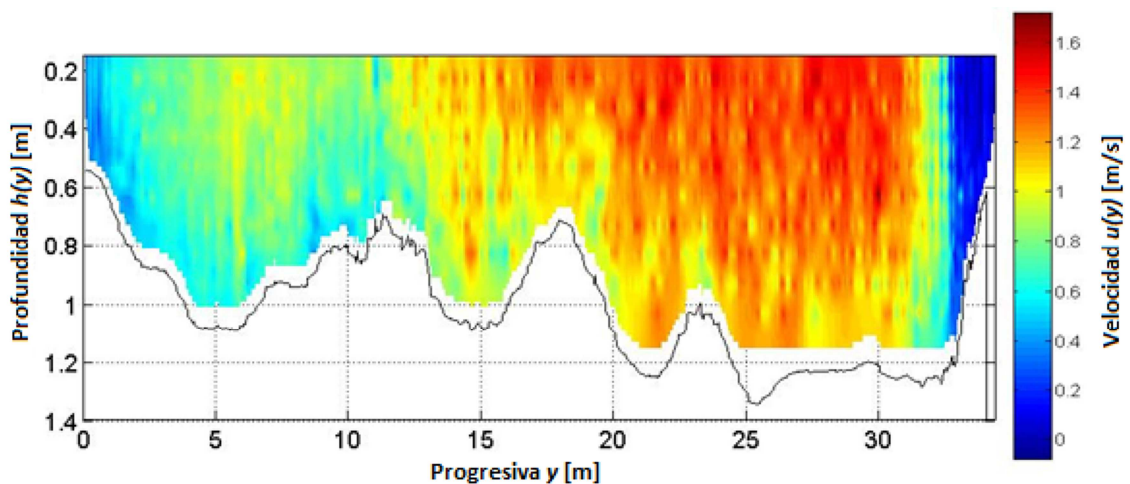


Figura 3.28. Sección promediada, río Carcarañá (Inrville), 19-11-13.

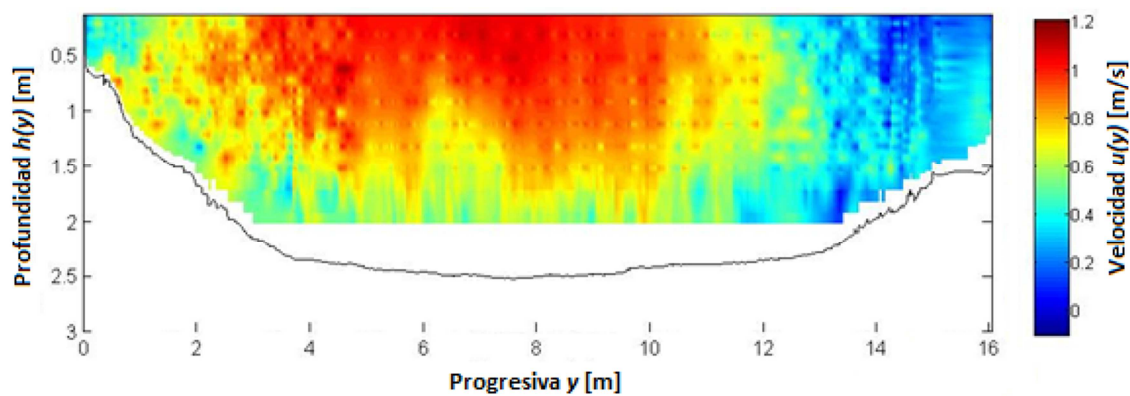
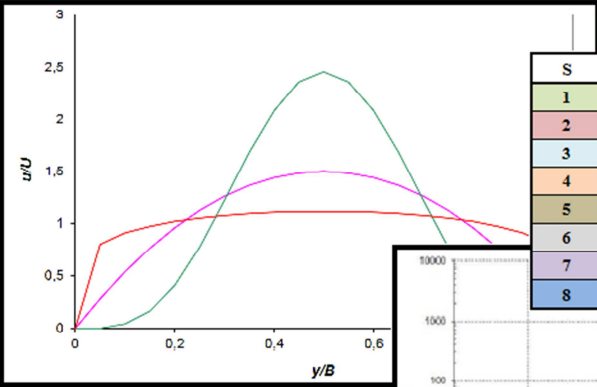


Figura 3.29. Sección promediada, arroyo Tortugas, 20-11-13.

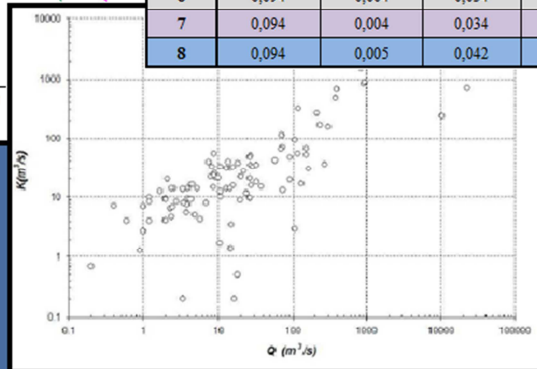


# CAPÍTULO 4

## DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE DISPERSIÓN LONGITUDINAL



S	$u^*$ [m/s]	$\varepsilon_r$ [ $m^2/s$ ]	$\varepsilon_t$ [ $m^2/s$ ]	$D_{99}$ [ $m^2/s$ ]	$D_t$ [m]
1	0,094	0,004	0,038	94,95	-
2	0,094	0,004	0,038	53,26	19,3
3	0,094	0,005	0,042	33,93	-
4	0,094	0,005	0,042	27,52	-
5	0,094	0,004	0,034	48,95	-
6	0,094	0,004	0,034	32,47	-
7	0,094	0,004	0,034	28,42	-
8	0,094	0,005	0,042	35,28	16,3





## CAPÍTULO 4 - DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE DISPERSIÓN LONGITUDINAL

### 4.1 CONSIDERACIONES PREVIAS

En este Capítulo se analizan los parámetros hidráulicos y los patrones de flujo presentados en el Capítulo anterior, con el fin de estimar experimentalmente los coeficientes de dispersión en distintos tributarios y en el río Carcarañá. Para determinar los coeficientes de dispersión se utilizan las ecuaciones empíricas presentadas en la sección 1.4.1 y la ecuación integral presentada en la sección 1.4.2, que requiere una caracterización hidrodinámica detallada. Finalmente, se contrastan los resultados obtenidos con ambas metodologías.

Puede verse que los ríos relevados tienen formas muy distintas entre sí, e incluso se puede apreciar que a lo largo de un mismo río las secciones van cambiando de un tramo a otro. Lo mismo pasa con los caudales, los cuales aumentan o disminuyen debido a la presencia de tomas o aportes a los ríos, principalmente en cercanía de ciudades y por la presencia de otros tributarios. Es por esto que los resultados del coeficiente de dispersión longitudinal que se obtienen solamente sirven para caracterizar cierto tramo del río y bajo condiciones similares a las analizadas.

Para poder evaluar la evolución del coeficiente de dispersión longitudinal en una determinada sección a medida que el caudal aumenta o disminuye, es que fueron realizadas varias mediciones en distintas épocas del año en cada sección.

### 4.2 RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LAS ECUACIONES EMPÍRICAS PARA ESTIMAR EL COEFICIENTE DE DISPERSIÓN LONGITUDINAL

Tabla 4.1. Estimación del Coeficiente de Dispersión Longitudinal con las ecuaciones empíricas.

Fecha	Sección	$\epsilon_t$ [m <sup>2</sup> /s]	$\epsilon_v$ [m <sup>2</sup> /s]	D [m <sup>2</sup> /s]
11/06/2012	Río Tercero	0,0357	0,0037	165,79
10/09/2012	Río Tercero	0,0358	0,0029	353,84
12/11/2012	Río Tercero	0,0353	0,0040	135,11
11/06/2013	Río Saladillo	0,0265	0,0030	51,41
11/09/2013	Río Saladillo	0,0236	0,0026	25,79
30/09/2013	Río Carcarañá (Carcarañá)	0,0712	0,0080	37,22
30/09/2013	Río Carcarañá (Cruz Alta)	0,0427	0,0048	133,05
30/09/2013	Río Saladillo	0,0228	0,0025	65,00
19/11/2013	Río Saladillo	0,0327	0,0036	31,44
19/11/2013	Río Carcarañá (Carcarañá)	0,0327	0,0064	142,90
19/11/2013	Río Carcarañá (Inrville)	0,0327	0,0031	195,67
20/11/2013	Arroyo Tortugas	0,1010	0,0113	8,33

Al aplicar las ecuaciones empíricas (ecuaciones 1.1 a 1.4), como se dijo, intervienen únicamente los parámetros globales del río, sin importar la forma en la que los mismos se distribuyen a lo largo de la sección. Los datos requeridos para utilizar las ecuaciones empíricas son los parámetros hidráulicos globales obtenidos en la caracterización experimental de la hidrodinámica del flujo, detallados para cada sección en el Capítulo 3. En la Tabla 4.1 se exponen los resultados obtenidos para las secciones mostradas en el Capítulo 3.

### **4.3 RESULTADOS DE LA ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE DISPERSIÓN LONGITUDINAL UTILIZANDO LA ECUACIÓN INTEGRAL CON CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DETALLADA**

Es importante destacar que en esta metodología, al considerar la distribución de velocidades junto con la forma de la sección, se incluyen en mayor detalle las características locales del flujo en el cálculo del coeficiente de dispersión longitudinal. Sin embargo, este mayor detalle se logra sacrificando la simplicidad de las ecuaciones empíricas. Es por ello que al final de este trabajo se contrastan los resultados de esta metodología con los obtenidos con las ecuaciones empíricas a fin de determinar si se justifica el empleo de esta metodología.

Como se mencionó anteriormente, los perfiles transversales de velocidades de flujo presentan fluctuaciones debidas al ruido Doppler y a la presencia de perturbaciones turbulentas. Por esto es que se realizó un post-procesamiento de la información registrada con el ADCP utilizando el programa VMT (ver sección 2.4.2). Este post-procesamiento consistió en “promediar” las secciones, o sea, obtener una sección única a partir de varias transectas realizadas sobre dicha sección. Entonces, al obtener un promedio de cierto número de transectas espaciadas en el tiempo, se llega a una valoración más precisa sobre las verdaderas condiciones del flujo en dicha sección. Dichas secciones promediadas son las que se expusieron en el Capítulo 3.

Más allá de la justificación teórica sobre la necesidad de “promediar” las secciones, se procede aquí a exponer gráficamente las ventajas que se obtienen con el empleo de VMT para este post-procesamiento. La diferencia al visualizar los datos de una transecta por separado, o bien, el promedio de todas las transectas de la sección, se indica en las Figuras 4.1 y 4.2.

Puede verse, además, que la mejora es mayor en el caso de las velocidades que en las profundidades, ya que en las primeras influyen los procesos de turbulencia y ruido Doppler, lo que aumenta la dispersión en los datos relevados por el ADCP. En cuanto al perfil del fondo, el mismo presenta una mayor variabilidad en las zonas de bajas profundidades. Debido a esta mejora es que se ha decidido utilizar las secciones promediadas.

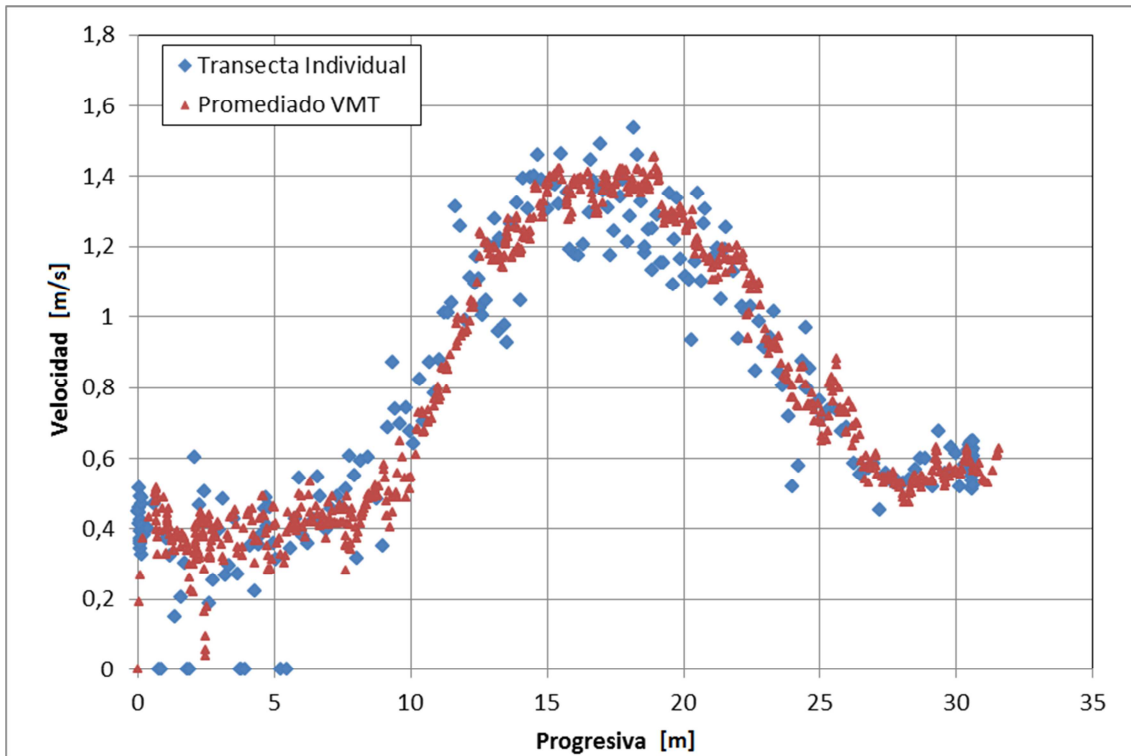


Figura 4.1. Comparación entre valores de velocidades medias en la vertical registradas en una transecta obtenida al promediar múltiples transectas (4), para sección sobre el río Tercero, campaña de medición 1, 11/06/2012.

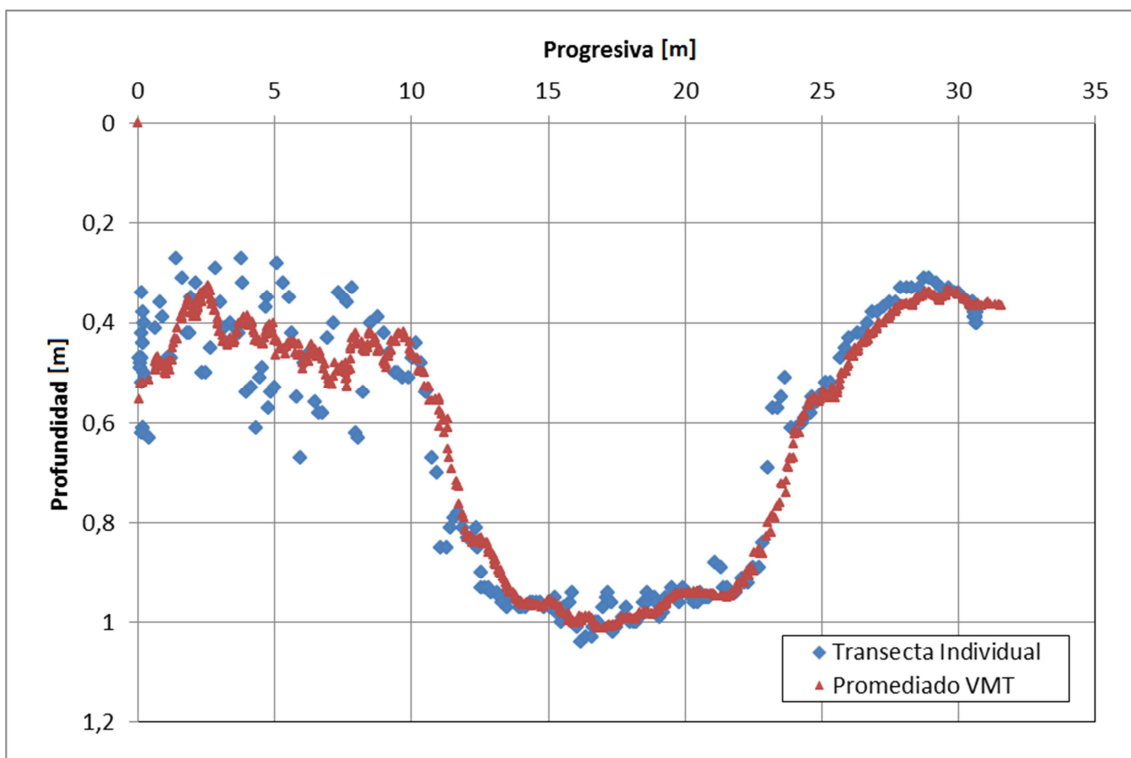


Figura 4.2. Comparación entre batimetrías registradas en una transecta obtenida al promediar múltiples transectas (4), para sección sobre el río Tercero, campaña de medición 1, 11/06/2012.

#### 4.3.1 Resultados obtenidos sobre las secciones promediadas

Luego de promediadas las secciones y de obtenidos los principales parámetros que las caracterizan, puede entonces aplicarse la ecuación integral propuesta por Fischer (1979) en base a las distribuciones de velocidad y forma del fondo detalladas en las ecuaciones 1.6 y 1.7.

En la Tabla 4.2 se muestran los resultados que se obtienen de aplicar dichas ecuaciones sobre cada una de las secciones en base a lo expresado anteriormente, y en las Figuras 4.3 a 4.14 se muestran los ajustes realizados, en donde los puntos de color azul se corresponden con los valores observados y la línea de color rojo representa la función de interpolación.

**Tabla 4.2. Estimación del coeficiente de dispersión longitudinal en base a la ecuación integral de Fischer (1979).**

Fecha	Sección	D [m <sup>2</sup> /s]	Q [m <sup>3</sup> ]	$\alpha$	$\rho$
11/06/2012	Río Tercero	43,85	18,22	1,821	1,455
10/09/2012	Río Tercero	1,28	18,22	1,112	1,582
12/11/2012	Río Tercero	11,30	18,51	1,457	2,072
11/06/2013	Río Saladillo	0,38	14,80	1,180	1,212
11/09/2013	Río Saladillo	0,19	9,16	1,172	1,404
30/09/2013	Río Carcarañá (Carcarañá)	24,58	32,08	2,244	3,070
30/09/2013	Río Carcarañá (Cruz Alta)	30,83	33,39	2,022	1,192
30/09/2013	Río Saladillo	0,99	13,96	1,288	1,087
19/11/2013	Río Saladillo	0,20	14,75	1,149	1,898
19/11/2013	Río Carcarañá (Carcarañá)	11,70	72,97	1,411	10,745
19/11/2013	Río Carcarañá (Inrville)	28,02	28,12	1,457	14,837
20/11/2013	Arroyo Tortugas	1,68	24,22	1,519	5,061

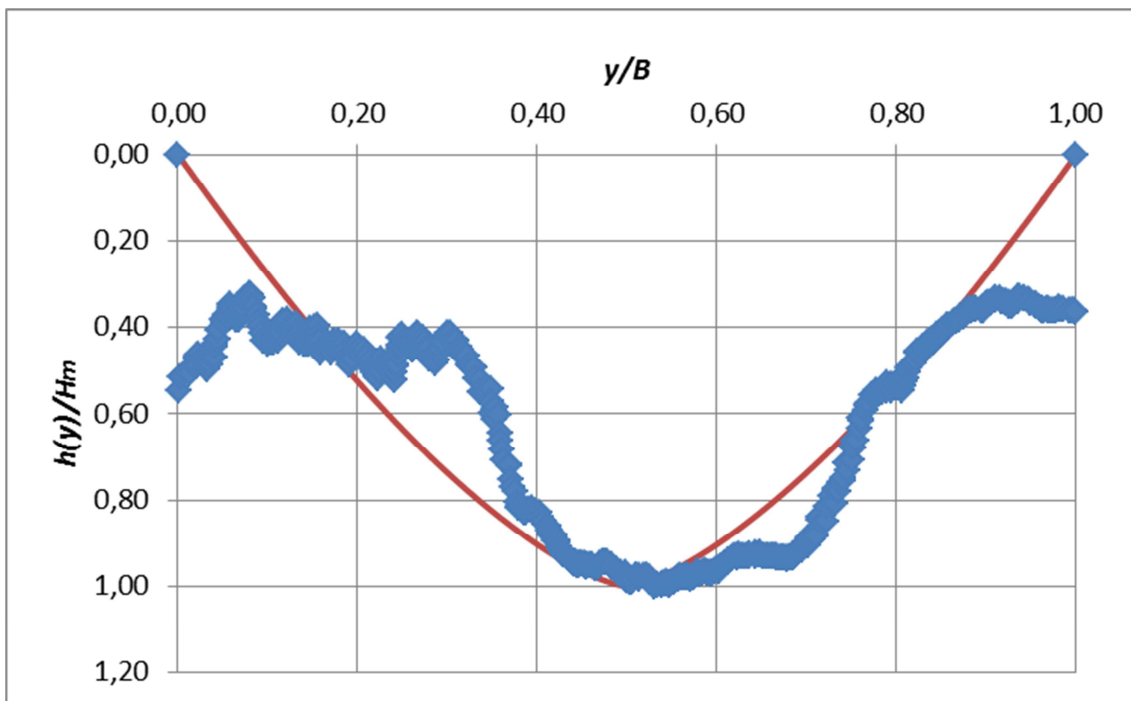
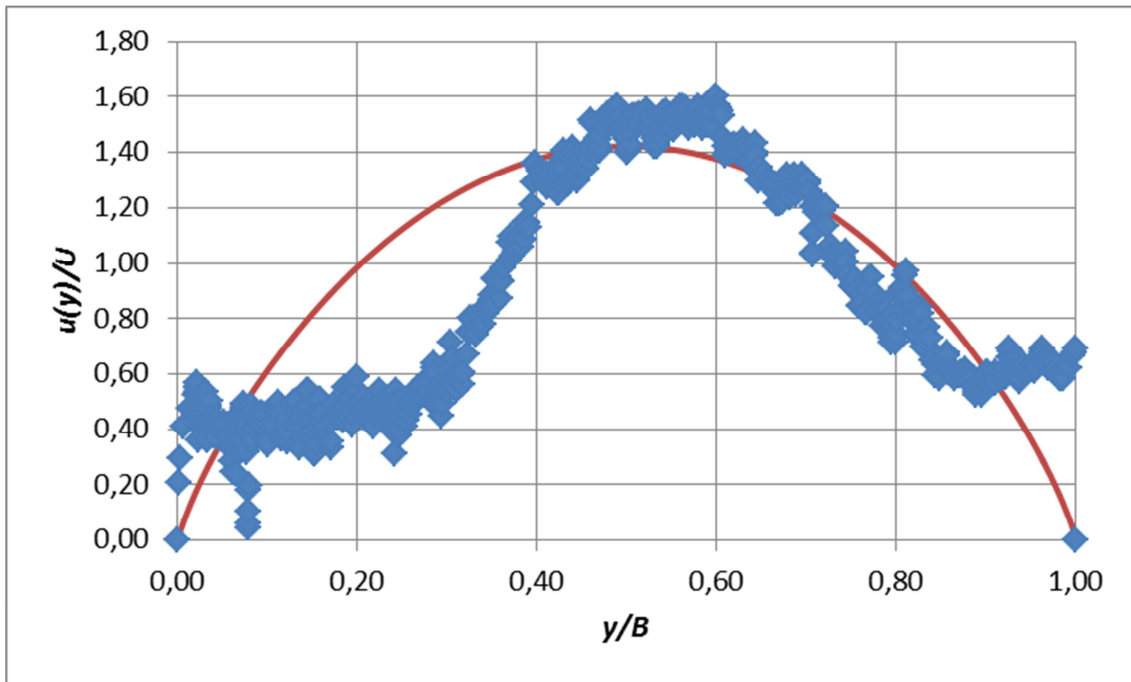


Figura 4.3. Ajuste de perfil de velocidades con  $\alpha = 1,821$  y perfil de fondo con  $\rho = 1,455$  para río Tercero, 11/06/2012.

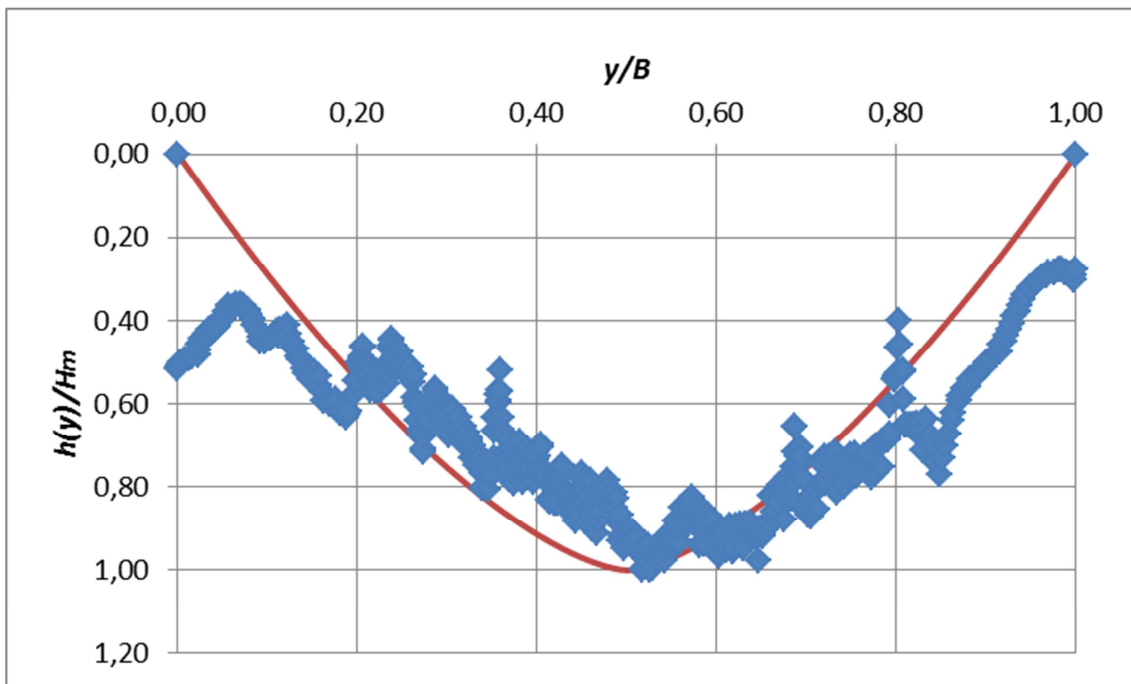
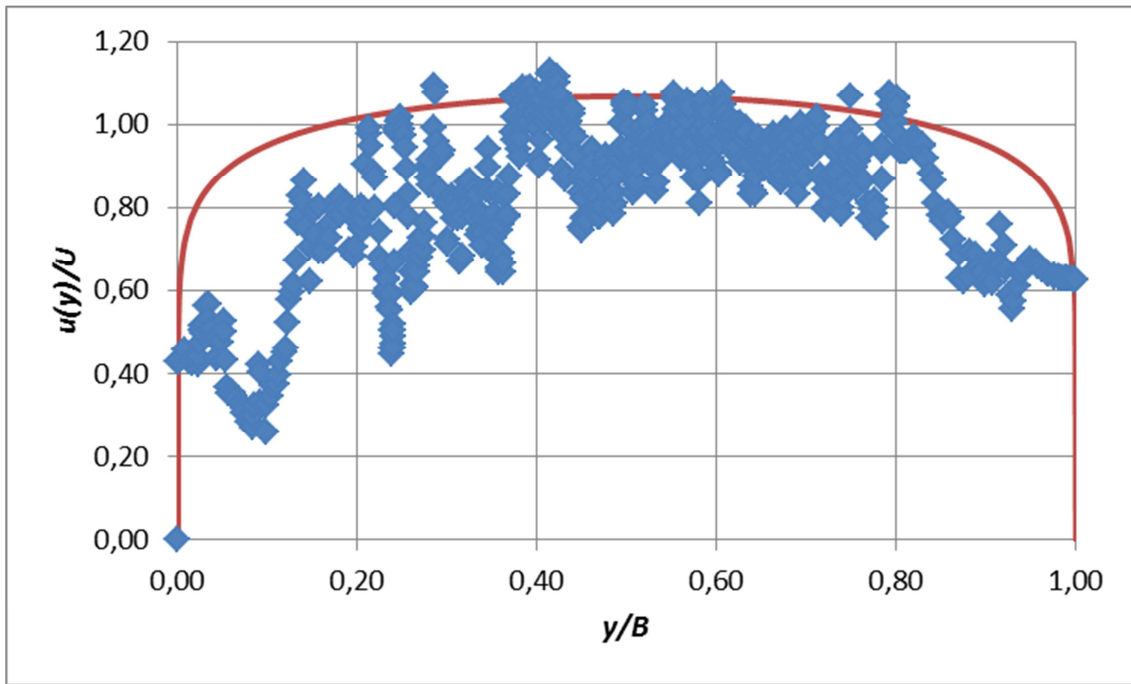


Figura 4.4. Ajuste de perfil de velocidades con  $\alpha = 1,112$  y perfil de fondo con  $\rho = 1,582$  para río Tercero, 10/09/2012.



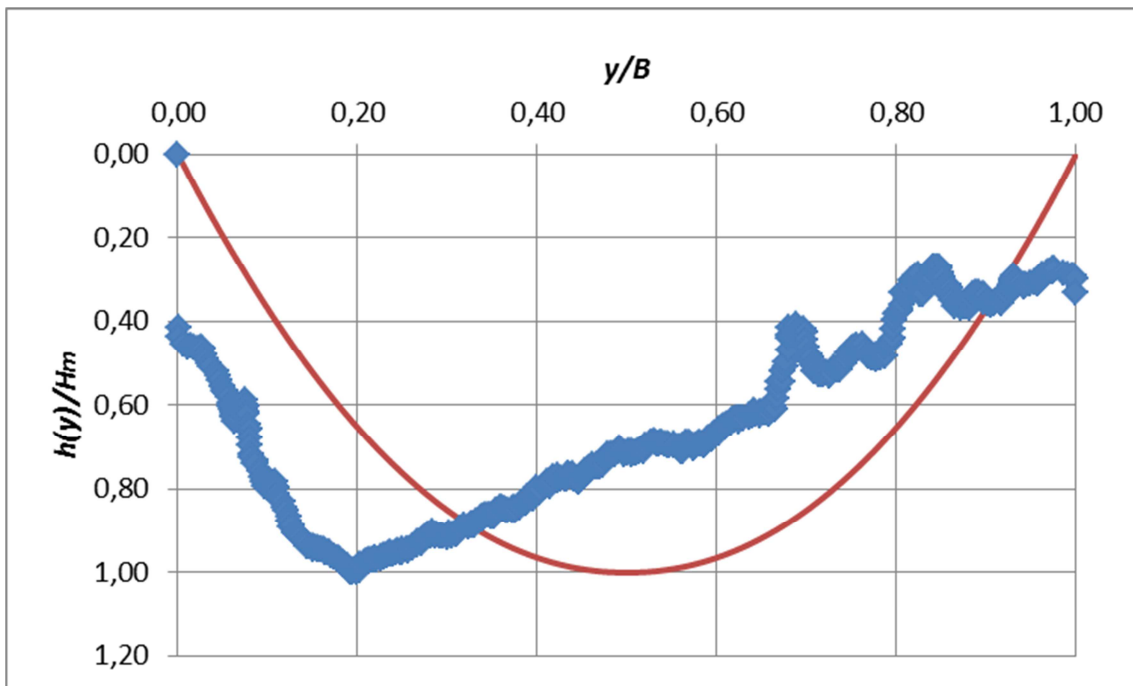
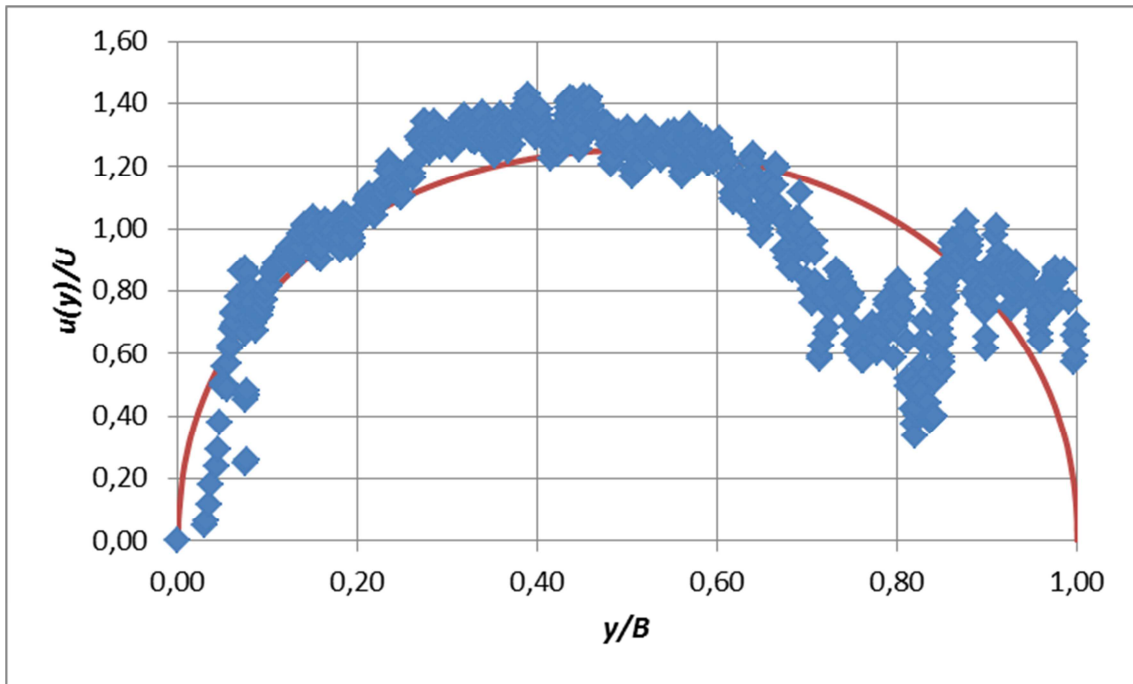


Figura 4.5. Ajuste de perfil de velocidades con  $\alpha = 1,457$  y perfil de fondo con  $\rho = 2,072$  para río Tercero, 12/11/2012.

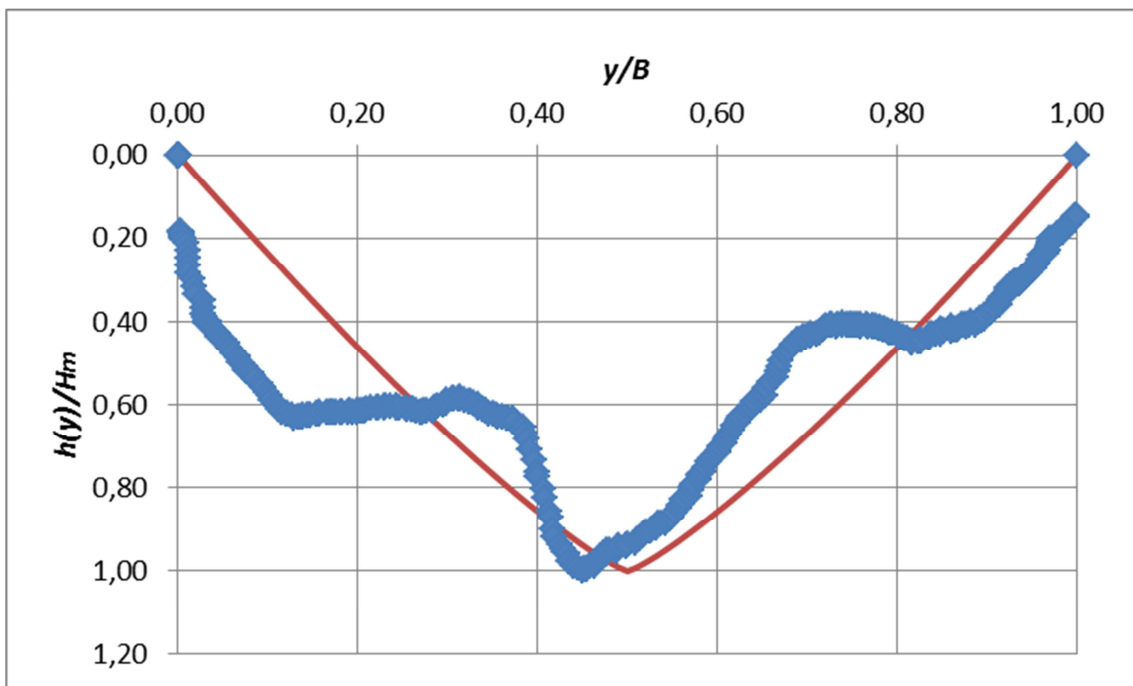
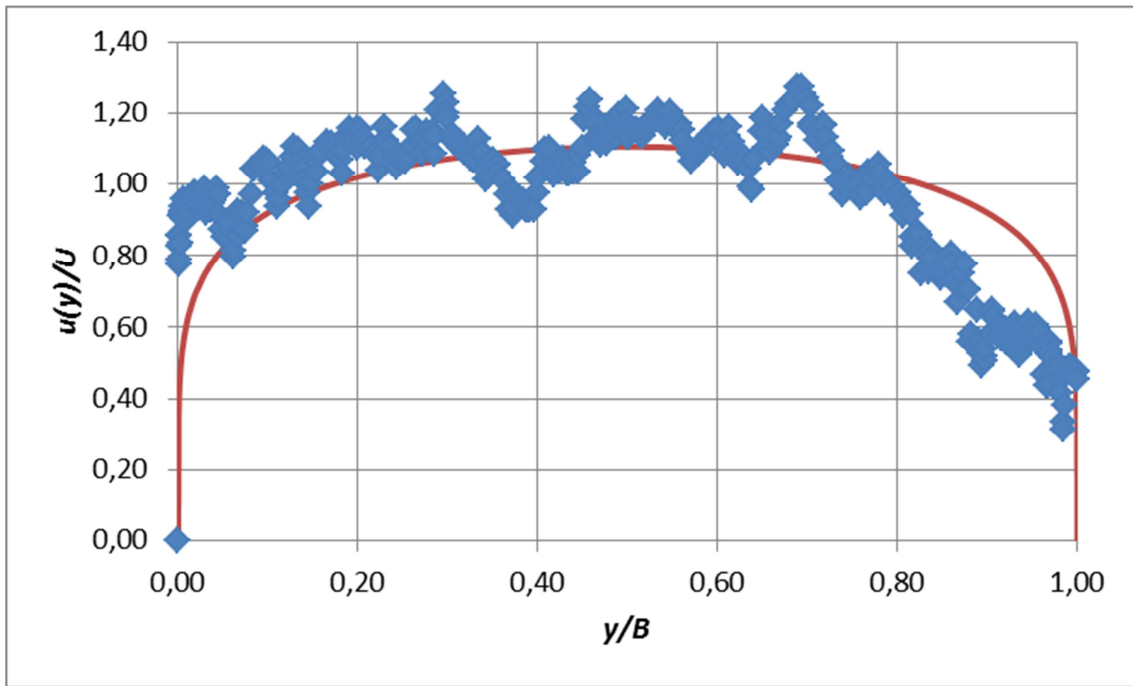


Figura 4.6. Ajuste de perfil de velocidades con  $\alpha = 1,180$  y perfil de fondo con  $\rho = 1,212$  para río Saladillo, 11/06/2013.

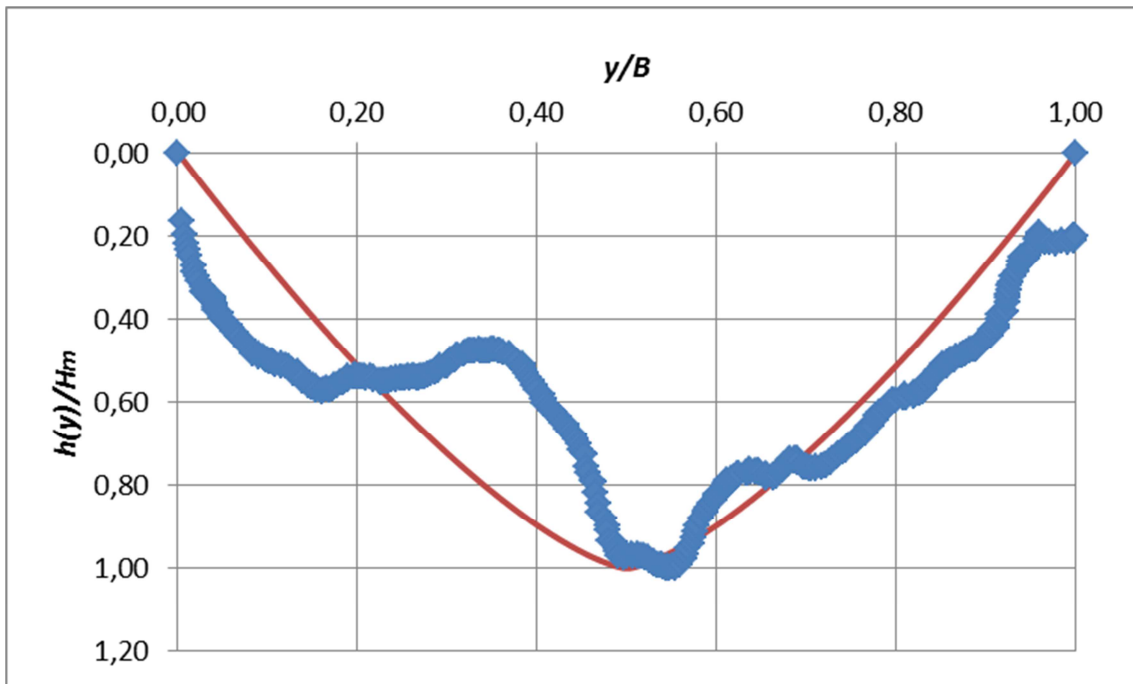
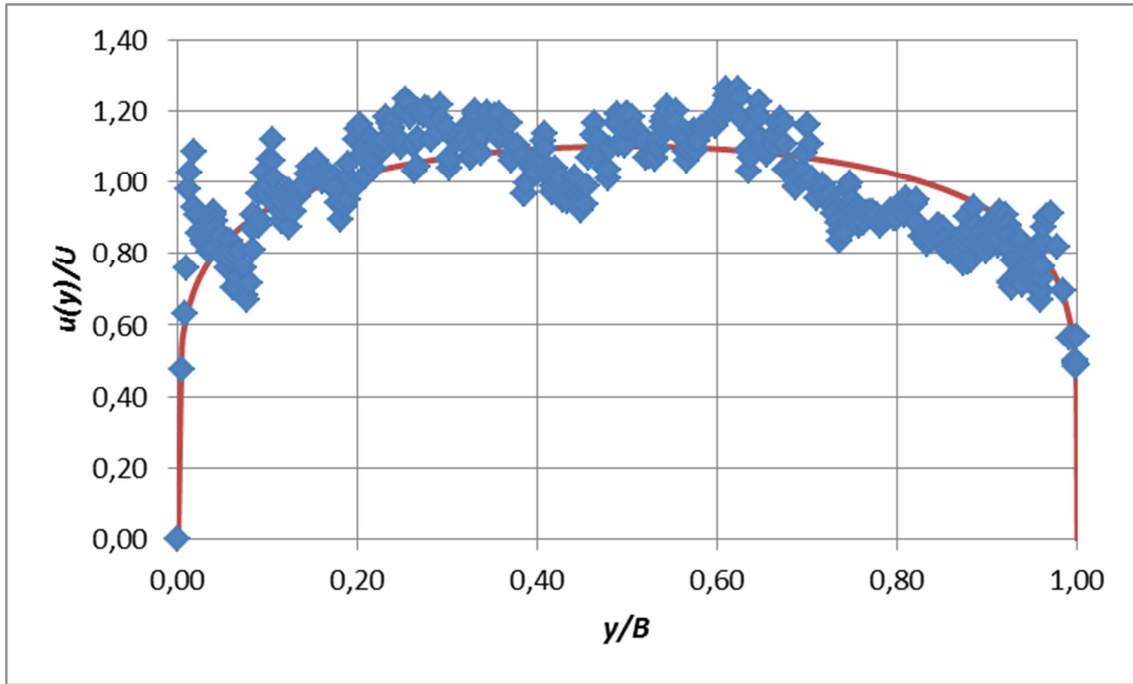


Figura 4.7. Ajuste de perfil de velocidades con  $\alpha = 1,172$  y perfil de fondo con  $\rho = 1,404$  para río Saladillo, 11/09/2013.

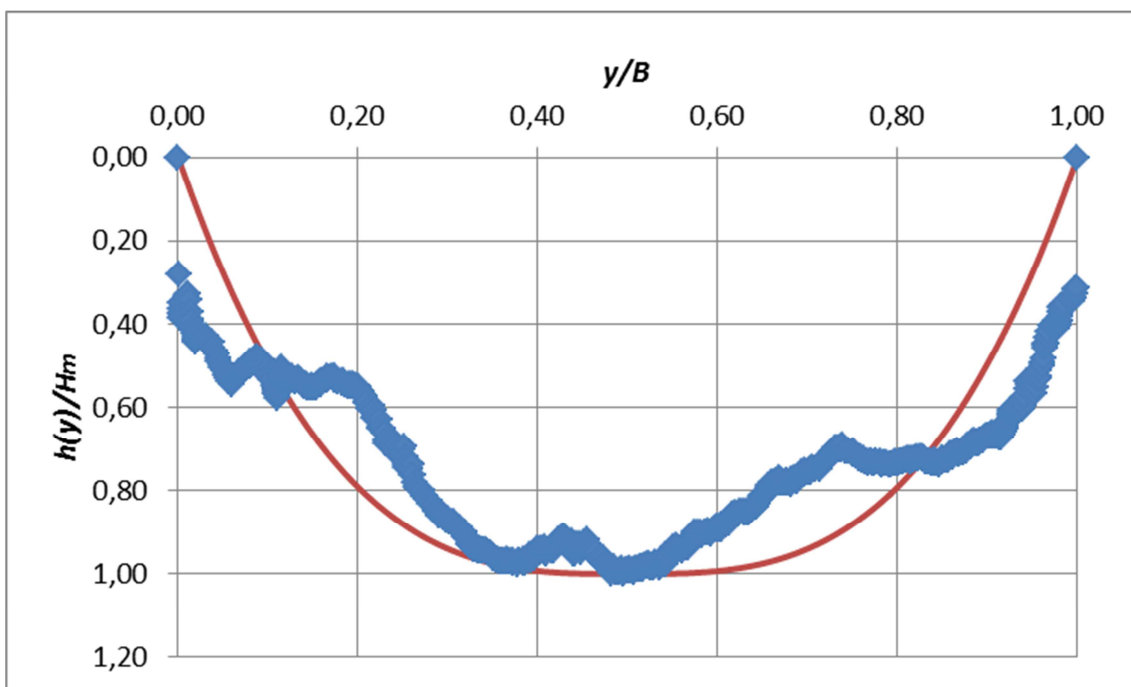
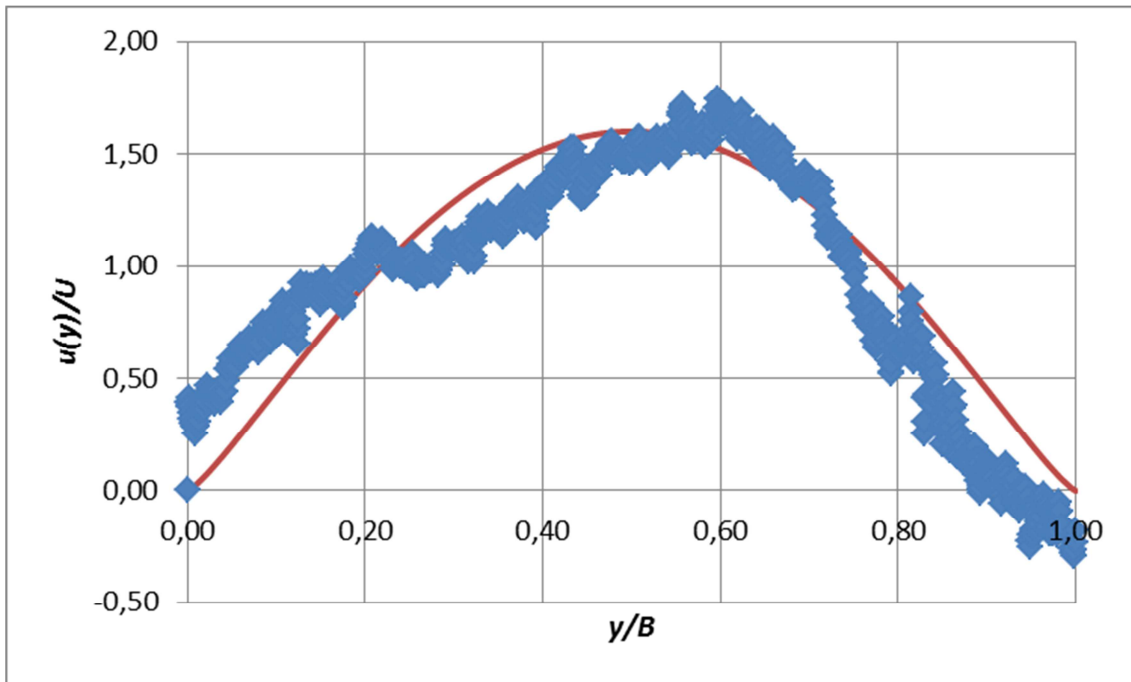


Figura 4.8. Ajuste de perfil de velocidades con  $\alpha = 2,244$  y perfil de fondo con  $\rho = 3,070$  para río Carcarañá (Carcarañá), 30/09/2013.

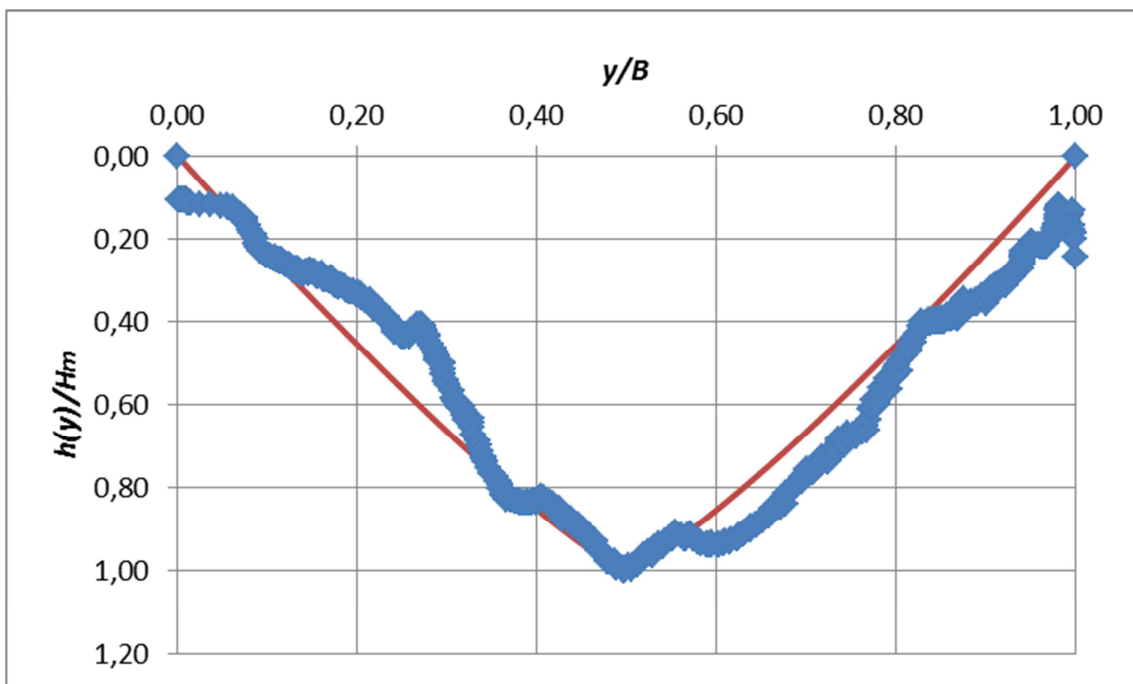
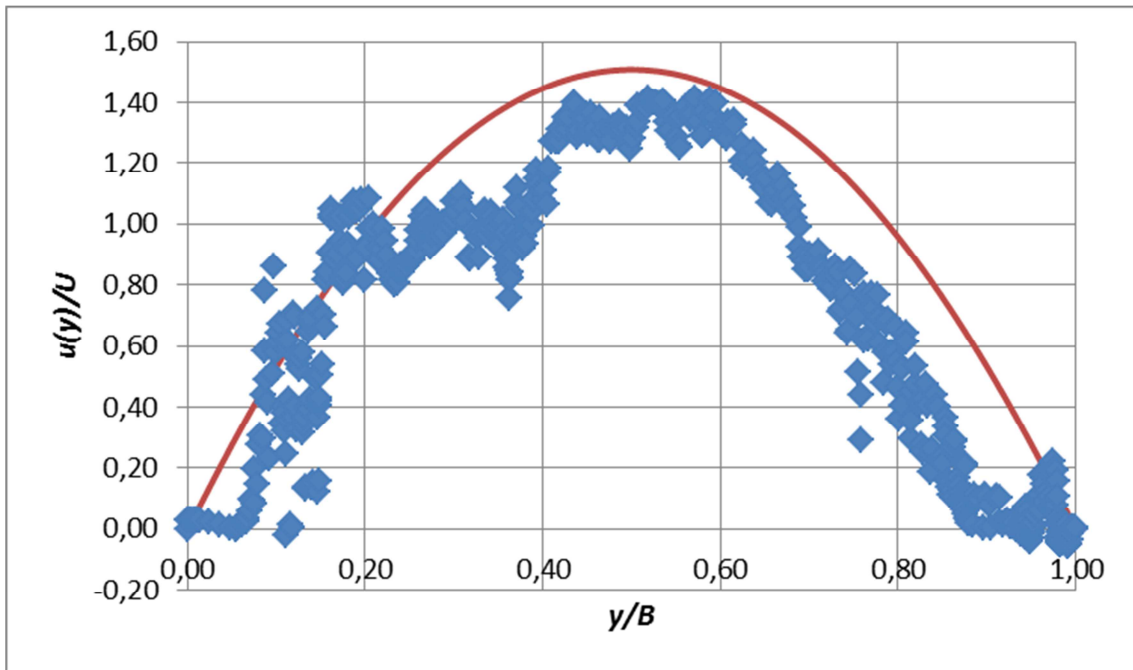


Figura 4.9. Ajuste de perfil de velocidades con  $\alpha = 2,022$  y perfil de fondo con  $\rho = 1,192$  para río Carcarañá (Cruz Alta), 30/09/2013.

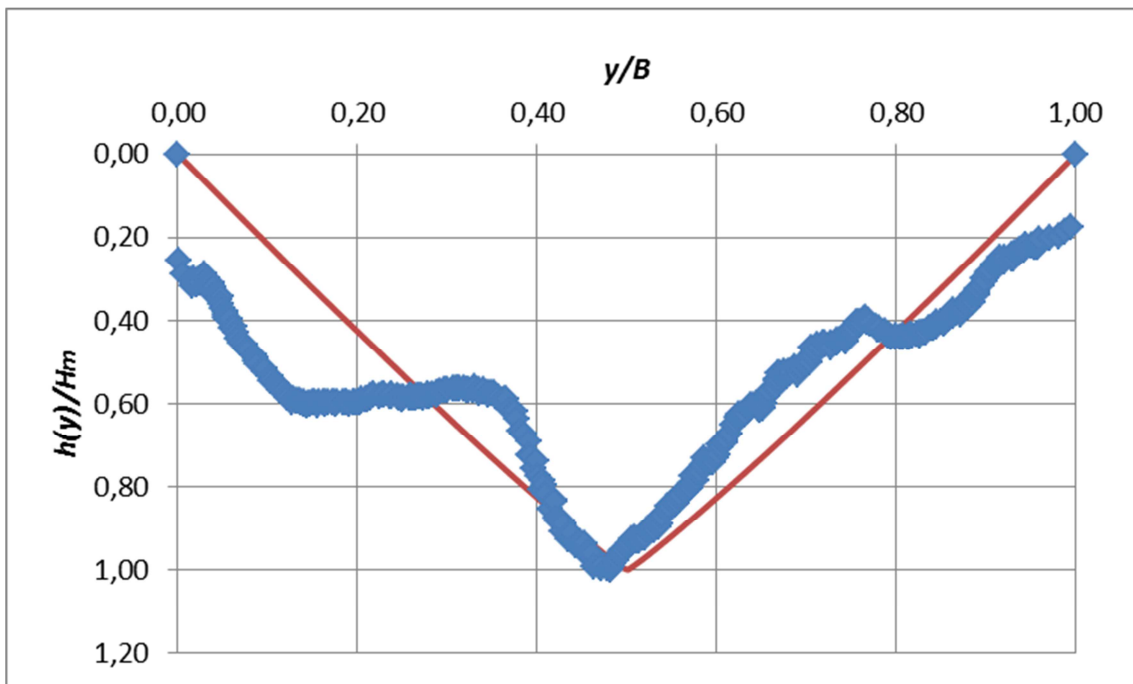
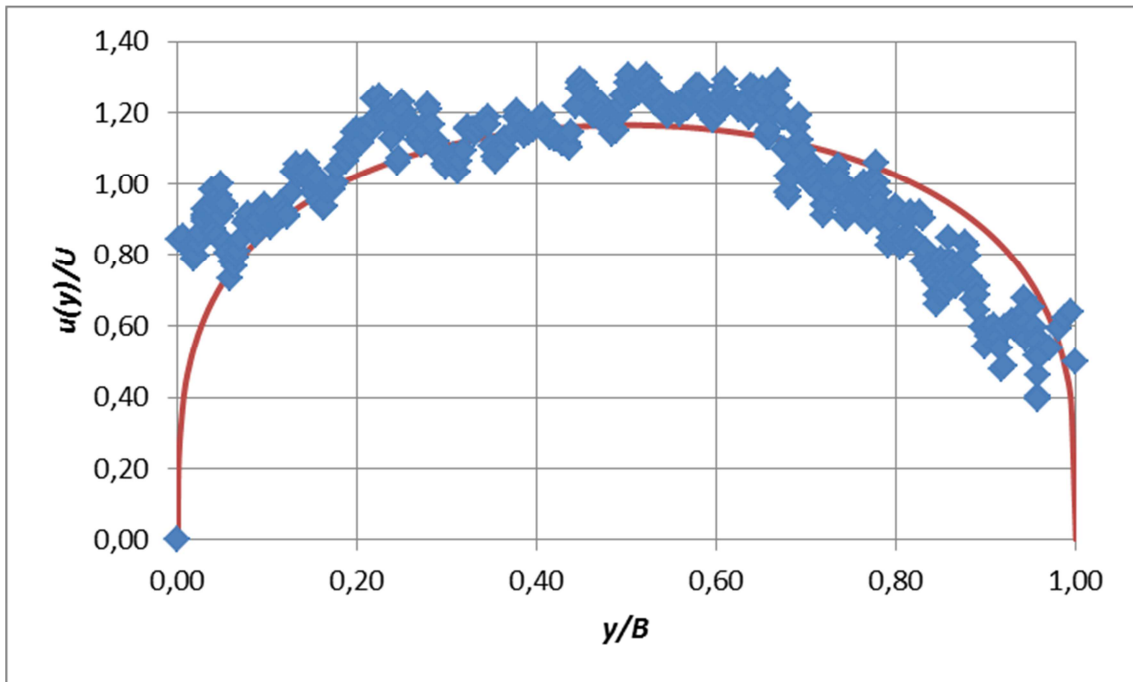


Figura 4.10. Ajuste de perfil de velocidades con  $\alpha = 1,288$  y perfil de fondo con  $\rho = 1,087$  para río Saladillo, 30/09/2013.

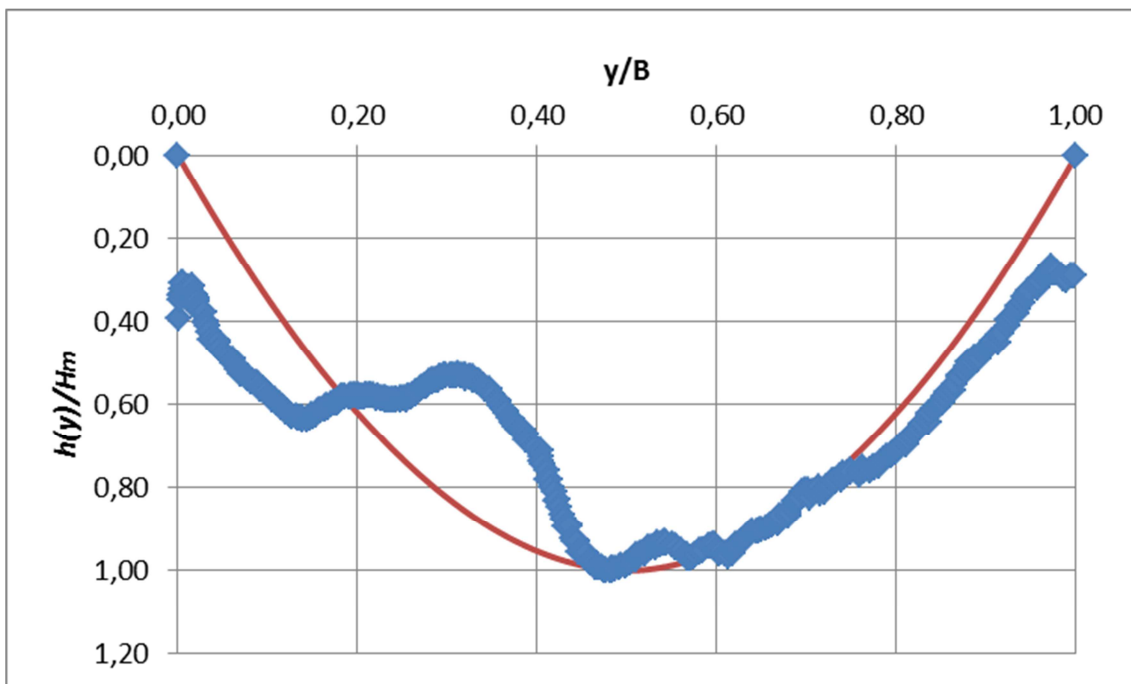
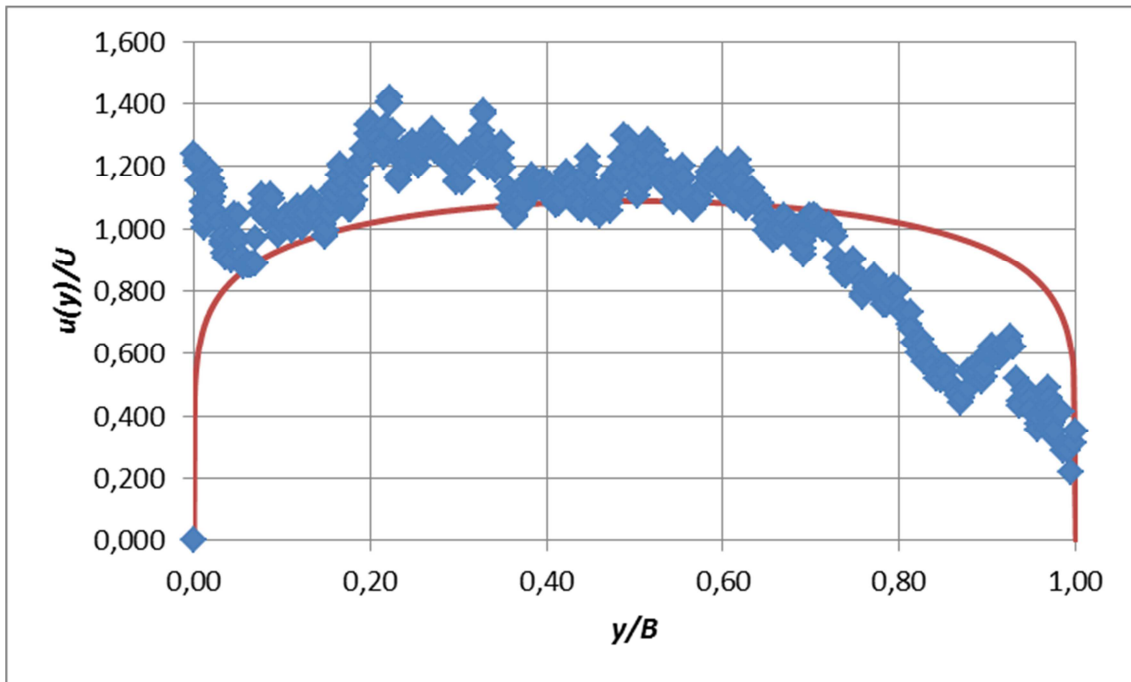


Figura 4.11. Ajuste de perfil de velocidades con  $\alpha = 1,149$  y perfil de fondo con  $\rho = 1,898$  para río Saladillo, 19/11/2013.

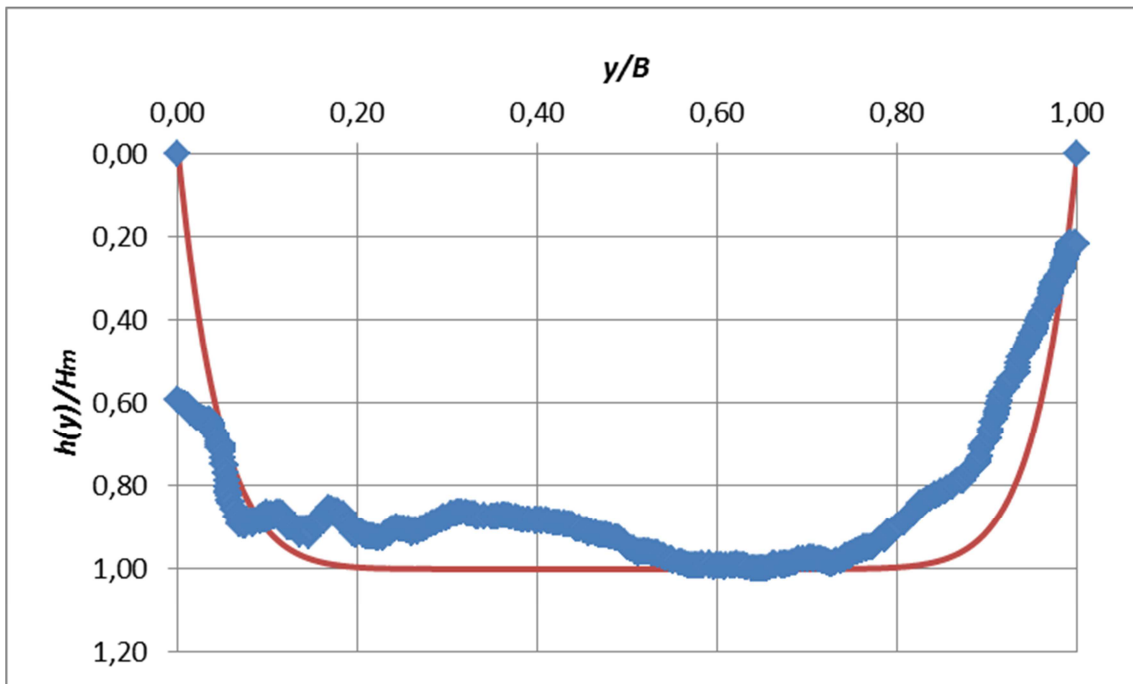
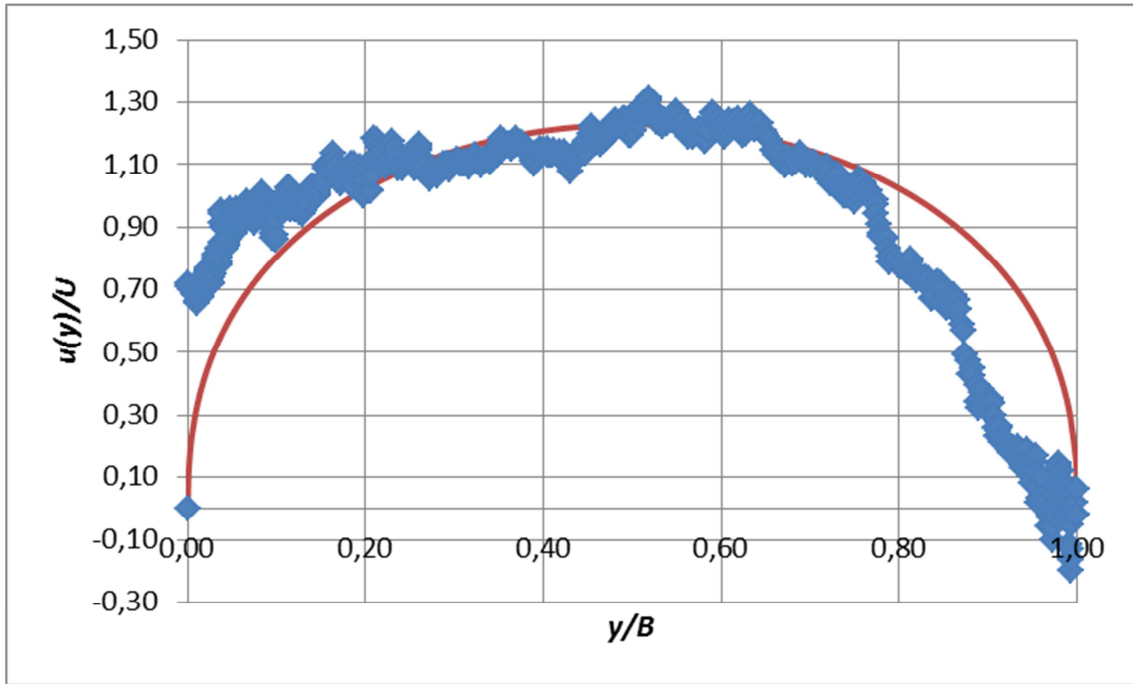


Figura 4.12. Ajuste de perfil de velocidades con  $\alpha = 1,411$  y perfil de fondo con  $\rho = 10,745$  para río Carcarañá (Carcarañá), 19/11/2013.



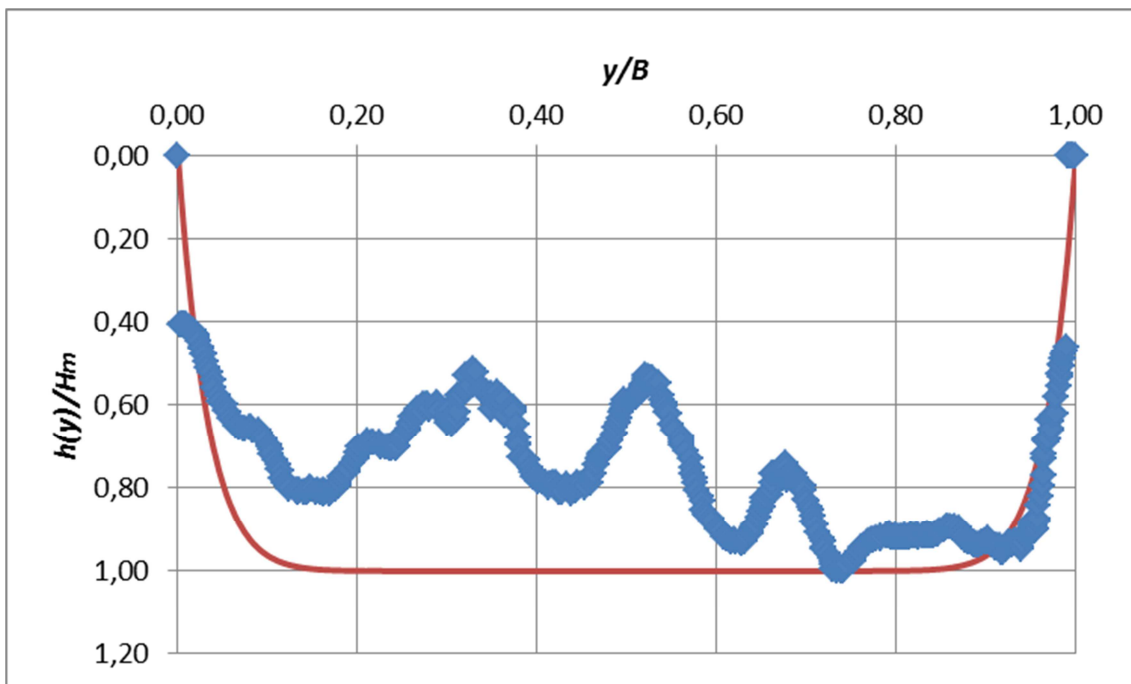
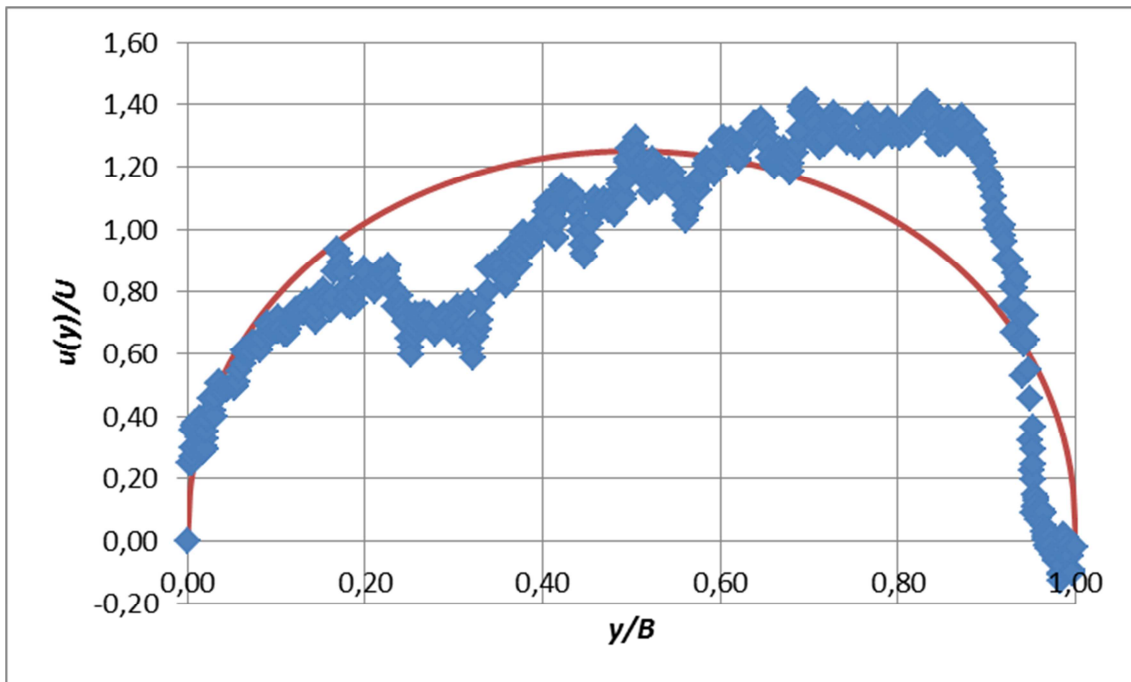
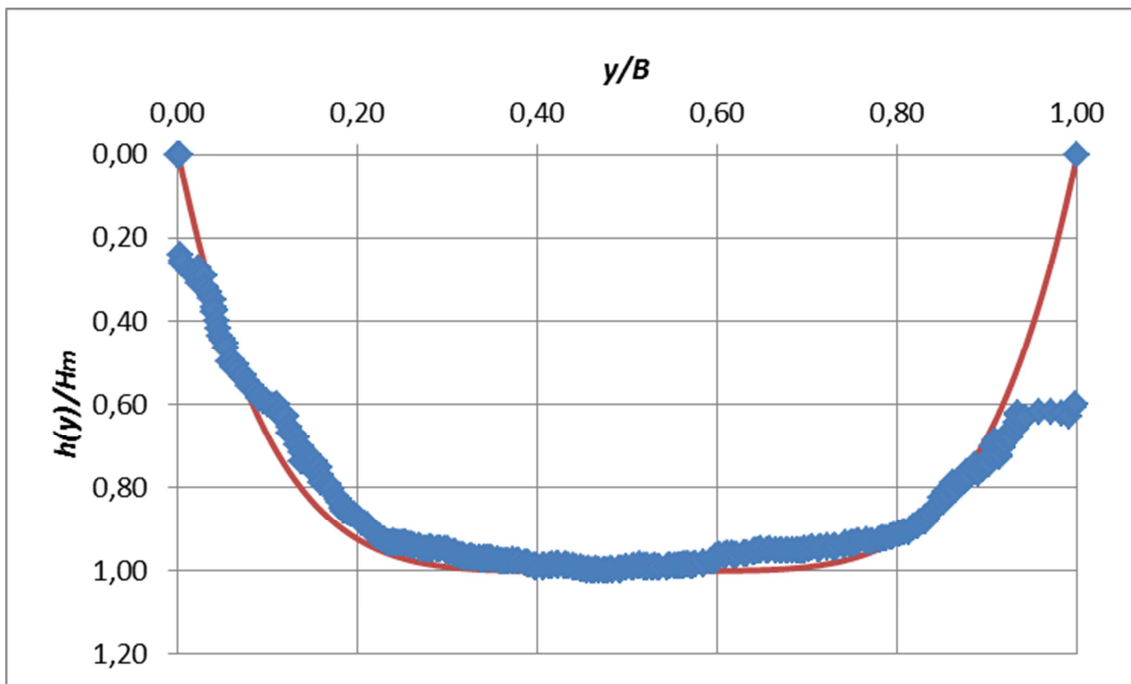
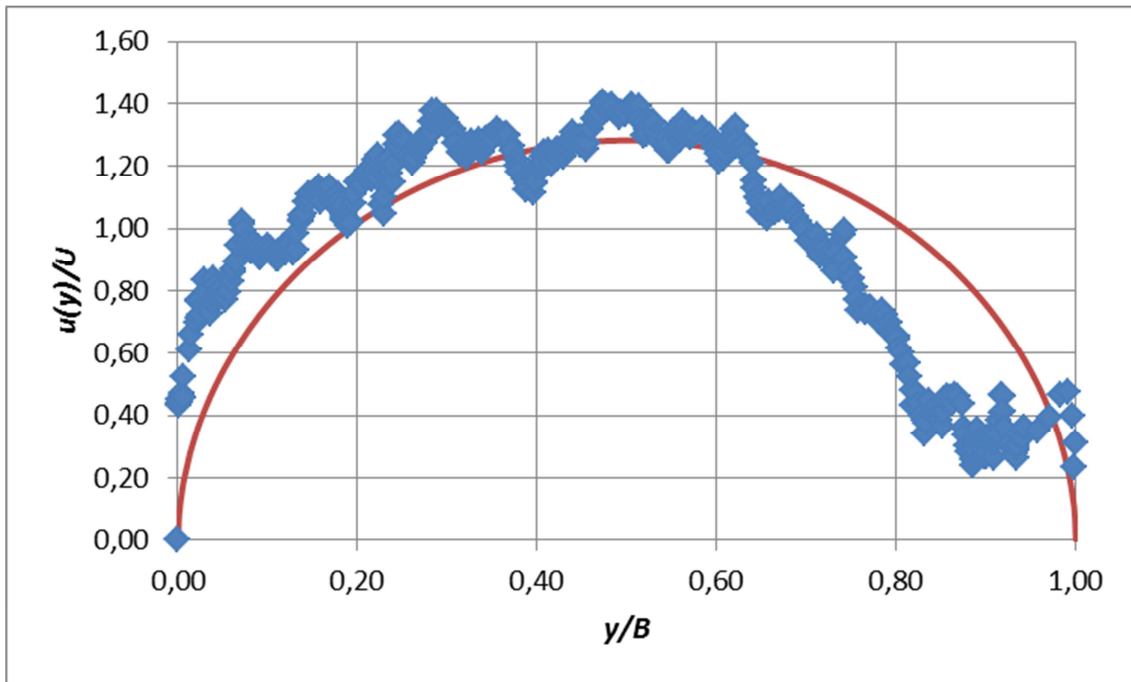


Figura 4.13. Ajuste de perfil de velocidades con  $\alpha = 1,457$  y perfil de fondo con  $\rho = 14,837$  para río Carcarañá (Inriville), 19/11/2013.



**Figura 4.14. Ajuste de perfil de velocidades con  $\alpha = 1,519$  y perfil de fondo con  $\rho = 5,061$  para arroyo Tortugas, 20/11/2013.**

Una vez obtenidos todos los resultados, pueden realizarse distintos ábacos que relacionen los parámetros que intervienen en las ecuaciones ( $\alpha$  y  $\rho$ ) con el coeficiente de dispersión longitudinal, de tal forma que, al ser calibrados y validados dichos parámetros en cada sitio, se pueda estimar el coeficiente de dispersión longitudinal sin recurrir a costosas o complicadas técnicas de medición y análisis, tal cual se propone en los objetivos de este trabajo. Uno de esos ábacos puede visualizarse en la Figura

4.15, con el cual puede obtenerse el coeficiente de dispersión longitudinal  $D$  si se conocen  $\alpha$  y  $\rho$  (cabe aclarar que debe generarse un ábaco para cada valor de caudal).

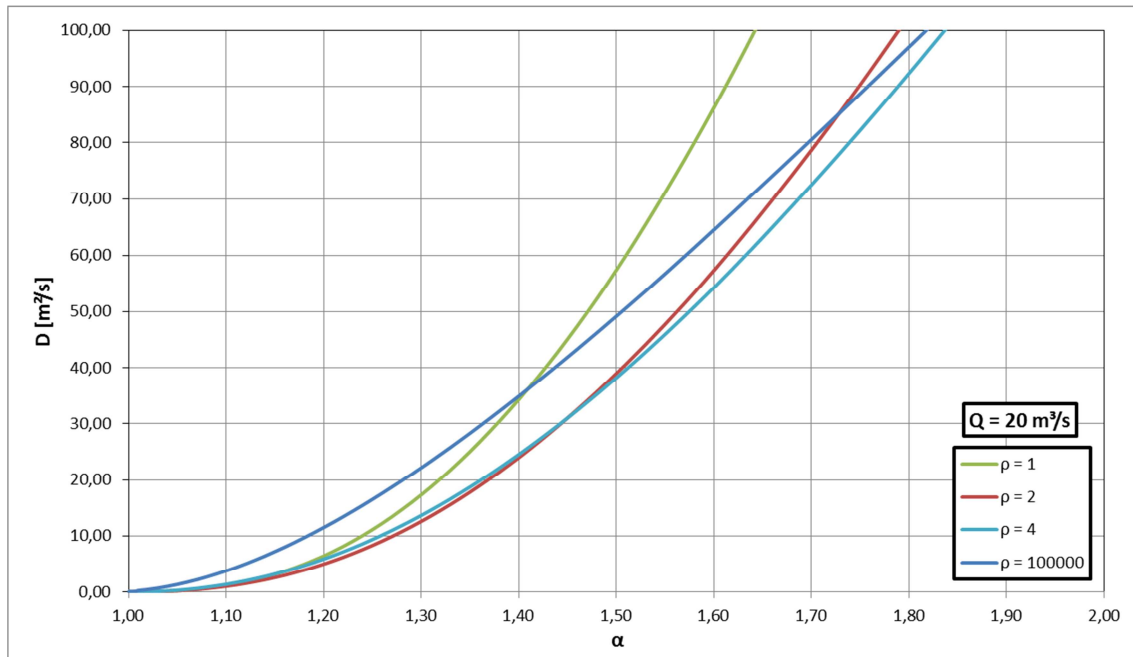


Figura 4.15. Ábaco para el cálculo del coeficiente de dispersión longitudinal en base a  $\alpha$  y  $\rho$ , para  $Q = 20 \text{ m}^3/\text{s}$ .

#### 4.3.2 Resultados obtenidos sobre las secciones promediadas con una mejor aproximación

Más allá de que en la metodología propuesta al inicio de este trabajo se decidió trabajar con una función de velocidades en base a un parámetro  $\alpha$  y una función de fondo en base a un parámetro  $\rho$ , se ve en las imágenes anteriores que algunas veces las aproximaciones con estas funciones no son del todo satisfactorias.

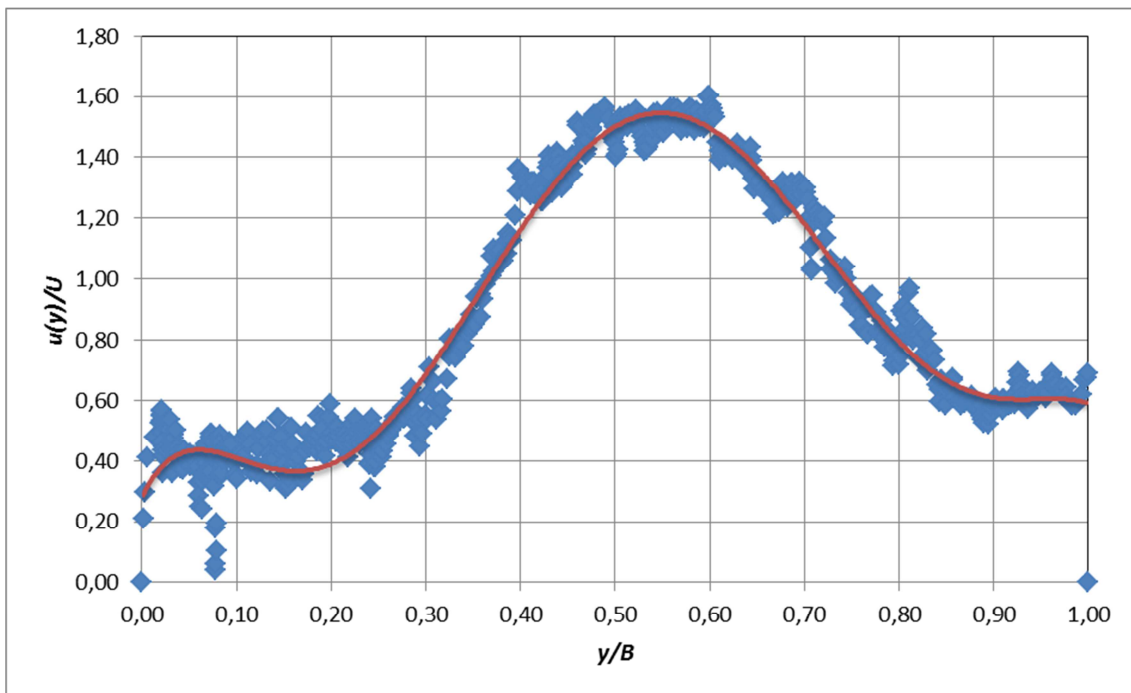
Estas funciones dependen cada una de un solo parámetro, por lo que en aquellos casos en donde el perfil de velocidades o bien la forma del fondo adoptan cierta complejidad, es necesario buscar un mejor ajuste con otras aproximaciones. Básicamente, esto se puede hacer utilizando funciones polinómicas de mayor grado para poder representar los cambios bruscos de los perfiles, o bien se puede, en el caso de las velocidades, permitir que el perfil sea asimétrico, liberando un grado de libertad al considerar que  $\alpha$  es distinto de  $\beta$ .

En la Tabla 4.3 se presentan los resultados del cálculo del coeficiente de dispersión longitudinal con un mejor ajuste que las ecuaciones de velocidad y fondo propuestas en el Capítulo 1, de tal forma de ver cuánto difieren las aproximaciones hechas con estas funciones que representan de forma más precisa dichos perfiles.

No se entra en detalle de las funciones de interpolación utilizadas en cada caso porque exceden el alcance de este trabajo. Las mismas son funciones polinómicas o bien distribuciones de velocidad con  $\alpha \neq \beta$  que buscan adaptarse a los perfiles de fondo y velocidad de una manera más precisa. Sin embargo, se muestran en las imágenes siguientes algunos de los ajustes realizados para aquellas secciones en las que las funciones de interpolación propuestas para campo de velocidades y fondo (ecuaciones 1.6 y 1.7) resultaron más deficientes.

**Tabla 4.3. Estimación del coeficiente de dispersión longitudinal en base a la ecuación integral propuesta por Fischer (1979) con un mejor ajuste de interpolación.**

Fecha	Sección	D [m <sup>2</sup> /s]	Q [m <sup>3</sup> ]
11/06/2012	Río Tercero	143,73	18,22
10/09/2012	Río Tercero	98,88	18,22
12/11/2012	Río Tercero	41,10	18,51
11/06/2013	Río Saladillo	2,15	14,80
11/09/2013	Río Saladillo	1,00	9,16
30/09/2013	Río Carcarañá (Carcarañá)	24,58	32,08
30/09/2013	Río Carcarañá (Cruz Alta)	30,83	33,39
30/09/2013	Río Saladillo	3,55	13,96
19/11/2013	Río Saladillo	1,06	14,75
19/11/2013	Río Carcarañá (Carcarañá)	39,37	72,97
19/11/2013	Río Carcarañá (Inrville)	95,45	28,12
20/11/2013	Arroyo Tortugas	5,64	24,22



**Figura 4.16. Ajuste de perfil de velocidades con función polinómica para río Tercero, 11/06/2012.**

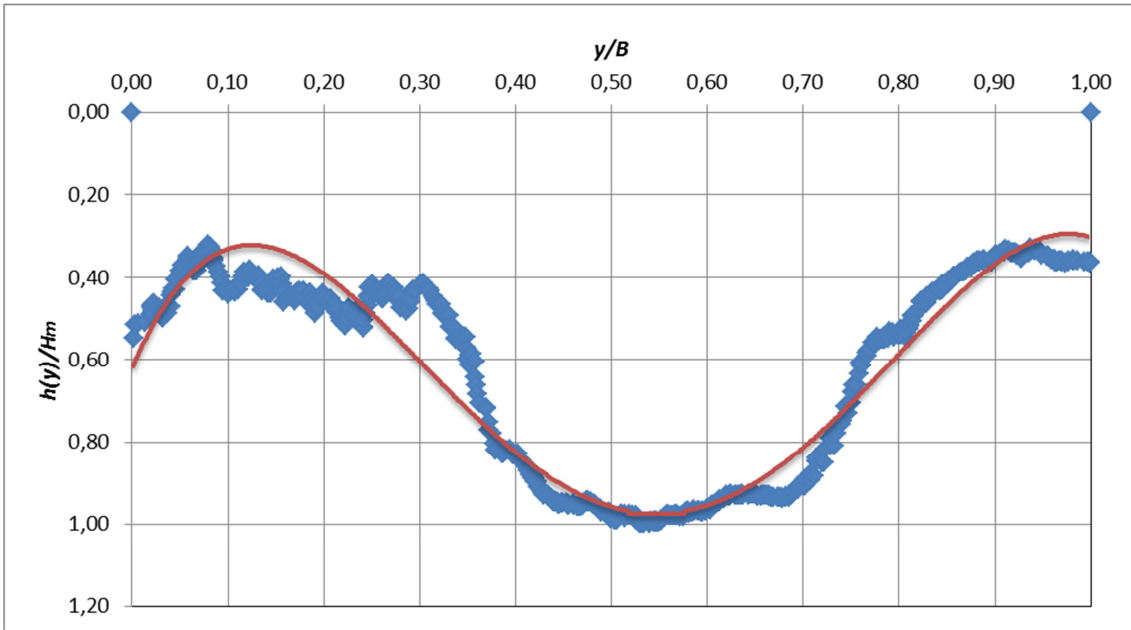


Figura 4.17. Ajuste de perfil de fondo con función polinómica para río Tercero, 11/06/2012.

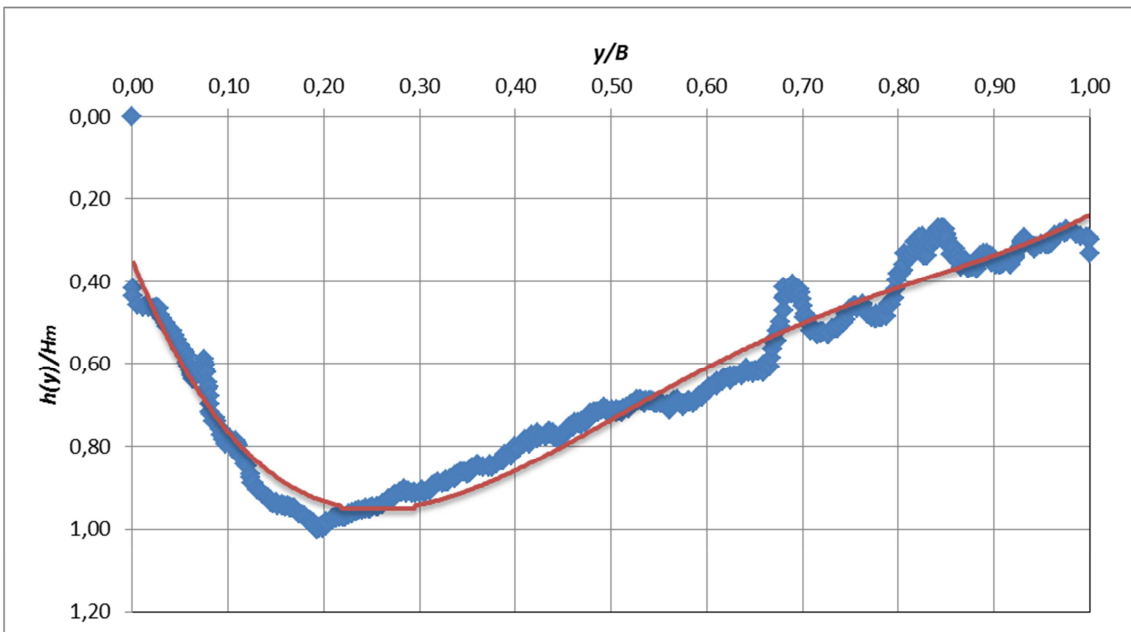


Figura 4.18. Ajuste de perfil de fondo con función polinómica para río Tercero, 12/11/2012.

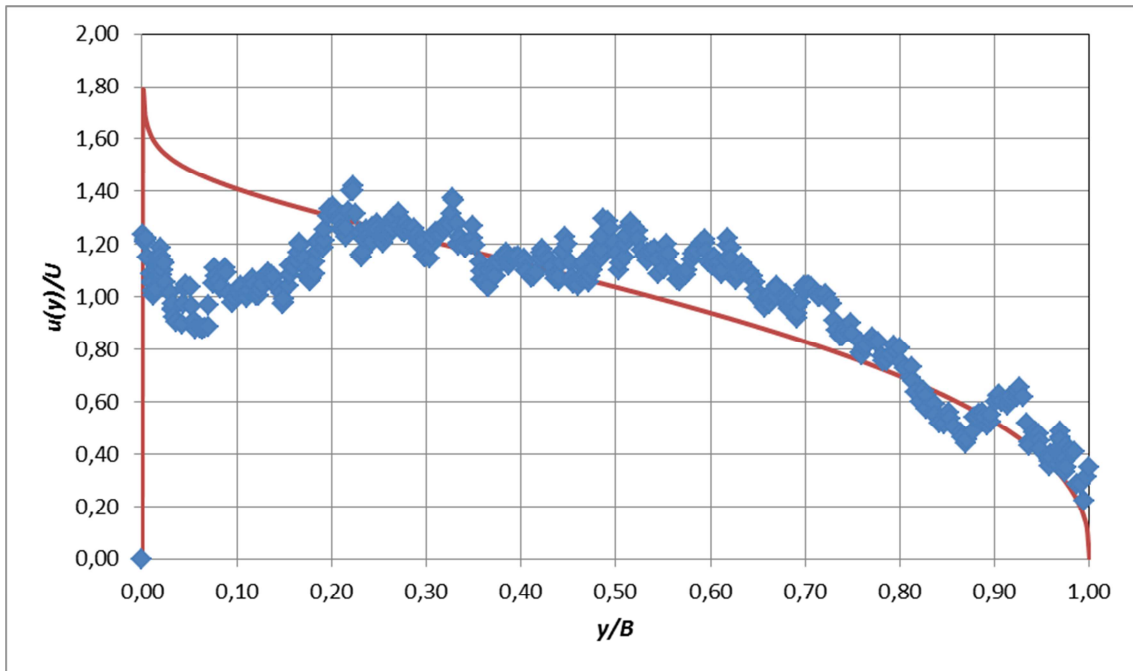


Figura 4.19. Ajuste de perfil de velocidades con  $\alpha = 0,960$  y  $\beta = 1,412$  para río Saladillo, 19/11/2013.

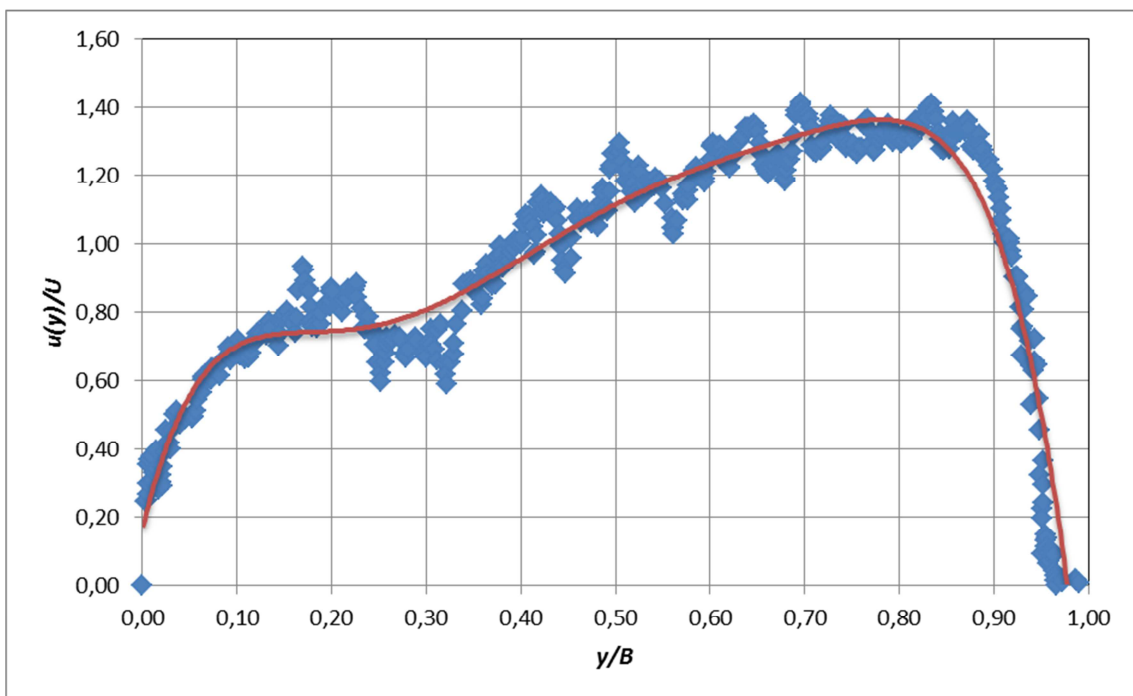


Figura 4.20. Ajuste de perfil de velocidades con función polinómica para río Carcarañá (Inrville), 19/11/2013.

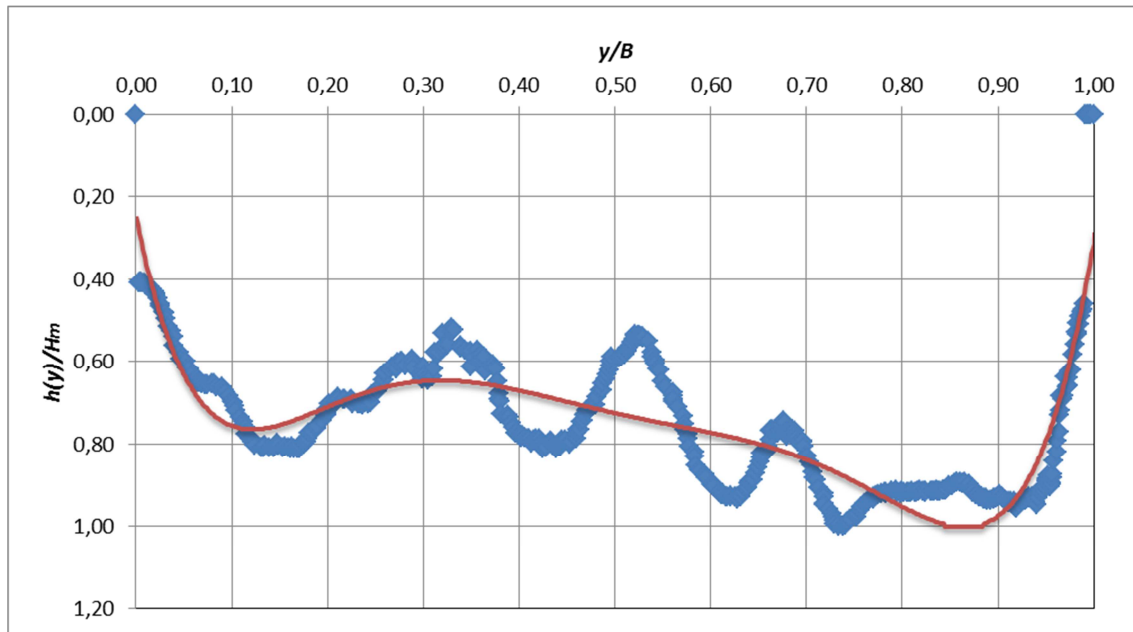


Figura 4.21. Ajuste de perfil de fondo con función polinómica para río Carcarañá (Inrville), 19/11/2013.

#### 4.4 CONTRASTE DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LAS DISTINTAS METODOLOGÍAS EN LAS SECCIONES ANALIZADAS

Tal como se mencionó al inicio de este capítulo, en primer lugar lo que se busca es conocer las diferencias entre los valores del coeficiente de dispersión longitudinal obtenidos con las ecuaciones empíricas con respecto a los obtenidos con la ecuación integral con una caracterización hidrodinámica detallada, ya sea ésta aplicada con las funciones de interpolación propuestas al inicio de este trabajo, o bien con funciones que provean un mejor ajuste para cada caso en particular. Se busca entonces analizar si los mismos difieren o no, y en caso de ser positiva la respuesta, ver en qué proporción difieren, y poder analizar si se manifiesta una tendencia entre los resultados obtenidos con estas metodologías.

El contraste de los resultados a los que se arribaron con dichas técnicas en las secciones 4.2 y 4.3 se muestra a continuación en la Tabla 4.4, en donde *EE* se refiere a “Ecuaciones Empíricas”, *ID* a “Integral Detallada”, y *MA* a la aplicación de las ecuaciones integrales con funciones que representen un “Mejor Ajuste”.

La comparación entre los resultados obtenidos en base a las ecuaciones empíricas y al empleo de la integral con caracterización hidrodinámica detallada puede verse gráficamente en la Figura 4.22. La línea roja se corresponde con valores iguales del coeficiente de dispersión para ambas metodologías.



Tabla 4.4. Comparación de los valores obtenidos con las metodologías empleadas.

Fecha	Sección	Q [m <sup>3</sup> /s]	D (EE) [m <sup>2</sup> /s]	D (ID) [m <sup>2</sup> /s]	D (MA) [m <sup>2</sup> /s]
11/06/2012	Río Tercero	18,22	165,79	43,85	143,73
10/09/2012	Río Tercero	18,22	353,84	1,28	98,88
12/11/2012	Río Tercero	18,51	135,11	11,30	41,10
11/06/2013	Río Saladillo	14,80	51,41	0,38	2,15
11/09/2013	Río Saladillo	9,16	25,79	0,19	1,00
30/09/2013	Río Carcarañá (Carcarañá)	32,08	37,22	24,58	24,58
30/09/2013	Río Carcarañá (Cruz Alta)	33,39	133,05	30,83	30,83
30/09/2013	Río Saladillo	13,96	65,00	0,99	3,55
19/11/2013	Río Saladillo	14,75	31,44	0,20	1,06
19/11/2013	Río Carcarañá (Carcarañá)	72,97	142,90	11,70	39,37
19/11/2013	Río Carcarañá (Inrville)	28,12	195,67	28,02	95,45
20/11/2013	Arroyo Tortugas	24,22	8,33	1,68	5,64

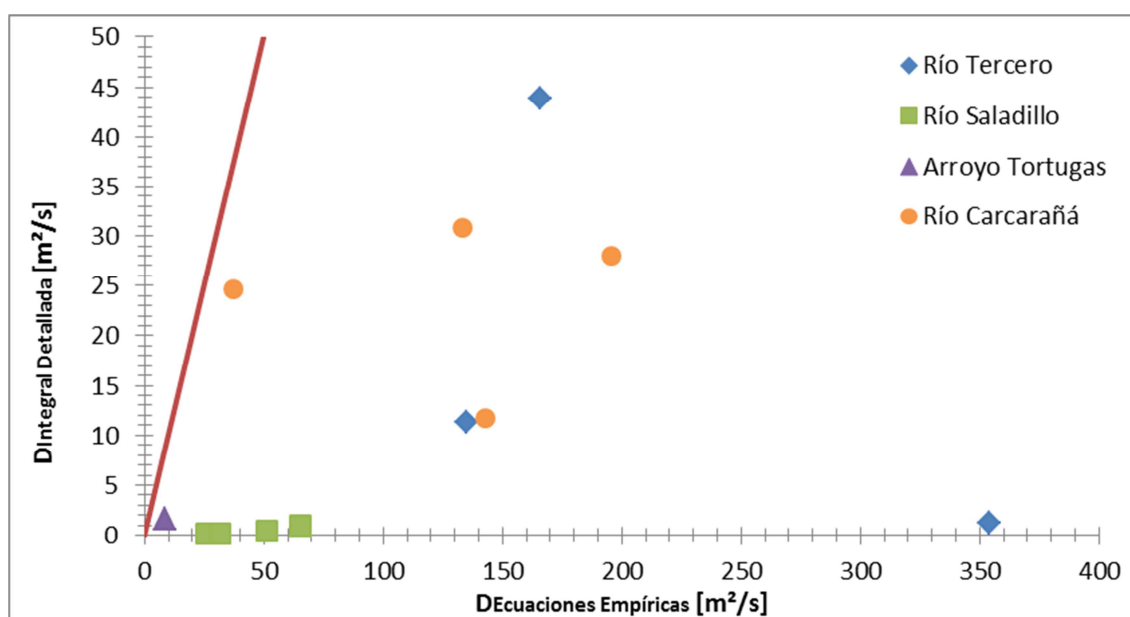
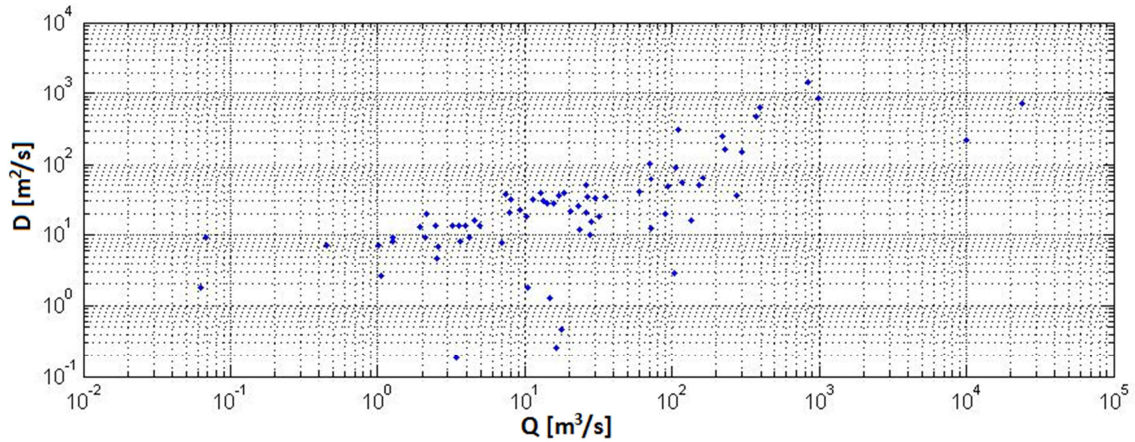


Figura 4.22. Comparación gráfica entre los valores del coeficiente de dispersión longitudinal (D [m<sup>2</sup>/s]) obtenidos con las ecuaciones empíricas y con la integral detallada.

#### 4.5 CONTRASTE DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LOS DISPONIBLES EN LA BIBLIOGRAFÍA

Más allá de haber comparado los resultados entre los métodos de análisis empleados, es de interés poder comparar dichos resultados con aquellos que se encuentran disponibles en la bibliografía, de tal forma de poder ver si se arribó a valores “esperables” del coeficiente de dispersión longitudinal.

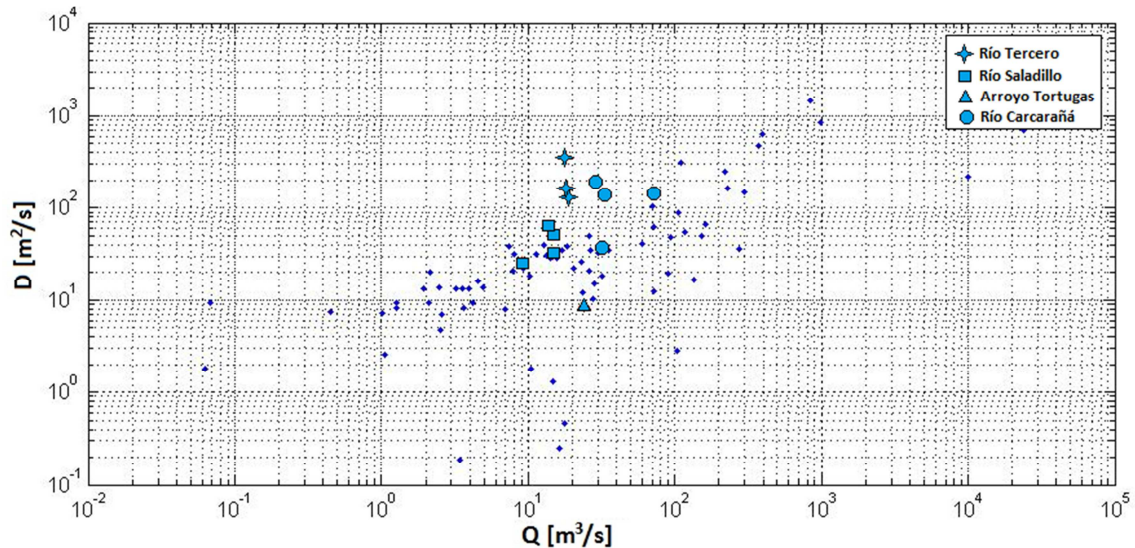
En este sentido, se tomó como referencia el gráfico publicado por Rutherford (1994), en el cual se recopilan valores del coeficiente de dispersión longitudinal de distintos ríos del mundo, y se los grafica en función del caudal de cada río (ver Figura 4.23).



**Figura 4.23. Relación entre el coeficiente de dispersión longitudinal y el caudal (Rutherford, 1994).**

Se procede a comparar cada una de las metodologías por separado, y finalmente se expone un gráfico en el que se muestren todos los resultados obtenidos en conjunto.

En primer lugar, en la Figura 4.24 vemos los valores obtenidos con las ecuaciones simplificadas ubicados dentro del gráfico de Rutherford. Se observa que el uso de las ecuaciones simplificadas sobreestima los valores disponibles en la literatura.



**Figura 4.24. Valores obtenidos con las ecuaciones empíricas y valores reportados por Rutherford (1994).**

Luego, en la Figura 4.25 se muestran aquellos valores obtenidos en base a la aplicación de la ecuación integral aplicada en la segunda metodología mencionada colocados en el mismo gráfico de Rutherford. Se ve que el uso de dicha ecuación integral con una caracterización hidrodinámica detallada da valores más cercanos a los disponibles en la literatura, todos dentro del orden de magnitud esperado.

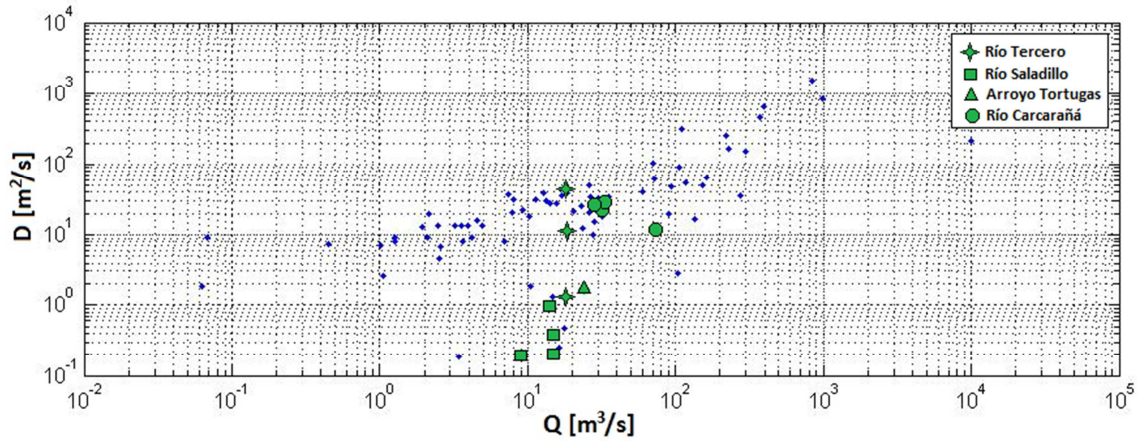


Figura 4.25. Valores obtenidos con la ecuación integral con caracterización hidrodinámica detallada y valores reportados por Rutherford (1994).

Finalmente, en la Figura 4.26 se muestran todos los valores en un mismo gráfico (considerando únicamente los obtenidos con las ecuaciones empíricas y los obtenidos con la ecuación integral teniendo en cuenta las distribuciones de velocidades y fondo expuestas en el Capítulo 1).

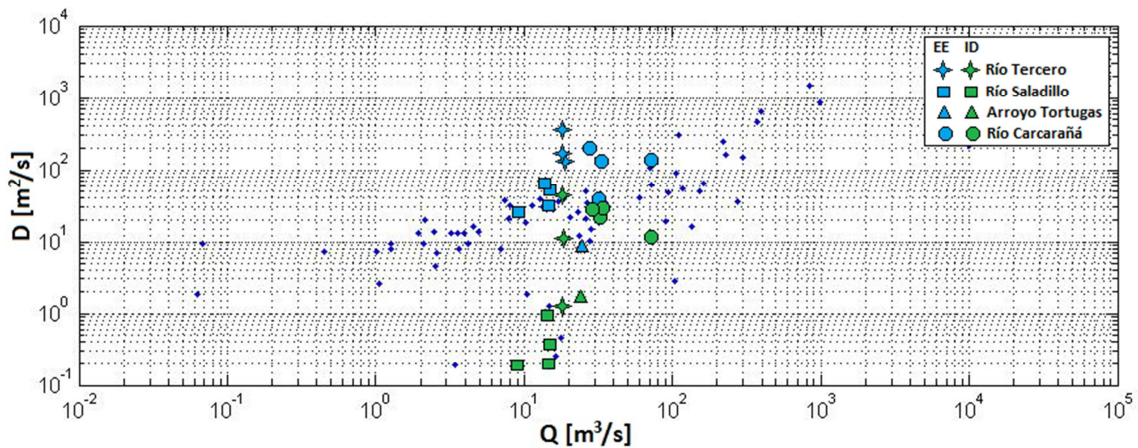


Figura 4.26. Comparación gráfica entre ambas metodologías y los valores reportados por Rutherford (1994).

Los valores obtenidos con la aproximación de fondo y velocidad con funciones particulares más precisas se muestran en la Figura 4.27. Dependiendo de la cantidad de grados de libertad que tengan estas funciones de interpolación se tendrá mayor o menor precisión, pero, como se dijo, también se perderá la generalidad de la metodología experimental aplicada. Los valores obtenidos en base a estos ajustes se encuentran entre los obtenidos con las dos metodologías desarrolladas anteriormente.

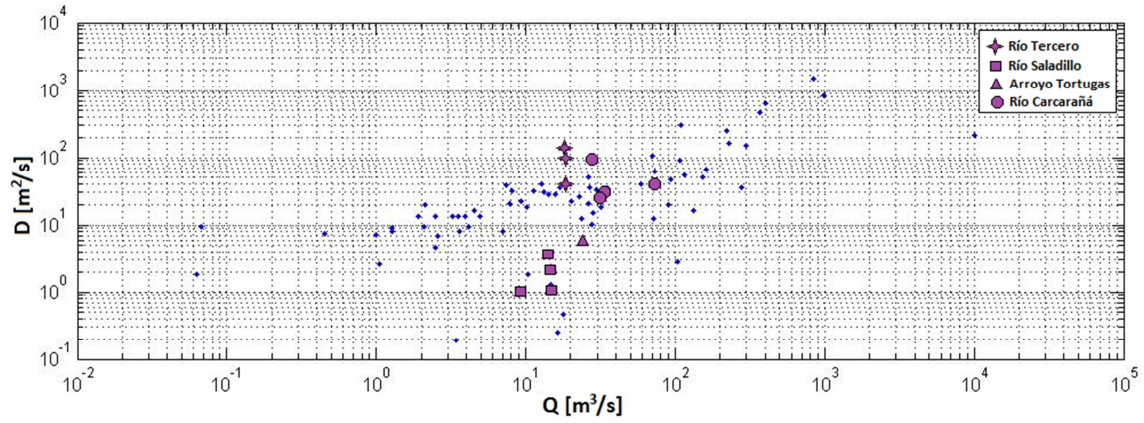


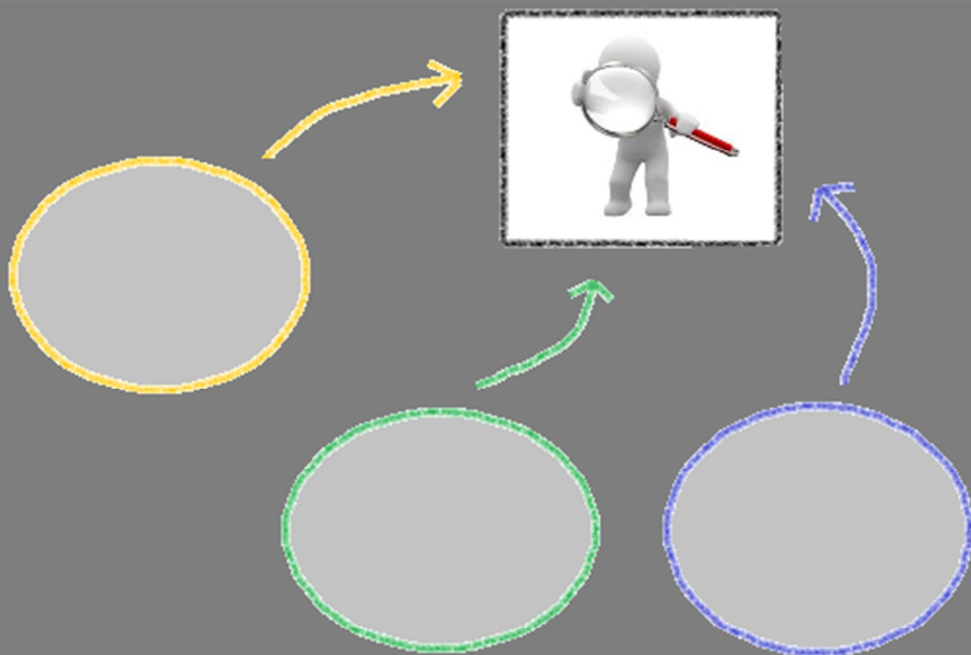
Figura 4.27. Valores obtenidos en base a funciones particulares ajustadas a cada perfil para proveer un mejor ajuste.





# CAPÍTULO 5

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES







## CAPÍTULO 5 - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES GENERALES

A partir de los estudios y análisis realizados a lo largo del período correspondiente a la Práctica Supervisada bajo la cual se enmarca este trabajo, y en base a la información y a los resultados que fueron expuestos en los capítulos anteriores, se pueden mencionar a las siguientes como conclusiones finales:

1. Se destaca la **ventaja que presenta el ADCP** como velocímetro que registra datos que satisfacen los requerimientos de las metodologías empleadas, ya que las mismas, y particularmente aquella que emplea las ecuaciones integrales, necesitan contar con datos de una **elevada resolución espacial y temporal** para poder realizar el procesamiento.
2. Se obtiene un gran **potencial de aplicación** de estas técnicas gracias al empleo y aproximación de los perfiles relevados con el ADCP mediante funciones continuas de fondo y velocidad, las cuales quedan caracterizadas con diversos parámetros, permitiendo la generación de ábacos que representen las relaciones entre dichos parámetros y el coeficiente de dispersión longitudinal buscado, de tal forma que, al ser calibrados y validados dichos parámetros en cada sitio, se pueda **estimar el coeficiente de dispersión longitudinal sin recurrir a costosas o complicadas técnicas de medición y análisis**.
3. La **gran variabilidad de los resultados** que se presentan reportados en la bibliografía en base a estimaciones de dicho coeficiente para distintos ríos del mundo **justifica el uso de una metodología que incluya las características particulares de escurrimiento del tramo de río seleccionado** (perfiles transversales de velocidad y batimetría), obteniéndose con las mismas mayor confiabilidad y precisión en los resultados. Se ve, además, que en el caso de cauces naturales (como el río Tercero o el Carcarañá) la variabilidad es mayor que en el caso de cauces artificiales (río Saladillo o arroyo Tortugas).
4. Las **ecuaciones empíricas** que utilizan variables globales fueron calibradas en base a ciertas condiciones que no se reproducen con exactitud en todas partes, por lo que **se limita el uso de las mismas a condiciones similares a las de su calibración**, presentándose grandes errores al ser aplicadas las mismas sin tener esta cuestión en consideración.
5. Bajo las hipótesis mencionadas para la realización del análisis, se ve que la velocidad por corte es la que determina la capacidad de mezcla del río, lo cual no significa que en el mismo se presenten otros fenómenos locales que contribuyan a la mezcla.
6. Al emplear funciones polinómicas que proveen un mejor ajuste, se obtienen valores del coeficiente de dispersión longitudinal menos dispersión, pero en contraposición se pierde la generalidad buscada al aplicar perfiles transversales con parámetros comparables entre distintas secciones. Los valores obtenidos con esta metodología se sitúan entre los obtenidos con las ecuaciones empíricas y aquellos obtenidos en base a la ecuación integral detallada.

7. La necesidad de realizar un mejor ajuste se ve fundamentalmente en los perfiles de fondo, los cuales en muchas secciones dan una aproximación deficiente, ya que las formas de fondo presentan grandes irregularidades, imposibilitando una buena aproximación con perfiles simétricos. En cambio, la distribución de velocidades adoptada se ajusta de muy buena forma a los perfiles reales relevados, ya que la velocidad tiene por lo general una variación más suave que el fondo. Además, dada la función de interpolación elegida, se pueden tomar valores diferentes de  $\alpha$  y  $\beta$  para tener un perfil sesgado, agregando un grado de libertad a la ecuación para lograr un mejor ajuste, tarea que no puede realizarse con la función de interpolación elegida para el fondo, la cual depende únicamente del parámetro  $\rho$ .
8. Es bajo estas hipótesis adoptadas que se puede ver que ríos como el Saladillo y el arroyo Tortugas poseen una capacidad de mezcla muy baja (bajos valores de los coeficientes de dispersión longitudinal en las secciones analizadas), ya que dichos cursos poseen perfiles de velocidad con escasa variación a lo largo del ancho de los mismos y en profundidad. Así, un contaminante descargado viajaría predominando la advección sobre la dispersión. A medida que crece el valor del coeficiente de dispersión, la capacidad amortiguadora frente a un contaminante es mayor.
9. Los **ríos deben mantenerse monitoreados** con una frecuencia al menos estacional, de tal forma de conocer la variación de los parámetros representativos del mismo y asegurar que se mantengan ciertos niveles de calidad mediante intervenciones oportunas sobre los mismos.

## 5.2 CONCLUSIONES DE LA PRÁCTICA

Se destaca a partir de la experiencia durante esta Práctica Supervisada la importancia y las ventajas que brinda el trabajo en grupo, ya que el abordaje de los temas tratados en este informe se realiza con la ayuda de muchos miembros del grupo. La posibilidad de dar una mirada integral y combinar diferentes perspectivas a las que pueden llegar distintas personas, lleva a un mejor entendimiento de los temas y a la resolución de problemas destinados a satisfacer alguna necesidad, fin último perseguido por la Ingeniería Civil.

Es por este motivo que se resalta el concepto de equipo de trabajo, y se puede entrar de esta forma en contacto con profesionales más especializados, haciendo de esta experiencia un proceso de aprendizaje constante. La Práctica Supervisada es una etapa muy importante, en la que se puede pasar de la teoría a la aplicación, y desde aquí se entra en la vida profesional.

## 5.3 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

Como principales recomendaciones pueden nombrarse las siguientes:

- Implementar el uso del ADCP en aquellos lugares en los cuales aún no se emplea, de tal forma de contar con mayor cantidad de

información y de mejor calidad para poder estudiar los fenómenos que ocurren en cada río.

- Perfeccionar las técnicas de medición, instruyendo a los operarios en la toma de datos para que los mismos no presenten grandes diferencias con la situación real, ya que desde dichos datos parte todo el análisis, y podrían llegarse a resultados que no representen la realidad.
- Implementar un sistema de monitoreo y relevamiento automático remoto de datos en distintos puntos de interés de la cuenca de tal forma de contar con un registro continuo que permita conocer cómo varían los principales parámetros hidráulicos de los ríos con el tiempo.

#### **5.4 DIFUSIÓN DE LOS RESULTADOS**

Como manera de difundir los resultados a los que se llegaron en esta práctica, se presentó un artículo técnico en el Sexto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, en la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, en noviembre de 2013.

El trabajo presentado puede encontrarse en el Anexo, al final de este informe. El mismo fue realizado en base a los análisis efectuados sobre el río Tercero, aunque posteriormente el análisis se extendió a toda la cuenca del río Carcarañá, tal como se mencionó en el Capítulo 1.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carr, M. L., Rehmann, C. R. (2007). "Measuring the dispersion coefficient with acoustic Doppler current profilers". *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(8), 977-982.
- Chapra, S. (1997). "Surface water-quality modeling". McGraw-Hill International Editions.
- Deng, Z. Q., Singh, V. P., Bengtsson, L.(2001). "Longitudinal dispersion coefficient in straight rivers.". *J. Hydraul. Eng.*, 127(11), 919–927.
- Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J., Brooks, N. H. (1979). "Mixing in inland and coastal waters". Academic, New York.
- Hernandez, J., Szupiany, R., Ashworth, P. y Amsler, M. (2008). "Uso de la tecnología acústica Doppler para la caracterización del flujo y distribución de sedimento suspendido en grandes corrientes fluviales", Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas - Universidad Nacional del Litoral.
- Kiely G. (1999). "Ingeniería Ambiental. Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión". Mc Graw Hill International Editions.
- Lenarduzzi, M. (2013). "Caracterización Hidrodinámica del río Tercero (Ctalamochita) con fines hidroambientales". Práctica Supervisada de Grado, Carrera Ingeniería Civil, FCEFyN-UNC.
- Naved, A. (2008). "Estimating the Coefficient of Dispersion for a Natural Stream". World Academy of Science, Engineering and Technology.
- Rutherford, J. C.(1994). "River mixing". Wiley, Chichester
- Seo, I. W., Baek, K. O. (2004). "Estimation of the longitudinal dispersion coefficient using the velocity profile in natural streams". *J. Hydraul. Eng.*, 130(3), 227–236.
- SonTek/YSI (2010). "Folleto de especificaciones RiverSurveyor S5/M9". Sontek.
- SonTek/YSI (2010). "Guía de Inicio Rápido RiverSurveyor". Sontek.
- SonTek/YSI (2010). "Manual del Sistema RiverSurveyor S5/M9". Sontek.
- USGS Hydroacoustics (2013). [hydroacoustics.usgs.gov/movingboat](http://hydroacoustics.usgs.gov/movingboat).



# ANEXO







## Sexto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos

Santa Fe, Argentina. 6 al 8 de noviembre 2013

### EVALUACIÓN DEL COEFICIENTE DE DISPERSIÓN LONGITUDINAL EN RÍOS UTILIZANDO ADCP

Federico Caminal<sup>1</sup>, Gustavo Matías Barchiesi<sup>1</sup>, José Manuel Díaz Lozada<sup>1</sup>, Horacio Herrero<sup>1</sup>, Marcos Lenarduzzi<sup>1</sup>, C. Marcelo García<sup>1</sup>, Florencia Nadal<sup>3</sup>, Ana Cossavella<sup>2,4</sup>

- 1 - Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba.  
Av Filloy s/n, Ciudad Universitaria, CP 5000, Córdoba, Argentina
  - 2 - Área Preservación y Control del Recurso de la Secretaria de Recursos Hídricos del Gobierno de la Provincia de Córdoba, CP 5000, Córdoba, Argentina
  - 3 - Área de Limnología y Calidad de Agua, CIRSA, Instituto Nacional del Agua, Avenida Ambrosio Olmos 1142, CP 5000, Córdoba, Argentina
  - 4 - Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. Av Filloy s/n, Ciudad Universitaria, CP 5000, Córdoba, Argentina
- E-mail: [fedecaminal@gmail.com](mailto:fedecaminal@gmail.com)

#### RESUMEN

El Río Tercero es uno de los ríos más importantes de la provincia de Córdoba debido a su elevado caudal relativo (comparado con otros ríos de la región) que lo convierte en una potencial fuente de agua para consumo. Para asegurar la calidad de este recurso se realiza la caracterización de la hidrodinámica de este río con fines ambientales y uno de los aspectos más importantes a analizar es la evaluación de la capacidad de mezcla del mismo, a través de la determinación de los coeficientes de dispersión (vertical, transversal y longitudinal). Este trabajo se determina experimentalmente el coeficiente de dispersión longitudinal de un tramo del Río Tercero en base a mediciones de velocidad con Perfiladores de Corriente Acústicos Doppler - ADCP, utilizando dos tipos de información hidráulica del tramo estudiado: en primer lugar sólo se utilizan las variables hidráulicas globales del río obtenidas del muestreo realizado con ADCP (por ejemplo velocidades y profundidades medias) y en segundo lugar se tuvo en cuenta además la distribución transversal de las velocidades y de la geometría de la sección. Las mediciones se realizaron en el Río Tercero, más precisamente en el balneario de la localidad homónima, debido a que se localiza aguas abajo de un polo industrial. Finalmente se contrastan los resultados obtenidos con ambas metodologías y se las compara con resultados estimados utilizando ábacos empíricos disponibles construidos con información de ríos con características similares al analizado en este trabajo.

#### ABSTRACT

The Tercero river is one of the most important rivers in the Cordoba Province due to its high relative flow discharge (compared to other rivers in the region), making it a potential source of drinking water. To ensure the quality of this water resource, a hydrodynamics characterization of this river is performed for environmental purposes, and one of the most important studied aspects is the quantification of the river mixing processes through the determination of dispersion coefficients (vertical, transverse and longitudinal). This work presents experimental determinations of the longitudinal dispersion coefficient of a Tercero river reach based on velocity measurements performed using Acoustic Doppler Current Profilers - ADCP, using two different methods. These methods use two different types of hydraulic information: first, only global hydraulic variables obtained from ADCP measurements were used (i.e. average flow depth and velocity), and then, the transverse distribution of both flow velocities and bathymetry were used. The ADCP measurements were performed at the Tercero river, more precisely in the swimming areas downstream of an industrial park. Finally, the results obtained with both methods are compared and contrasted with results estimated using empirical plots available in the literature built using information recorded from similar rivers as analyzed in this work.

## **INTRODUCCIÓN**

El río Tercero (Ctalamochita) se localiza en la Provincia de Córdoba, Argentina. Este río, por su caudal, es uno de los ríos más importantes de la región, por lo que es necesario asegurar la calidad de este recurso como fuente de agua para consumo de las poblaciones que actualmente abastece, considerando además al mismo como fuente potencial de agua para otras poblaciones en el futuro. En su primer tramo aguas abajo del embalse Piedras Moras, en la ciudad de Río Tercero, se ubica un polo industrial, constituyendo éste un punto de riesgo para el río, por lo que es importante realizar un seguimiento detallado del recurso con un enfoque integral, con el objetivo de detectar cambios tanto hidrodinámicos como ambientales para elaborar un plan de acción a implementar en la cuenca de aporte. En este aspecto la Secretaría de Recursos Hídricos del Gobierno de la Provincia de Córdoba, y la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba (FCEFyN – UNC) vienen realizando desde hace un tiempo y en forma periódica monitoreos de calidad de agua y aforos mediante métodos convencionales, como por ejemplo aforo por vadeo con molinetes.

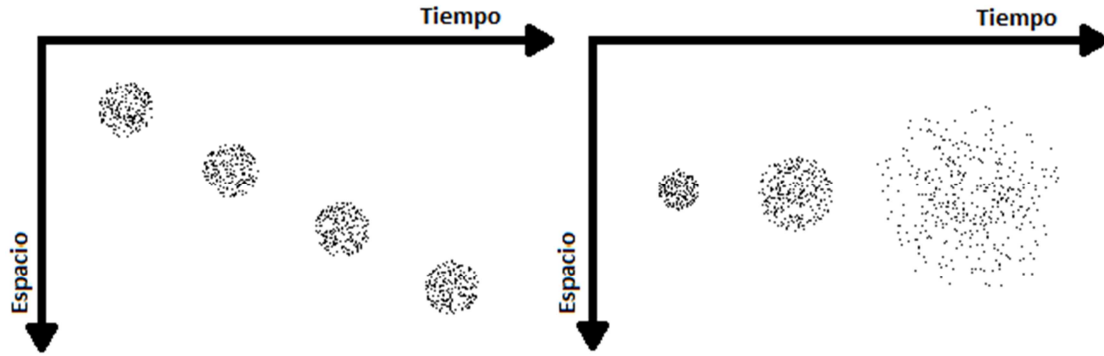
En la actualidad se ha agregado al instrumental utilizado para los aforos un Perfilador de Corriente Acústica Doppler (ADCP), que permiten mejorar los muestreos obtenidos con técnicas convencionales, logrando mayor resolución espacial y temporal de las velocidades del flujo, como así también mayor precisión en el relevamiento de la morfología del cauce. Esta información disponible puede ser utilizada en forma complementaria para lograr una comprensión más acabada de mecanismos físicos presentes en el tramo del río analizado. Uno de los procesos que pueden ser estudiados con mayor detalle es la dispersión de contaminantes en ese tramo. Para simular este proceso, la mayoría de los modelos de mezcla requiere un coeficiente de dispersión longitudinal que depende de características geométricas y de flujo. Este coeficiente de dispersión ha sido generalmente estimado con fórmulas empíricas (utilizando variables globales de flujo) o con estudios de trazadores. Los estudios de trazadores, considerados más precisos, requiere una gran inversión en planificación, personal y análisis posterior (Carr y Rehmann, 2007). En este trabajo se evalúan las bondades de las ecuaciones empíricas estimando coeficientes de dispersión longitudinal en cursos fluviales con las características del Río Tercero (Ctalamochita) y se sugieren mejoras a estos estimadores con información espacio-temporal adicional obtenida con ADCP.

## **OBJETIVOS**

El objetivo perseguido en este trabajo es la estimación experimental indirecta del coeficiente de dispersión longitudinal en un tramo del Río Tercero (Ctalamochita) en base a mediciones de velocidad con perfiladores de corriente acústicos Doppler - ADCP, utilizando dos tipos de información hidráulica del tramo estudiado: en primer lugar sólo se utilizan las variables hidráulicas globales del río obtenidas del muestreo realizado con ADCP (por ejemplo velocidades y profundidades medias) y en segundo lugar se tiene en cuenta además la distribución transversal de las velocidades y de la geometría de la sección.

## **MARCO TEÓRICO**

Al ser descargado un contaminante en el río, al principio el mismo viaja de acuerdo a la velocidad que lleva el curso de agua, manteniéndose dentro de ciertas fronteras imaginarias; a este fenómeno se lo denomina advección. A medida que va avanzando a lo largo de la trayectoria, el movimiento no es en conjunto, sino que las partículas del contaminante comienzan a dispersarse debido a los mecanismos de mezcla presentes en el río; este último fenómeno es lo que se conoce como dispersión (ver Figura 1).



**Figura 1.-** Fenómenos de mezcla en ríos. A la izquierda, advección; a la derecha, dispersión.

Las posibles direcciones de mezcla en un río son tres: vertical, transversal, y longitudinal. Es para cada una de ellas que puede evaluarse un coeficiente de dispersión, pero sucede que los contaminantes llegan a mezclarse en toda la sección rápidamente (vertical y transversalmente) pero perduran por grandes longitudes, entonces el parámetro que se utilizará para la evaluación de la calidad del agua será este último parámetro, el del Coeficiente de Dispersión Longitudinal, denominado  $D$ . Para el cálculo del coeficiente de dispersión longitudinal  $D$  se utilizó la ecuación simplificada de Fischer (1979) [ec. (1)], cuyo coeficiente 0,011 es resultado de un ajuste a partir de la ecuación general, de tal forma de poder tener en cuenta los fenómenos de corrientes secundarias y turbulentas que se dan en los ríos.

$$D = 0,011 \cdot \frac{U^2 \cdot B^2}{H \cdot u^*} \quad (1)$$

Donde  $U$  es la velocidad media del flujo en la sección,  $B$  es el ancho del río,  $H$  es la profundidad media del flujo, y  $u^*$  es la velocidad de corte calculada mediante la ec. (2)

$$u^* = (g \cdot R_h \cdot S_0)^{0,5} \quad (2)$$

Donde  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $R_h$  es el radio hidráulico de la sección (área/perímetro mojado), y  $S_0$  la pendiente de la línea de energía del tramo de río. Las ecuaciones mostradas anteriormente involucran variables hidráulicas globales que son las que están frecuentemente disponibles aunque estas variables globales no representan completamente los procesos de mezcla responsables de la dispersión longitudinal (distribución lateral de velocidades longitudinales). Es por ello que se puede obtener una mejor estimación del coeficiente de mezcla longitudinal mediante la ecuación integral propuesta por Fisher (1979) [ec. (3)]:

$$D = -\frac{1}{A} \int_0^B u'(y)h(y) \int_0^y \frac{1}{\varepsilon_t h(y)} \int_0^y u'(y)h(y) dy dy dy \quad (3)$$

Donde  $A$  es el área de la sección transversal,  $u'(y)$  es la diferencia entre la velocidad longitudinal en la progresiva transversal  $y$ , con respecto a la velocidad media global en la sección  $U$  y  $\varepsilon_t$  es el coeficiente de mezcla transversal, calculado mediante la ecuación propuesta por Fischer et. al. (1979) ec. (4)

$$\varepsilon_t = 0,6 \cdot H \cdot u^* \quad (4)$$

La ecuación (4) asume un flujo unidimensional, es decir que el contaminante debe estar completamente mezclado tanto en la vertical como en la transversal. Debido a esta limitación esta ecuación solo puede ser utilizada en zonas donde no hay recirculación o donde no hay fuertes corrientes secundarias. Además, esta ecuación

asume que la tensión de corte transversal es quien gobierna el proceso de mezcla y no la tensión vertical, por lo tanto solo puede ser aplicada a ríos donde el ancho ( $B$ ) sea mucho mayor que la profundidad media ( $H$ ). Por último, se puede decir que esta ecuación supone que el mecanismo de dispersión por corte predomina sobre los demás mecanismos de mezcla. El coeficiente 0,6 de la ec. (4) tiene en cuenta la influencia en la mezcla de curvas (poco pronunciadas), rugosidad de las márgenes, y otras irregularidades presentes en cauces naturales.

En este trabajo se propone utilizar la ecuación (3) sobre una aproximación de la distribución de velocidades transversales y profundidades realizadas con funciones de distribución. La función teórica de distribución de velocidades utilizada en este trabajo fue desarrollada por Seo y Baek (2000) [ec. (5)], la cual genera un perfil transversal de velocidades a partir de distribuciones "gamma" ( $\gamma$ ).

$$\frac{u(y)}{U} = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{y}{B}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{y}{B}\right)^{\beta-1} \quad (5)$$

Donde  $u(y)$  es la velocidad longitudinal media en la vertical correspondiente a una progresiva transversal  $y$ ,  $U$  es la velocidad media global de la sección transversal,  $B$  es el ancho total de la sección,  $\alpha$  y  $\beta$  son parámetros de la distribución gamma. Cuando  $\alpha = \beta$  la distribución es simétrica, pero cuando  $\alpha > \beta$  la curva se sesga hacia la derecha, y cuando  $\alpha < \beta$  la curva se sesga hacia la izquierda. Adoptando un valor de  $\alpha = 1$ , el valor de la velocidad en la dirección transversal es constante, y a medida que  $\alpha$  crece, el perfil de distribución de velocidades concentra los mayores valores de velocidad longitudinal en una zona cada vez más estrecha ubicada al centro del canal, disminuyendo hacia las márgenes (ver Figura 2).

La función de distribución transversal de profundidades (batimetría de la sección transversal) utilizada en este trabajo fue la definida por (Deng et al. 2001) [ec. (6)].

$$\frac{h(y)}{H_{max}} = 1 - \left[\frac{2y}{B} - 1\right]^{\gamma} \quad (6)$$

Donde  $h(y)$  es la profundidad de la sección correspondiente a una progresiva transversal  $y$ ,  $H_{max}$  es la profundidad máxima de la sección transversal, y  $B$  es el ancho total de la sección. Al variar el coeficiente gamma ( $\gamma$ ) se obtienen diferentes distribuciones de la profundidad para una sección transversal (ver figura 3). Para  $\gamma=1$ , el perfil de la sección transversal resulta triangular, para  $\gamma=2$  resulta parabólico y para valores mayores de  $\gamma$  el perfil va adquiriendo una forma cada vez más aproximada a la rectangular.

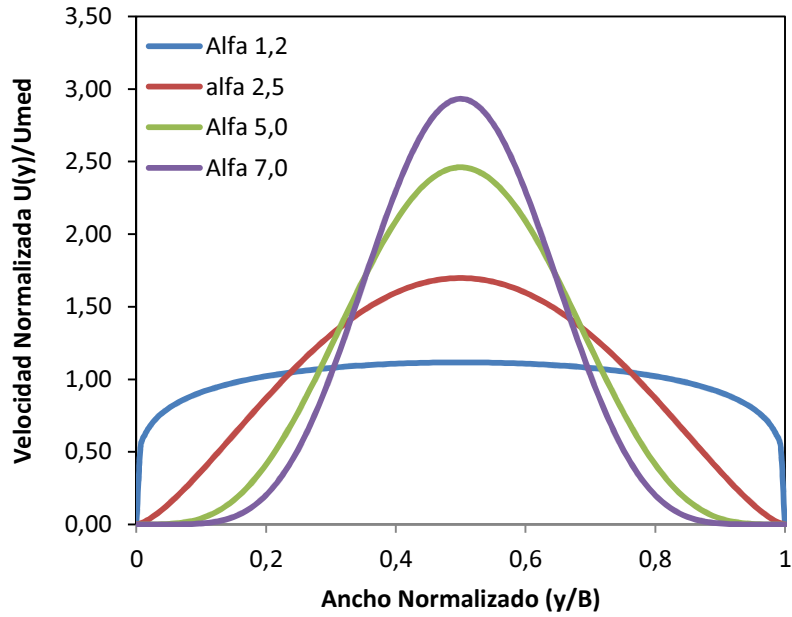


Figura 2.- Perfil transversal de velocidades obtenidos utilizando la ecuación (5).

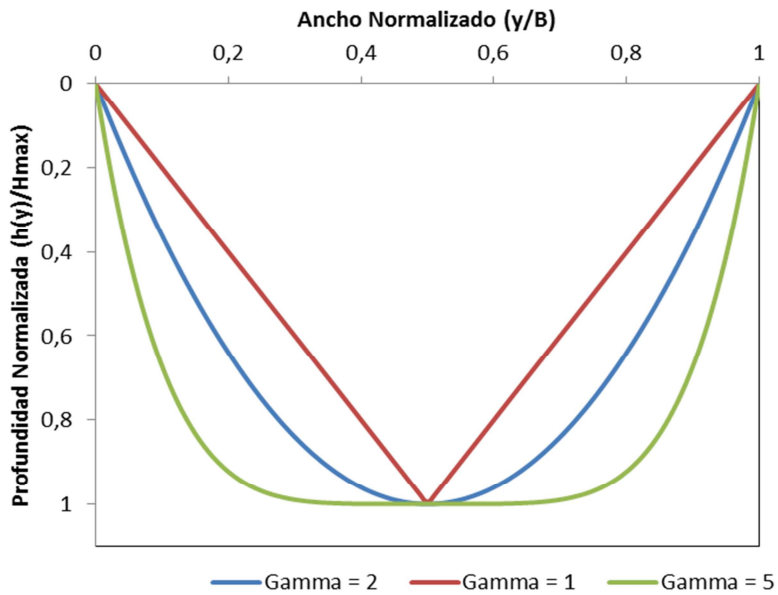
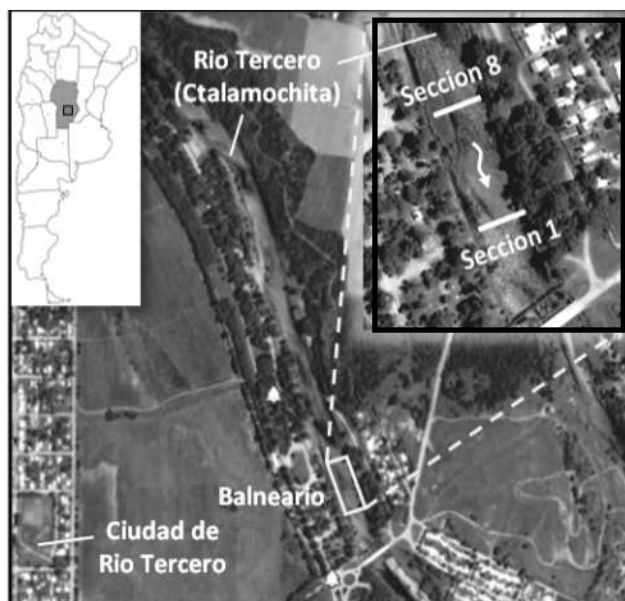


Figura 3.- Distribución transversal de profundidades obtenidas utilizando la ecuación (6).

## METODOLOGÍA

Los estudios experimentales reportados en este trabajo se desarrollaron en un tramo del río Tercero localizado en el Balneario de la ciudad homónima (Figura 4) (Lenarduzzi, 2013).



**Figura 4.-** Ubicación de la zona de estudio.

Dadas las características del Río Tercero (es un cauce natural poco profundo y con velocidades de flujo superiores a 1m/s que dificulta las tareas dentro del río), se utilizó un Perfilador de Corriente Acústico Doppler (Figura 5) específico para cauces de aguas poco profundas (RiverSurveyor S5 YSI/Sontek ADCP) para la medición de velocidades, caudales y profundidades del flujo.

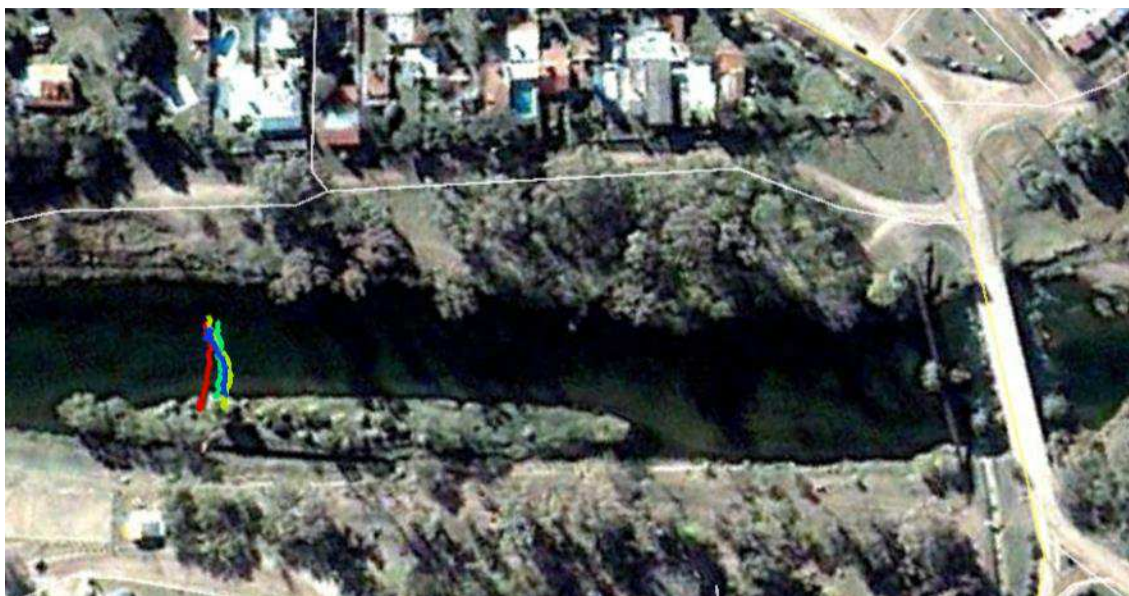


**Figura 5.-** ADCP RiverSurveyor S5 YSI/Sontek en campaña de aforo del río Tercero, en la localidad homónima.

El RiverSurveyor S5 YSI/Sontek ADCP es un equipo de alta precisión que cuenta con un algoritmo inteligente denominado “Smart Pulse HD” que en base a la profundidad, velocidad y niveles de turbulencia del flujo, ajusta de manera automática el esquema de pulso acústico con el fin de proveer la máxima resolución de registro de datos. Con este equipo se realizaron diversas mediciones en cada una de las campañas, acompañando a las mismas con mediciones a partir de un GPS diferencial para determinar en cada instante y de forma complementaria la posición del perfilador. Para las mediciones con ADCP que se reportan en este trabajo se realizaron diferentes transectas o cruces en una sección transversal (ver Figura 6) con la embarcación que traslada el equipo, a una velocidad menor que la velocidad del flujo.



Durante el cruce, el instrumental registró datos de velocidad de flujo y batimetría de la sección.



**Figura 6.-** Trayectorias realizadas con la embarcación móvil durante los 4 cruces en la sección del tramo de estudio.

A partir de la información obtenida de las mediciones con el ADCP, las dos metodologías citadas anteriormente fueron utilizadas para realizar una estimación experimental indirecta del coeficiente de dispersión longitudinal en un tramo del Río Tercero. La primera de ellas fue utilizando parámetros hidráulicos globales de la sección transversal estudiada, tales como velocidad media global en la sección ( $U$ ), profundidad media del flujo ( $H$ ), ancho total ( $B$ ) y velocidad de corte ( $u^*$ ). Luego, los coeficientes de dispersión longitudinal ( $D$ ) y transversal ( $\epsilon_t$ ) se calcularon para la sección estudiada mediante las ecuaciones simplificadas de Fischer definidas anteriormente (ec. 1 y 4, respectivamente).

La segunda metodología fue utilizando, además de los parámetros globales, información de la distribución transversal de las velocidades longitudinales medias en la vertical, y la geometría de la sección. Estos datos de velocidad se ajustan luego a una distribución teórica, y la estimación del coeficiente de dispersión longitudinal  $D$  se realiza según las ecuaciones 3, 4, 5 y 6. En este trabajo se adoptó una distribución simétrica ( $\alpha = \beta$ ), por lo tanto la forma del perfil de velocidades depende de  $\alpha$ .

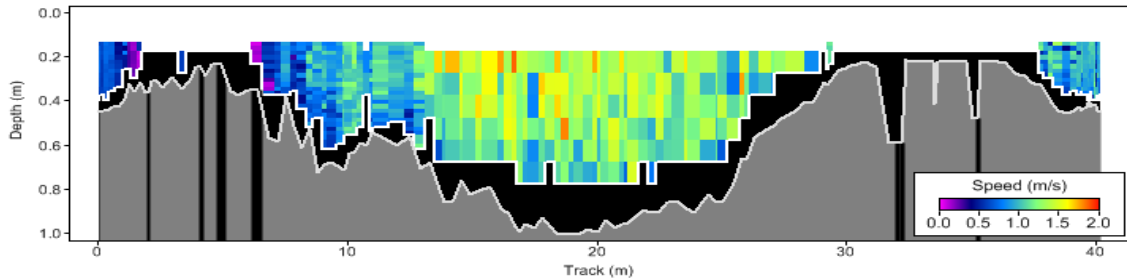
## RESULTADOS

En la Tabla 1 se resumen los parámetros hidráulicos globales medidos en la sección de estudio, y los valores de los coeficientes de dispersión transversal y longitudinal calculado mediante la ecuaciones 4 y 1, respectivamente. El caudal aforado fue de  $17,3 \text{ m}^3/\text{s}$ , y la pendiente del pelo libre de agua en el tramo analizado se midió mediante el empleo de un nivel óptico, y el resultado obtenido fue  $S_o = 0,001125 \text{ m/m}$ .

**Tabla 1.-** Parámetros hidráulicos globales y coeficientes de dispersión transversal  $\epsilon_t$  y longitudinal  $D$ .

$B$ [m]	$H$ [m]	$A$ [m <sup>2</sup> ]	$U=Q/A$ [m/s]	$u^*$ [m/s]	$\epsilon_t$ [m <sup>2</sup> /s]	$D$ [m <sup>2</sup> /s]
34,26	0,53	18,08	0,95	0,076	0,024	291,17

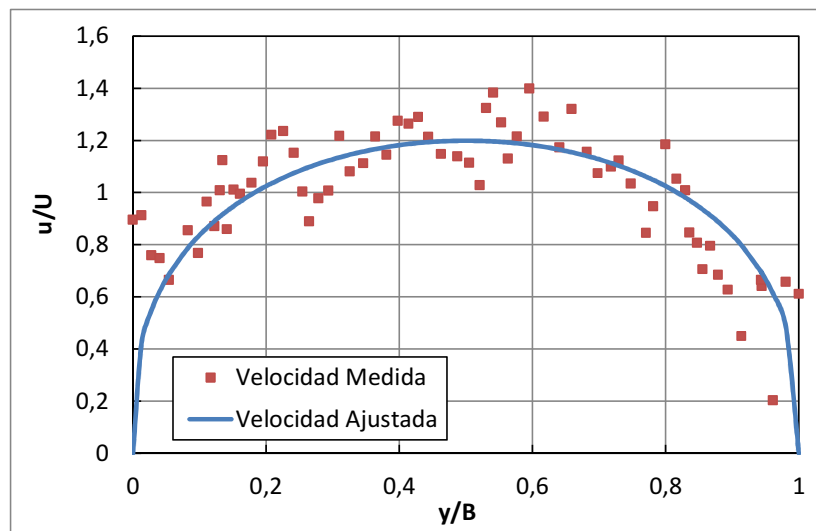
A continuación se detalla el cálculo del coeficiente de dispersión longitudinal  $D$  mediante el uso de la ecuación (4) en la sección del río estudiada cuya distribución transversal de velocidades y profundidades de flujo se muestra en la Figura 7. Se puede observar que la distribución de velocidades en la transversal no es uniforme y presenta características particulares.



**Figura 7.-** Geometría y campo de velocidades de la sección transversal medida con ADCP.

Para la sección de la figura 7 el mejor ajuste de la geometría de la sección medida con ADCP lo representa una distribución de profundidades (ecuación 6) con un valor del coeficiente  $\gamma = 4$ , la cual posee el menor error cuadrático.

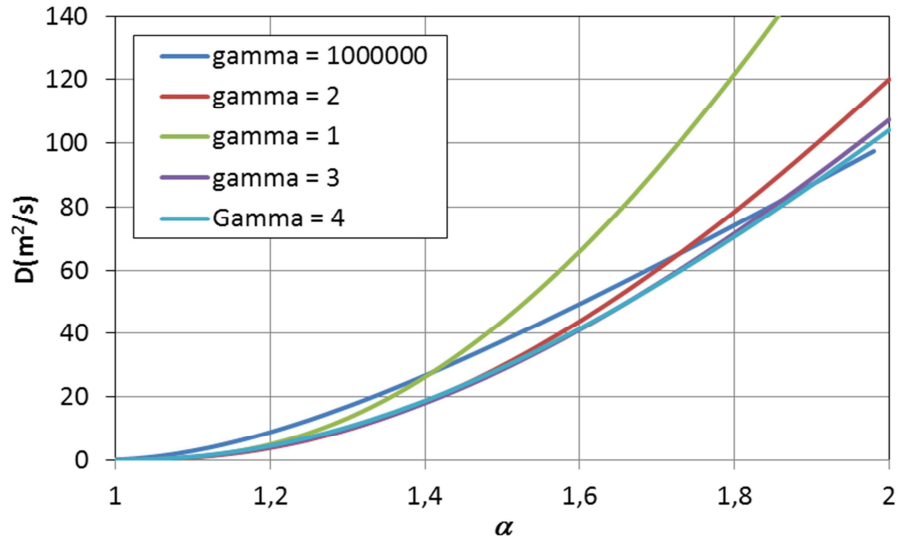
En la figura 8 se muestran la distribución transversal de velocidad longitudinal  $u(y)$  medidos con ADCP, junto con la función de distribución de velocidades seleccionada (ecuación 5). Las progresivas en la dirección transversal ( $y$ ) se expresan como porcentajes del ancho  $B$ , y las velocidades  $u(y)$  se adimensionalizaron con el valor de la velocidad media global  $U$ . El valor del coeficiente  $\alpha$  que da como resultado el ajuste de la ecuación (5) a los valores medidos fue de  $\alpha = 1,35$ , el cual da el mínimo error cuadrático. Utilizando los coeficientes  $\alpha$  y  $\gamma$  obtenidos del ajuste a funciones de distribución transversal de los perfiles de velocidad y profundidad, respectivamente, se obtuvo como resultado un valor para el coeficiente de dispersión longitudinal  $D=21,04\text{m}^2/\text{s}$ .



**Figura 8.-** Ajuste de la función de distribución transversal de velocidades longitudinales (ecuación 5) a los valores de velocidad  $u(y)$  medidos con ADCP.

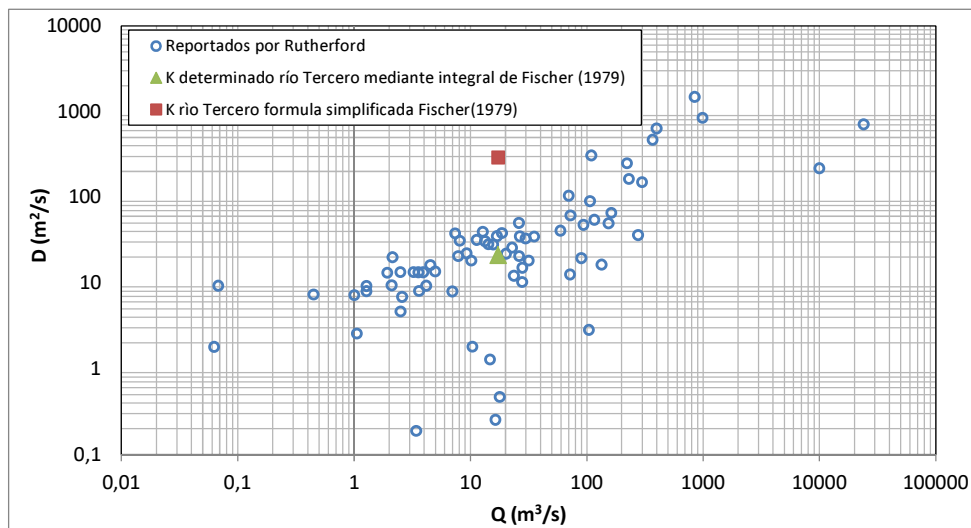
En la Figura 9 se muestra un análisis de sensibilidad en la determinación del coeficiente  $D$  a la selección de los coeficientes  $\alpha$  y  $\gamma$ . Allí se observa que para  $\alpha = 1,35$  (y en general para perfiles de velocidades con  $\alpha \leq 1,5$ ), el coeficiente de dispersión  $D$  es poco sensible al parámetro  $\gamma$  que depende de la forma de la sección (cuando este

parámetro está en el rango de:  $2 \leq \gamma \leq 4$ ). Cada una de las relaciones de alfa ( $\alpha$ ) vs  $D$  para cada valor de gamma ( $\gamma$ ) son ecuaciones cuadráticas donde el coeficiente que afecta el término cuadrático disminuye a medida que gamma ( $\gamma$ ) aumenta (la relación tiende a una relación lineal).



**Figura 9.-** Análisis de sensibilidad en la determinación del coeficiente  $D$  a la selección de los coeficientes  $\alpha$  y  $\gamma$ .

El coeficiente de dispersión longitudinal obtenido a partir de mediciones de velocidad con ADCP utilizando parámetros globales (según ecuación 1), y el coeficiente obtenido en función de la distribución de velocidades y de la geometría de la sección (según ecuación 3), se los incluyó en la Figura 10 junto con valores antecedentes de  $D$  para diferentes ríos recopilados por Rutherford (1994).



**Figura 10.-** Valores del coeficiente de mezcla longitudinal reportados por Rutherford (1994, símbolos abiertos) y el valor estimado de  $D$  del río Tercero estimados con las ec. (1) y (3), (símbolos llenos) .

Se observa la gran dispersión de los valores reportados por Rutherford (1994) lo que justifica el uso de una metodología que incluya las características particulares (perfiles

transversales de velocidad y batimetría) en el cálculo del coeficiente de dispersión longitudinal.

### **CONCLUSIONES**

En este trabajo se llevó a cabo una estimación experimental indirecta del coeficiente de dispersión longitudinal en un tramo del Río Tercero (Ctalamochita), utilizando información detallada de los campos de velocidad obtenidos con ADCP.

A partir de la información obtenida de las mediciones con ADCP, se utilizaron dos metodologías para realizar una estimación del coeficiente de dispersión longitudinal  $D$  en un tramo del Río Tercero. La primera de ellas fue utilizando parámetros hidráulicos globales de una sección transversal, tales como velocidad media global en la sección, profundidad media del flujo, y ancho total. La segunda metodología implementada utiliza información de la distribución transversal de las velocidades longitudinales medias en la vertical, y la geometría de la sección.

Los valores de los coeficientes de dispersión longitudinal fueron contrastados con valores disponibles en la literatura para diferentes ríos con características similares. La gran dispersión de los valores reportados en la literatura justifica el uso de una metodología que incluya las características particulares de escurrimiento del tramo de río seleccionado (perfiles transversales de velocidad y batimetría).

Se destaca la ventaja del uso de ADCP para implementar la metodología propuesta debido a que provee mucha información con elevada resolución espacial y temporal. Además, el potencial de los productos elaborados con estas técnicas (ábacos) es de gran magnitud, ya que de ser validadas y calibradas en cada sitio, servirán posteriormente para poder realizar estimaciones del coeficiente de dispersión sin recurrir a costosas técnicas o complejos métodos de medición con trazadores que requieren un significativo empleo de tiempo y personal en campo, dados los altos costos que dichas campañas representan para las instituciones.

El grupo de trabajo a cargo de esta publicación continúa con el análisis en otras secciones representativas de este río a fines de obtener una caracterización más detallada del comportamiento hidrodinámico del mismo.

**Agradecimiento.** *A la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba por su colaboración para la realización de las campañas y a todo el equipo y compañeros del Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA) por el tiempo y dedicación brindados tanto en las campañas como en el posterior análisis de datos e información.*