

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA**

**Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**

**Doctorado en Ciencias de la Ingeniería**

**Tesis Doctoral**



**“Avances en la Cuantificación hidrológica y  
caracterización hidráulica del flujo en el sistema  
fluvial del Río Carcarañá utilizando ADCP”**

**Autor: MSc. Ing. José Manuel Díaz Lozada**

**Director: Dr. Ing. Carlos Marcelo García Rodríguez**

**FEBRERO DE 2019**



# **“Avances en la Cuantificación hidrológica y caracterización hidráulica del flujo en el sistema fluvial del Río Carcarañá utilizando ADCP”**

**Por**

**MSc. Ing. José M. Díaz Lozada**

**Dr. Ing. Carlos Marcelo García.**  
**Director**

## **COMISIÓN ASESORA**

**Dr. Ing. Carlos Marcelo García.**  
(Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – UNC)

**Dr. Ing. Martin Romagnoli**  
(Centro Internacional Franco Argentino de Ciencias de la  
Información y de Sistemas – Universidad Nacional de Rosario)

**Dra. Ing. Teresa Reyna**  
(Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – UNC)







UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA  
Facultad de Cs. Exactas, Físicas y Naturales

**ACTA DE EXAMENES**

Libro: 00001

Acta: 04664

Hoja 01/01

LLAMADO: 1

29/03/2019

CATEDRA - MESA:

DI002 TESIS DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA

NUMERO	APELLIDO Y NOMBRE	DOCUMENTO	INGRESO	COND.	NOTA	FIRMA
34988109	DIAZ LOZADA, JOSE MANUEL	DNI: 34988109	2013	T	APROBADO	

Menendez, Angel Nicolas - KRUSE, Eduardo Emilio - GUARRACINO, Luis - REYNA, Santiago M. - RAVELO, Andr

Observaciones:

Dra. Graciela Corral Briones  
Directora Alternas  
Doctorado en Ciencias  
de la Ingeniería  
F.C.E.F. y N. - U.N.C.

Córdoba, \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_.

Certifico que la/s firma/s que ha/n sido puesta/s en la presente Acta pertenece/n a: GRACIELA CORRAL BRIONES

1 0 1 0 1  
Inscriptos Ausentes Examinados Reprobados Aprobados  
21/03/2019 11:00:56

Libro/Acta: 0000104664

Hoja: 01/01



Esta tesis fue enviada a la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba para cumplimentar los requisitos de obtención del grado académico de Doctor en Ciencias de la Ingeniería.

Córdoba, Argentina  
Febrero de 2019



---

## AGRADECIMIENTOS

---

Han pasado 5 años desde que comencé este camino de realizar mi doctorado y fruto de este trabajo es esta tesis que intenta aportar un pequeño avance al conocimiento de la ciencia. Este trabajo nunca podría haber sido llevado a cabo sin el apoyo de familiares, amigos y profesores que desde un mate hasta realizar complejos cálculos han ayudado a mi formación. En ese sentido es que hoy quiero agradecerles especialmente:

- A mi director/amigo el Dr. Carlos Marcelo García, que me ha ayudado a crecer mucho en estos años con mucha dedicación y empeño. Hoy estoy aquí presentando esta tesis gracias a su inmensa ayuda y su confianza en mí.
- A mi familia que siempre me apoyo para realizar mis estudios y actividades. Además, les agradezco todo el aguante para soportar mis nervios cuando tenía que presentar la tesis.
- A mi novia Florencia Demarco, que apareció en mi vida casi al final de este camino de mi doctorado, pero que con mucho cariño me pregunta diariamente ¿Cómo va la tesis? dándome ánimos para terminarla.
- A Francisco Pedocchi del IMFIA y a Kevin Oberg del USGS por invitarme a trabajar con ellos en sus institutos y por todo lo que me enseñaron.
- A mis amigos Mateo A., German A., Fernando d., y Manuel R. por todo el apoyo brindado y el aguante que me hacen.
- A mis amigos del LH-CETA: Nico G., Magui B., Yari, Javi A., Tomas V., Anita H., Leti T., Antoine P., Horacio H., Erica D., Mati E., Mati R y Ceci P. que día a día me alegraban los días con mates, charlas y chistes. Además, ellos ayudaron fuertemente a la realización de esta tesis colaborando con las campañas, escribiendo los artículos en conjunto, dando sugerencias o explicando algo que no comprendía.
- A Ricardo Szupiany, Francisco Latosinsky y Lucas Dominguez de la FICH – UNL por su gran colaboración en esta tesis y por siempre recibirme bien en las visitas a Santa Fe.
- A mis compañeros de la Secretaria de Extensión de la FCEfyN por bancarme y ayudarme cubriéndome para que pueda terminar esta tesis.
- A la SECyT – UNC y al CONICET quienes financiaron mis estudios de posgrado y me dieron la oportunidad de estar presentando esta tesis.
- A Edgar Castelló, Juan Pablo Brarda, Ana Cosavella y Rolando Domínguez (Mingo) del ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos por toda la ayuda brindada para la realización de las campañas.
- A Martin Romagnoli y Margarita Portapila del Centro Internacional Franco-Argentino de Ciencias de la Información y de Sistemas de la Universidad Nacional de Rosario, por la inmensa colaboración y ayuda en las campañas realizadas en Santa Fe.

Finalmente agradecer a todos mis profesores y amigos que me han acompañado a lo largo de este hermoso camino que es el doctorado.



---

## AVANCES EN LA CUANTIFICACIÓN HIDROLOGICA Y CARACTERIZACION HIDRAULICA DEL FLUJO EN EL SISTEMA FLUVIAL DEL RÍO CARCARAÑÁ UTILIZANDO ADCP

---

### Resumen.

La cuantificación hidrológica de los escurrimientos en el sistema fluvial del río Carcarañá es fundamental para la gestión sustentable del recurso hídrico superficial en esa cuenca siendo la variable de interés a cuantificar el caudal superficial escurrido por los distintos tributarios en condiciones de aguas bajas, medias y altas (crecidas). En lo que respecta a la caracterización hidráulica, a pesar de que los principios básicos de la hidráulica de canales abiertos y el transporte de sedimentos relacionado con el flujo en canales rectos y uniformes se conoce lo suficiente no son siempre apropiados para cauces naturales en donde se presentan estructuras complejas y complicadas de analizar. En particular no se encuentran disponibles suficientes investigaciones para situaciones complejas típicas que se presentan en ríos y cauces naturales como por ejemplo en confluencias. La compleja hidrodinámica que tiene los flujos en cauces naturales también afecta notablemente los procesos de mezcla y hacen que las ecuaciones desarrolladas en la bibliografía presenten falencias importantes en algunos casos debido a que fueron desarrolladas en laboratorios o para cauces naturales con diferentes características a las del sistema de estudio.

Para lograr avances en la cuantificación hidrológica y la caracterización hidráulica en el sistema fluvial de estudio fue necesario utilizar equipamiento con alta resolución espacial y temporal siendo los Perfiladores Acústicos Doppler (ADCP por siglas en inglés) la tecnología que satisface estos requerimientos. A pesar de los grandes avances que se han realizado en los últimos años en la implementación de esta técnica, todavía quedan aspectos de su implementación que requieren mayor investigación. En esta tesis se realizan contribuciones originales relacionadas a: a) la determinación del tiempo óptimo de registro en mediciones estacionarias de caudal con ADCP, b) la estimación de la incertidumbre en mediciones de caudal con ADCP desde plataformas móviles mediante el uso de métodos computacionales y c) la evaluación interinstitucional de métodos y técnicas experimentales a través de Regatas de Medición de caudal.

En lo que se refiere específicamente a la cuantificación hidrológica, en esta tesis se realizan contribuciones importantes a la información hidrológica existente en el sistema fluvial (260 mediciones de caudal en 66 campañas) que permitieron generar herramientas para la gestión del recursos hídrico superficial en la cuenca como curvas que relacionan los valores de altura de superficie libre y caudal (H-Q) en los principales tributarios, verificación de la capacidad de los órganos de descarga de las principales presas del sistema y determinación de las capacidad de escurrimiento de los cauces. La principal contribución original en este aspecto está referida a la evaluación en el sistema fluvial de estudio de la "Rugosidad inducida por la presencia de formas de fondo" ya que esta rugosidad afecta significativamente a las relaciones H-Q. En esta tesis se genera una nueva ecuación para determinar la rugosidad generada por formas de fondo partiendo de la base física que la resistencia por forma de fondo es generada por el arrastre que producen las mismas al flujo. Además, se propone una nueva metodología para determinar en campo los efectos de la rugosidad de las formas de fondo sobre el flujo (para su óptima parametrización) en base a medición de perfiles de velocidad con ADCP. Todos los desarrollos propuestos han sido evaluados con datos registrados específicamente en el sistema fluvial de estudio.

En relación con la caracterización hidráulica del flujo, en esta tesis las principales contribuciones están relacionadas a la evaluación de los procesos de mezcla en una confluencia fluvial en ríos con diferente densidad en el sistema fluvial de estudio (confluencia de los Ríos Tercero y Saladillo). Esta confluencia presenta características particulares que resaltan las contribuciones realizadas en esta tesis: a) esta confluencia se produce en una curva; b) en esta confluencia las diferencias en densidades son producidas por los minerales disueltos en el agua por lo que presenta las mayores diferencias en condiciones de estiaje (con menores relaciones de momento entre los tributarios), poco común de observar. También se realizan contribuciones originales en la Determinación del Coeficiente de Dispersión Longitudinal en base a mediciones con ADCP de perfiles transversales de velocidad longitudinal. Así es posible realizar una cuantificación de este coeficiente utilizando información registrada en las 260 mediciones de campo realizadas con ADCP en el sistema fluvial de estudio para condiciones de aguas bajas, medias y altas por lo que fue posible evaluar su comportamiento a medida que las condiciones de flujo cambian. Finalmente, y no menos importante se realizan actividades de divulgación social de los resultados obtenidos y las problemáticas observadas.

**Palabras Claves:** río Carcarañá, ADCP, métodos experimentales, hidrodinámica.





---

# ADVANCES IN HIDROLOGICAL QUANTIFICATION AND HYDRAULIC CHARACTERIZATION OF THE FLOW IN THE CARCARAÑÁ RIVER SYSTEM USING ADCP.

---

## Abstract:

The hydrological quantification of the Carcarañá River basin is important for the sustainable management of the surface water resource in the basin. To carry on this quantification, measure the surface flow discharge of the different tributaries in low, medium and high-water conditions (flood) is needed. About hydraulic characterization, although the basic principles of open channel hydraulics and sediment transport related to flow in straight and uniform channels are well-known, hardly ever are appropriate for natural channels where there are complex structures to analyze. In particular, not enough research is available for typical complex situations that occur in rivers and natural channels such as confluences. The complex hydrodynamics of flows in natural channels also affects seriously the mixing processes and make the equations reported in the previous works have important shortcomings in some cases due to they were developed in laboratories or for natural channels with different characteristics of the river system analyzed.

To achieve advances in hydrological quantification and hydraulic characterization in the fluvial study system, it was necessary to use equipment with high spatial and temporal resolution. The Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP) are the technology that meets these requirements. Despite the great advances in recent years on the implementation of this technique, there are still aspects of its implementation that need further research. In this thesis, original contributions are made related to: a) the determination of the optimal sampling time in stationary flow measurements with ADCP, b) the estimation of the uncertainty in flow measurements made with ADCP from tethered boat through the use of computational methods and c) the inter-institutional evaluation of experimental methods and techniques through field inter-laboratory experiments called Regattas.

With regard to hydrological quantification, an important contribution to the hydrological information existing in the fluvial system (260 flow discharge measurements in 66 field works) was made. The recorded data have allowed to generate tools to support the management of surface water resources in the basin. The tools generated are rating curves in the main tributaries, verification of the capacity of the discharge of the valves and spillways of the main dams of the system and determination of over flood capacity of the channels. The main original contribution in this aspect is related to the evaluation in the fluvial system of "Roughness induced by the presence of bed forms" since this roughness affects significantly the rating curves. In this thesis a new equation is generated to determine the roughness generated by bed forms considering the flow resistance is generated by the drag that they produce to the flow. Also, a new methodology is proposed to determine in the field the effects of the roughness produced by the bed form on the flow (for optimal parametrization) based on the measurement of velocity profiles with ADCP. All the proposed developments have been evaluated with data recorded specifically in the fluvial study system.

In relation to the hydraulic characterization of the flow, in this thesis the main contributions are related to the evaluation of the mixing processes in a fluvial confluence in rivers with different density in the study fluvial system (confluence of the Tercero and Saladillo Rivers). This confluence has particular characteristics that highlight the contributions made in this thesis: a) this confluence occurs in a bend; b) there are density differences produced by the dissolved minerals in the water. These density differences are very important in low water conditions (with lower moment relationships), which is uncommon to observe. Original contributions are also made in the Estimation of the Longitudinal Dispersion Coefficient using ADCP measurements of transversal velocity profile. The methodology developed allow to perform an estimation of this coefficient using information recorded in the 260 field measurements made with ADCP in the fluvial study system for low, medium and flood conditions, so it was possible to evaluate their behavior as the conditions of flow change. Finally, and not least, social outreach activities are carried out on the results obtained and the problems observed.

**Key words:** Carcarañá River, ADCP, Experimental methods, Hydrodynamics



---

# AVANÇOS NA QUANTIFICAÇÃO HIDROLOGICA E CARACTERIZAÇÃO HIDRAULICA DO FLUXO NO SISTEMA DO RIO CARCARAÑÁ UTILIZANDO ADCP

---

## Resumo.

Quantificação hidrológica de escoamento no sistema do rio Carcarañá é fundamental para a gestão sustentável dos recursos hídricos superficiais da bacia sendo a variável de interesse para quantificar o fluxo de superfície drenada pelos rios em diferentes condições de água baixa, média e alta (crescido).

No que diz respeito à caracterização hidráulica, embora os princípios básicos da hidráulica de canal aberto e o transporte de sedimentos relacionados ao fluxo em canais retos e uniformes sejam suficientemente conhecidos, eles nem sempre são apropriados para canais naturais onde eles apresentam estruturas complexas e complicadas para analisar. Em particular, não há pesquisa suficiente disponível para situações complexas típicas que ocorrem em rios e canais naturais, como confluências. Hidrodinâmicas complexas possuindo fluxos em fluxos naturais também afeta significativamente os processos de mistura e fazer as equações desenvolvidas na literatura revelar falhas graves, em alguns casos, porque eles foram desenvolvidos nos laboratórios ou canais naturais com características diferentes das do sistema de estudo.

Para avançar na quantificação estudo caracterização hidrológica e hidráulica do sistema fluvial foi necessário o uso de equipamentos com tecnologia que satisfaça estes requisitos de alta resolução espaciais e temporais. Para isso, é utilizado um perfilhador de corrente acústica Doppler. Apesar dos grandes avanços que vêm sendo feitos nos últimos anos na implementação dessa técnica, ainda existem aspectos de sua implementação que exigem maior investigação. Esta tese contribuições originais relacionadas com realizada: a) determinar o tempo de gravação ótima em medições de fluxo estacionários com ADCP, b) estimar as medições de fluxo de incerteza com ADCP de plataformas móveis utilizando métodos computacionais c) a avaliação interinstitucional de métodos e técnicas experimentais através de Regatas de Medição de Velocidade.

No que se refere especificamente a quantificação hidrológico nesta tese importantes contribuições para a informação de água existente no sistema fluvial (260 medições de fluxo em 66 campanhas) que permitiu ferramentas para gerenciar recursos hídricos superficiais da bacia são feitas como curvas relativas os valores de altura e de fluxo livre de superfície (HQ) no afluente principal, a verificação da capacidade dos elementos de escoamento de reservatórios principais do sistema e determinando a capacidade de descarga dos canais. A principal contribuição original a este respeito é baseada na avaliação no estudo do sistema fluvial de "induzida pela presença de fundo molda rugosidade" uma vez que este rugosidade afeta significativamente as relações H-Q. Nesta tese, uma nova equação é gerada para determinar a rugosidade gerada pelas formas de fundo, a partir da base física, que a resistência por forma inferior é gerada pelo arrasto que elas produzem para o fluxo. Além disso, uma nova metodologia é proposta para determinar em campo os efeitos da rugosidade das formas inferiores no fluxo (para a parametrização ótima) com base na medição dos perfis de velocidade com ADCP. Todos os desenvolvimentos propostos foram avaliados com dados registrados especificamente no sistema de estudo fluvial.

Em conexão com a caracterização do fluxo hidráulico, nesta tese dos principais contributos estão relacionados com a avaliação dos processos de mistura em uma confluência rio em rios com densidade diferente no estudo do sistema rio (confluência do terceiro e Saladillo). Esta confluência tem características particulares que destacam as contribuições feitas nesta tese: a) essa confluência ocorre em uma curva; b) neste diferenças na densidade de confluência eles são produzidos pelos minerais dissolvidos na água e, portanto, tem as maiores diferenças nas condições de baixo de água (com rácios mais baixos de tempo entre imposto), raro observar. Contribuições originais também são feitas na Determinação do Coeficiente de Dispersão Longitudinal com base nas medições do ADCP dos perfis longitudinais transversais de velocidade. Isto é possível uma quantificação deste parâmetro usando informações registradas nas 260 medições de campo feito com ADCP nas condições do estudo sistema de rio de baixa água, médio e alto tornando possível avaliar o seu desempenho como condições de mudança de fluxo. Finalmente, e não menos importante, são realizadas atividades de sensibilização social sobre os resultados obtidos e os problemas observados.

**Palavras chaves:** Rio Carcarañá, ADCP, métodos experimentais, hidrodinâmica.



---

## ÍNDICE

---

<b>Capítulo I: MARCO REFERENCIAL DE LA TESIS .....</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción .....	2
1.2. Área de estudio: Cuenca del Río Carcarañá .....	3
1.2.1. Principales características de la cuenca .....	3
1.2.2. Breve descripción de los principales tributarios. ....	5
1.2.3. Actualización del trazado de cuenca.....	7
1.3. Problemática existente en el área de estudio .....	8
1.3.1. Conocimiento limitado del concepto de cuenca como territorio para la gestión sustentable del recurso hídrico.....	8
1.3.2. Falta de información y de herramientas para apoyo a la gestión de los recursos hídricos.....	8
1.3.3. Existencia de vertido de efluentes y desconocimiento de la intensidad de los procesos de mezcla en los tributarios. ....	10
1.3.4. Conocimiento limitado de los procesos de transporte de sedimentos y su influencia en la hidrodinámica del sistema fluvial.....	10
1.4. Técnicas experimentales disponibles en el estado del arte para la caracterización hidrológica e hidráulica en el sistema fluvial.....	11
1.4.1. Introducción.....	11
1.4.2. Descripción del ADCP .....	11
1.4.3. Metodología experimental.....	13
1.4.4. Áreas de que requieren mayor investigación .....	14
1.5. Motivación Científico-Tecnológica .....	17
1.6. Objetivos .....	18
1.6.1. Objetivo General .....	18
1.6.2. Objetivos específicos.....	18
1.7. Metodología .....	19
<b>Capítulo II: DESARROLLO Y OPTIMIZACIÓN DE TÉCNICAS Y MÉTODOS EXPERIMENTALES REQUERIDOS PARA EL REGISTRO DE DATOS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS EN EL SISTEMA FLUVIAL DE ESTUDIO ...</b>	<b>21</b>
2.1. Introducción .....	22

2.2.	Determinación del tiempo óptimo de registro en mediciones estacionarias de caudal con ADCP .....	24
2.2.1.	Introducción.....	24
2.2.2.	Metodología.....	25
2.2.3.	Resultados.....	28
2.3.	Procesamiento con QRev de datos de caudales registrados con ADCP desde plataformas móviles.....	32
2.3.1.	Introducción.....	32
2.3.2.	Metodología.....	35
2.3.3.	Resultados.....	36
2.4.	Estimación de la incertidumbre en mediciones de caudal con ADCP desde plataformas móviles mediante el uso de métodos computacionales.....	50
2.4.1.	Introducción.....	50
2.4.2.	Metodología.....	52
2.4.3.	Resultados.....	58
2.4.4.	Análisis de los resultados .....	58
2.5.	Evaluación interinstitucional de métodos y técnicas experimentales para medición de caudales en el sistema de estudio a través de Regatas de Medición de caudal.....	62
2.5.1.	Introducción.....	62
2.5.2.	Objetivos de la Regata .....	63
2.5.3.	Actividad experimental .....	64
2.5.4.	Resultados.....	75
<b>Capítulo III:</b>	<b>CUANTIFICACIÓN HIDROLÓGICA Y DESARROLLO DE HERRAMIENTAS PARA LA GESTIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EL SISTEMA FLUVIAL DE ESTUDIO .....</b>	<b>83</b>
3.1.	Introducción.....	84
3.2.	Cuantificación de caudales en la cuenca del Río Carcarañá .....	86
3.2.1.	Localización de los sitios de medición.....	86
3.2.2.	Resultados obtenidos de la cuantificación de caudales.....	87

3.2.3. Verificación de evacuación de estructuras de descarga de las presas del sistema .....	96
3.2.4. Determinación de la capacidad del cauce en diferentes secciones del sistema fluvial .....	99
3.2.5. Generación de Curvas Altura-Caudal en diferentes secciones del sistema fluvial del Río Carcarañá.....	101
3.3. Importancia de medir valores altos de caudal para la construcción de curvas Altura – Caudal .....	117
3.4. Rugosidad inducida por la presencia de formas de fondo.....	121
3.4.1. Introducción.....	121
3.4.2. Expresiones para el cálculo de la rugosidad equivalente .....	123
3.4.3. Método de cálculo de la rugosidad equivalente utilizando perfiles de velocidad.....	126
3.4.4. Resultados de la rugosidad equivalente obtenidos con la Ec. 26 y Ec. 18 ....	127
3.4.5. Resultado de la rugosidad equivalente mediante mediciones de perfiles de velocidad.....	129
3.5. Herramientas para la gestión del recurso hídrico en la cuenca de estudio.....	131
3.5.1. Determinación de hidrogramas en diferentes secciones del sistema fluvial de estudio.....	131
3.5.2. Modelación hidráulica de los tramos urbanos de las ciudades de Villa María y Bell Ville.....	133
<b>Capítulo IV: CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DE FLUJOS COMPLEJOS EN EL SISTEMA FLUVIAL DEL RÍO CARCARAÑÁ PARA CUANTIFICAR LOS PROCESOS DE MEZCLA .....</b>	<b>137</b>
4.1. Introducción .....	138
4.2. Determinación del Coeficiente de Dispersión Longitudinal con ADCP. ....	138
4.2.1. Introducción.....	138
4.2.2. Metodología.....	140
4.2.3. Resultados.....	146
4.3. Evaluación de los procesos de mezcla en una confluencia fluvial en curva con ríos con diferente densidad. ....	154

4.3.1. Introducción.....	154
4.3.2. Área de Estudio y Metodología .....	157
4.3.3. Resultados.....	162
4.3.4. Análisis de los resultados .....	175
<b>Capítulo V: CONCLUSIONES .....</b>	<b>179</b>
5.1. Introducción .....	180
5.2. Principales conclusiones y contribuciones originales en relación con el desarrollo y optimización de técnicas y métodos experimentales.....	181
5.3. Principales conclusiones y contribuciones originales en relación con la cuantificación hidrológica y desarrollo de herramientas para la gestión del recurso hídrico superficial en la cuenca del río Carcarañá.....	185
5.4. Principales conclusiones y contribuciones originales en relación con la caracterización hidrodinámica de flujos complejos en el sistema fluvial del río Carcarañá para cuantificar los procesos de mezcla.....	186
<b>ANEXO .....</b>	<b>189</b>
6.1. Introducción .....	190
6.2. Breve descripción proyecto MATTEO y su relación con esta tesis. ....	191
6.3. Breve descripción del proyecto Adopto un cuerpo de agua como mi mascota y su relación con esta tesis.....	195
6.4. Breve descripción del curso de capacitación docente Escuela del Agua.....	198
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>201</b>

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1.: Cuenca del río Carcarañá junto a sus principales tributarios (Fuente: Elaboración propia).....	4
Figura 2.: Principales subcuencas de la cuenca del Río Carcarañá. Cuencas obtenidas con modelo digital del terreno de STRM 30mx30m corregido por IGN e inspecciones visuales de la cuenca. ....	5
Figura 3.: Cuenca definida por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SSRH, 2010) y la cuenca actual definida en el marco de las bases para el plan director.7	7



Figura 4.: Imágenes de perfiladores acústicos Doppler. A) RDI Río Grande, B) RDI RiverPro, C) RDI RiverRay, E) YSI/SonTek M9 y F) YSI/SonTek M9. ....	11
Figura 5.: Esquema de funcionamiento del ADCP.....	13
Figura 6.: (A) medición desde plataforma móvil. Se deben hacer un numero par de transecta totalizando un tiempo total de medición de 720 segundos. (B) medición desde plataforma fija, se realiza un numero de verticales (ver puntos en la figura) y luego se calcula el caudal.....	14
Figura 7.: Diagrama esquemático del método MBB para una determinada serie utilizando una longitud de tres datos por bloque. Los puntos negros representan la serie original mientras que los blancos la nueva serie generada (fuente: García et al., 2006).25	25
Figura 8.: Comparación entre los coeficientes de variación (CV) de las señales de velocidad obtenidas utilizando 50 señales y 1000 señales respectivamente. Las líneas punteadas definen los umbrales superior e inferior ( $\pm 1$ unidad de CV).....	27
Figura 9.: Coeficiente de variación (CV) por vertical para el conjunto de datos número 5. ....	29
Figura 10.: Convergencia de la media con un intervalo 5% alrededor de la media final en la vertical 17 (izquierda) y comparación de velocidades entre el perfil 14 con bajo CV y el 17 con alto CV (derecha).....	30
Figura 11.: Valores de velocidad error por celda. En rojo está marcada la vertical 16 que posee los valores más altos de velocidad error .....	30
Figura 12.: Comparación de los valores de CV obtenidos con la técnica MBB y el umbral de CV definido por ISO 748/2007 para mediciones puntuales a 60% de la profundidad con 30 segundos de medición.....	32
Figura 13.: Interfaz Gráfica del programa computacional QRev.....	34
Figura 14.: Comparación de procesamiento del mismo conjunto de datos con la metodología de RiverSurveyor live (YSI/SonTek) y WinRiver II (RDI) .....	34
Figura 15.: QRev muestra explícitamente los errores cometidos. En la parte superior de la figura se muestra que el programa RiverSurveyor Live no indica adecuadamente que se está cometiendo un error grave por pérdida de referenciación del bote mientras que en QRev se puede ver este error de manera muy clara. ....	35

Figura 16.: Comparación de los caudales resultantes de procesar las mediciones utilizando los programas Qrev y RiverSurveyor Live. Las mediciones fueron realizadas con un ADCP YSI/SonTek S5. Líneas punteadas representan los intervalos de $\pm 10\%$ de variación .....	37
Figura 17.: Comparación de los caudales resultantes de procesar las mediciones utilizando los programas Qrev y RiverSurveyor Live para el rango de caudales entre 100 y 400 m <sup>3</sup> /s. Las mediciones fueron realizadas con un ADCP YSI/SonTek S5. Líneas punteadas representan los intervalos de $\pm 5\%$ de variación. ....	37
Figura 18.: Relación entre la diferencia porcentual existente entre los valores de caudal obtenidos del procesamiento con QRev y Riversurveyor Live (RSL) de mediciones con sistema de referemcia óptimo y de fondo (BT) y el porcentaje de caudal que escurre en las muestras invalidas para los datos procesados con QRev utilizando el sistema de referencia por seguimiento de fondo.....	38
Figura 19.: Evolución de la diferencia porcentual de áreas de flujo estimadas con QRev y RiverSurveyor Live (RSL), ambos utilizando el sistema de referencia por seguimiento de fondo con el porcentaje de caudal que escurren en las muestras inválidas. ....	39
Figura 20.: Diferencia porcentual entre el caudal obtenido con QRev para la configuración optima y el porcentaje de caudal que escurre en las muestras invalidas para datos procesados con QRev y RiverSurveyor utilizando el sistema de referenciación GPS. ....	40
Figura 21.: Evolución de la diferencia porcentual de áreas de escurrimientos obtenidas al procesar las mediciones con QRev y RiverSurveyor Live (ambos utilizando el sistema de referencia GPS) con el porcentaje de caudal que escurre en las muestras invalidas. ....	41
Figura 22.: Diagrama de flujo del programa QUant y cálculo de la incertidumbre en el caudal (Fuente: Moore et al., 2016) .....	53
Figura 23.: Diagrama de flujo del método de análisis de incertidumbre propuesto para las mediciones de caudal de múltiples transectas. ....	56
Figura 24.: Contribución a la varianza total de cada variable analizada a la sección del río Tercero ubicada en la localidad de Bell Ville.....	59
Figura 25.: Contribución a la varianza total de cada variable analizada a la sección del río Saladillo ubicada en el puente de ruta 6. ....	60

Figura 26.: Contribución a la varianza total de cada variable analizada a la sección del arroyo Tortugas en el puente de ruta 9. ....	61
Figura 27.: Miembros de las instituciones participantes en la Regata de medición realizada en Villa María. ....	65
Figura 28.: Instrumentales utilizados en la regata. (A) ADCP SonTek M9; (B) ADCP SonTek S5; (C) ADCP RDI RiverRay; (D) ADCP RDI Rio Grande; (E) SonTek FlowTracker 1; (F) SonTek FlowTracker 2; (G) OTT ADC; (H) Mavic Pro DJI; (I) Phantom 4 DJI. ....	66
Figura 29.: Ubicación del sitio de medición donde se realizó la primera regata de medición de Argentina. ....	68
Figura 30.: Ubicación de las de medición con ADCP (línea continua). La línea trazo fue la utilizada por las personas que realizaron aforos por vadeo con ADV. ....	69
Figura 31.: La patrulla del río del Gobierno de la Provincia de Córdoba estuvo colaborando con la seguridad de los operarios que ingresaron al río. Puede verse que todas las personas poseen salvavidas y son escoltadas por un miembro de dicha institución. ....	70
Figura 32.: Caudal promedio e intervalo de confianza 95% según las mediciones con ADCP de las diferentes instituciones. Además, se graficaron las líneas de $\pm 10\%$ respecto del caudal medio de todas las mediciones con ADCP. ....	76
Figura 33.: Campos promedio de velocidad superficial obtenidos por PIVLab para ambos videos. ....	80
Figura 34.: Comparación entre las diferentes determinaciones de caudal con diferentes técnicas de medición en diferentes secciones en el Puente Alberdi de Villa María. ....	81
Figura 35.: Localización de las secciones de medición. ....	88
Figura 36.: Canal de fuga de la central Fitz Simon donde se realizaron los aforos mostrados en la Tabla 25. La foto corresponde a las mediciones efectuadas el día 26/02/2015. ....	98
Figura 37.: Contraste entre los caudales estimados mediante datos de potencia generada por la central Piedras Moras y los caudales medidos en el Río Tercero (Ctalamochita) en las secciones emplazadas el Balneario de la ciudad de Río Tercero y en Villa Ascasubi. ....	99

Figura 38.: Condiciones de flujo de los ríos al momento de determinar la capacidad de los cauces. ....	101
Figura 39.: Esquema de un canal rectangular donde se representa el nivel de superficie libre registrado respecto a un nivel de referencia arbitrario (H) y el nivel caudal nulo ( $H_{Q0}$ ). ....	102
Figura 40.: Curva altura-caudal para el Río Tercero (Ctalamochita) en el puente de ingreso a la localidad de Villa Ascasubi. Los niveles de superficie libre están referenciados a la escala existente en una de las pilas del puente. ....	104
Figura 41.: Curva altura-caudal del Río Tercero (Ctalamochita) en el Puente Alberdi de Villa María. Los niveles de superficie libre están referenciados a la escala existente en una de las pilas del puente. ....	106
Figura 42.: Curva altura-caudal para el Río Tercero (Ctalamochita) en el puente Sarmiento de la localidad de Bell Ville. Los niveles de superficie libre están referenciados a la escala existente en una de las pilas del puente. ....	107
Figura 43.: Curva altura-caudal del Río Tercero (Ctalamochita) en el puente Sturla de la localidad de Bell Ville. Los niveles de superficie libre están referenciados a la escala existente en una de las pilas del puente. ....	108
Figura 44.: Curva altura-caudal del Río Tercero (Ctalamochita) en el Azud San Marcos. Los niveles de superficie libre están referenciados a la escala existente en el azud. ....	109
Figura 45.: Curva altura-caudal del Río Carcarañá en el puente Ruta 12 en las cercanías de Inriville. Los niveles de superficie libre se encuentran referenciados a un nivel de 5,5 m por debajo del nivel inferior de viga. ....	111
Figura 46.: Curva altura-caudal del río Carcarañá en el puente Ruta 15 en las cercanías de Cruz Alta. ....	112
Figura 47.: Curva altura-caudal del río Saladillo en la localidad homónima. ....	114
Figura 48.: Curva altura-caudal Arroyo Tortugas canal central. ....	115
Figura 49.: Curva altura-caudal Pueblo Andino. ....	116
Figura 50.: Diferencia porcentual entre los caudales respecto al valor estimado para el mismo tiempo de retorno a partir de la serie de Caudales Máximos instantáneos (QMI) en relación al tiempo de retorno del máximo evento aforado en la H-Q. ....	118

Figura 51.: Error relativo respecto a la HQ ajustada con todos los datos (incluyendo valores extremos) y la HQ ajustada utilizando datos hasta determinado nivel (Curvas HQ <sub>1</sub> y HQ <sub>2</sub> ).....	120
Figura 52.: Campo de velocidades para la condición N°1 Q: 113 m <sup>3</sup> /s. Velocidades en m/s .....	121
Figura 53.: Campo de velocidades para la condición N°2 Q: 65 m <sup>3</sup> /s. Velocidades en m/s .....	122
Figura 54.: Campo de velocidades para la condición N°3 Q: 25 m <sup>3</sup> /s (modulo del río). Velocidades en m/s .....	122
Figura 55.: Campo de velocidades para la condición N°4 Q: 18 m <sup>3</sup> /s. Velocidades en m/s .....	122
Figura 56.: Ecuación de rugosidad equivalente generada por arrastre de dunas reportada Van Rijn (1982).....	124
Figura 57.: Ecuaciones de rugosidad equivalente generada por arrastre de dunas. En línea de puntos la Ec. 18 (Van Rijn,1982) y con línea de guiones la ecuación presentada en esta tesis (Ec. 26).....	126
Figura 58.: ks generado por el arrastre de las formas de fondo vs ks generado por la rugosidad del grano.....	128
Figura 59.: Ajustes realizados para cada uno de los perfiles promedios obtenidos de las mediciones estacionarias. A: Condición 1; B: Condición 2; C: condición 3 D: Condición 4. ....	129
Figura 60.: Valores de $k_{sforma}/\Delta$ vs $\Delta/\lambda$ graficados junto a los valores de Van Rijn (1982) .....	131
Figura 61.: Hidrograma de crecida registrado en las secciones de Bell Ville (P. Sturla), Villa María y Piedras Moras durante los eventos de los años 2014 y 2015. ....	132
Figura 62.: Hidrograma de Cruz Alta determinado mediante la curva altura caudal. Se adjuntan también puntos medidos por la Secretaria de Recursos Hídricos de Santa Fe y CETA – UNC.....	132
Figura 63.: Hidrograma del río Saladillo generada con la curva Altura-Caudal. ....	132
Figura 64: Modelo digital de elevación del terreno del tramo aguas arriba del azud de la Ciudad de Villa María hasta el puente de la ruta Nacional 158. ....	134

Figura 65: Campo de profundidades a lo largo del tramo Villa María para el caudal de 375 m <sup>3</sup> /s - HEC RAS 2D. En la figura también se muestra una imagen área del Barrio Vista Verde, seriamente afectada por la inundación de febrero de 2014. ....	134
Figura 66: Campo de velocidades a lo largo del tramo Villa María para el caudal de 375 m <sup>3</sup> /s - HEC RAS 2D (Con escala de velocidades en m/s).....	135
Figura 67: Área de inundación de la ciudad de Bell Ville, modelado con Hec-Ras 1D. Puede observarse una imagen durante el paso del pico por Bell Ville (marzo de 2014) que muestra una muy buena correspondencia del área inundada observada y la simulada. ....	136
Figura 68.: Perfiles transversales de velocidades medias en la vertical obtenidos variando los valores de los coeficientes $\alpha = \beta$ en la Ec. 34. ....	142
Figura 69.: Distribuciones transversales de profundidades obtenidas utilizando distintos valores del parámetro $\alpha$ la Ec. 35. ....	143
Figura 70.: Valores del coeficiente de dispersión longitudinal (D) estimados en las diferentes secciones analizadas con la Ec. 33. ....	150
Figura 71.: Valores del coeficiente de dispersión longitudinal reportados por Rutherford (1994), Deng (2001), Carr y Rehmann (2007), Shen (2010) y estimados en las diferentes secciones del sistema de estudio analizadas con la Ec. 33.....	151
Figura 72.: Valores Discrepancia de los valores de coeficiente de dispersión longitudinal estimados con las ecuaciones empíricas y los obtenidos mediante la Ec. 32 (Fischer et al.; 1979) con una caracterización hidrodinámica detallada.....	153
Figura 73.: Modelo conceptual de la estructura de flujo de una confluencia en curva (adaptado de Roberts, 2004).....	156
Figura 74.: Confluencia de los ríos Tercero y Saladillo. La imagen satelital fue tomada el 14/10/2013. Se ilustra la trayectoria recorrida para el levantamiento batimétrico, puntos de medición con CTD y las secciones transversales donde se midió con ADCP.....	158
Figura 75.: Conductividad vs caudal de los ríos Tercero y Saladillo (fuente: Díaz Lozada, 2014 y actualizada con datos hasta noviembre de 2016 provistos por la Secretaria de Recursos Hídricos de la Pcia. de Cba). ....	160
Figura 76.: Perfiles de conductividad, temperatura y densidad del agua medidos en los ríos Tercero y Saladillo (puntos P1 y P2, ver Figura 74).....	163

Figura 77.: Batimetría de la confluencia. ....	164
Figura 78.: Velocidad promediada en la vertical en la zona de la confluencia de los ríos Tercero y Saladillo. ....	167
Figura 79.: Velocidad promediada en la vertical en dos regiones de flujo. (A) Desde la superficie hasta 1,2 m y (B) desde 1,2 hasta el fondo del lecho. ....	168
Figura 80.: Dirección del flujo respecto a la dirección principal media del flujo en cada sección transversal .....	169
Figura 81.: Magnitud de velocidad y vectores de corrientes secundarias calculadas con el método ZSD en cada sección transversal.....	170
Figura 82.: Perfiles de conductividad eléctrica y temperatura registrados con sonda CTD en diferentes sitios aguas abajo de la confluencia (ver la Figura 74 para localizaciones). ....	173
Figura 83.: Imágenes de la confluencia de los ríos Tercero (Ctalamochita) y Saladillo los días: (A) 17/06/2016, con mediciones de campo el 07/06/2016; (B) 12/03/2016, con mediciones de campo el 08/03/2016 y (C) 04/11/2016, con mediciones de campo el 08/11/2016. ....	176
Figura 84.: Logo del proyecto educativo Matteo, generado por los estudiantes. ....	191
Figura 85.: Estación meteorológica entregada a cada escuela integrante del proyecto.	192
Figura 86.: Los contenidos del proyecto pueden ser fácilmente adaptado a todos los niveles educativos. En la figura se está trabajando en el ciclo del agua con estudiantes de sala de 3, 4 y 5 años. ....	192
Figura 87.: Estaciones meteorológicas de la red Matteo al mes de abril de 2018. ....	195
Figura 88.: Analogía entre el cuidado responsable de las mascotas y el cuidado de los recursos hídricos.....	196
Figura 89.: Libro adopto un tramo de arroyo como mi mascota .....	197
Figura 90.: Maqueta de la cuenca Huahuas Mayún. ....	198
Figura 91.: Logotipo de la escuela del agua. El programa inicio en 2017 con una única capacitación, en 2018 se están dando cuatro capacitaciones en simultaneo y en los próximos años busca extenderse aún más.....	200
Figura 92.: Maquetas de las cuencas de estudio (A) Cuenca Alta de río Tercero, (B) Cuenca del Lago San Roque y (C) Cuenca del Río Carcarañá.....	200

---

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1.: Localización de las estaciones utilizadas para el desarrollo de la herramienta.	28
Tabla 2.: Datos de las mediciones estacionarias utilizadas para el desarrollo de la herramienta.	28
Tabla 3.: Tiempo de medición continuo utilizando 40 segundos por vertical y el tiempo de medición que habría sido requerido si se hubiese aplicado MBB.	32
Tabla 4.: Comparación entre resultados del procesamiento de datos obtenidos con QRev y RiverSurveyor Live con la configuración optima.	43
Tabla 5.: Resultados obtenidos con QRev seleccionado como sistema de referencia el sistema de seguimiento de fondo (Bottom Track, BT)	44
Tabla 6.: Resultados obtenidos con RiverSurveyor Live seleccionado como sistema de referencia el sistema de seguimiento de fondo (Bottom Track, BT).	45
Tabla 7.: Resultados obtenidos de la comparación de los caudales obtenidos con QRev BT, QRev con configuración optima y RiverSurveyor live BT	46
Tabla 8.: Resultados obtenidos con QRev seleccionado como sistema de referencia el GPS	47
Tabla 9.: Resultados obtenidos con RiverSurveyor Live seleccionado como sistema de referencia el sistema GPS	48
Tabla 10.: Resultados obtenidos de la comparación de los caudales obtenidos con QRev GPS, QRev con configuración optima y RiverSurveyor live GPS	49
Tabla 11.: Variables que cambian en cada pulso, transecta y medición junto al desvío estándar que utilizan en QUant	54
Tabla 12.: Base de datos utilizada para la aplicación del QUant a los tributarios del río Carcarañá.	56
Tabla 13.: Equipamiento utilizado por cada institución y la cantidad de participantes.	66
Tabla 14.: Características técnicas de los Perfiladores de Corriente Acústicos Doppler (ADCP) utilizados en la regata.	66
Tabla 15.: Características técnicas de los velocímetros acústicos doppler (ADV - ADC) utilizados en la regata.	67



Tabla 16.: Instrumentos utilizados para las técnicas de Velocimetría por imágenes.....	67
Tabla 17.: Metodología a implementar para realizar mediciones con ADCP (traducido y adaptado de Mueller et al., 2013) .....	70
Tabla 18.: Aspectos a tener en cuenta durante la medición (traducido y adaptado de Mueller et al., 2013) .....	73
Tabla 19.: Resultado del caudal de flujo medido con perfiladores acústicos en la sección XS4.....	76
Tabla 20.: Resultado de las mediciones con velocímetros acústicos en la sección XS1 ..	79
Tabla 21.: Características de la extracción de imágenes.....	80
Tabla 22.: Resultado del caudal de flujo medido con LSPIV.....	80
Tabla 23.: Resultados de las campañas de aforos realizadas en la cuenca del río Carcarañá.....	90
Tabla 24.: Resultados de las campañas de aforos realizadas en canales rurales que se encuentran dentro de la cuenca del río Carcarañá. ....	96
Tabla 25.: Capacidad de evacuación de los órganos de descarga de la presa de río Tercero. ....	97
Tabla 26.: Capacidad del cauce en las diferentes secciones de medición.....	99
Tabla 27.: Error relativo respecto a la HQ ajustada con todos los datos (incluyendo valores extremos) y la HQ ajustada utilizando datos hasta determinado nivel (Curvas HQ <sub>1</sub> y HQ <sub>2</sub> ).....	119
Tabla 28.: Condiciones analizadas en el río Tercero (Ctalamochita).....	123
Tabla 29.: Resultados del cálculo de la rugosidad equivalente con formas de fondo utilizando la Ec. 36. ....	127
Tabla 30.: Resultados del cálculo de la rugosidad equivalente por formas de fondo utilizando la ecuación de Van Rijn (Ec. 28); Heredia, 2018 .....	128
Tabla 31.: Valores de $d$ , $u^*$ , $k_s$ y $n$ obtenidos del ajuste de perfiles potenciales de velocidad obtenidos de mediciones estacionarias realizadas con ADCP .....	130
Tabla 32.: Secciones transversales de medición seleccionadas para este estudio.....	140
Tabla 33.: Valores de los parámetros $a$ , $b$ y $c$ de la Ec. 49 calibrados por diferentes autores .....	145

Tabla 34.: Parámetros hidráulicos globales obtenidos de mediciones con ADCP. Se incluye además los parámetros representativos de la pendiente de cada tramo y de la granulometría del sedimento del lecho (D50).....	148
Tabla 35.: Coeficientes de dispersión longitudinal estimados con la ecuación integral de Fischer (1979) –Ec. 42- utilizando información experimental proveniente de una caracterización hidrodinámica detallada realizada con ADCP. ....	148
Tabla 36.: Coeficientes de dispersión longitudinal estimados con la Ec. 42 y utilizando ecuaciones empíricas (presentadas en Tabla 33) con parámetros hidráulicos globales determinados de las mediciones con ADCP en las distintas secciones de medición. ..	151
Tabla 37.: Parámetros hidráulicos de la confluencia en la campaña del 13/08/2013.....	162
Tabla 38.: Parámetros hidráulicos medidos aguas abajo de la confluencia y utilizados para calcular la longitud de mezcla teórica .....	171
Tabla 39.: Caudal y densidad de cada tributario de la confluencia (días 07/06/2016, 08/03/2016 y el 08/11/2016) .....	175

---

## DEFINICIONES, ACRONIMOS Y ABREVIATURAS

---

**A:** Área

**$\alpha$ :** Coeficiente de la distribución de velocidades teórica de Seo y Baek (2004)

**ADARSA:** Asociación de amigos del río San Antonio

**ADCP:** Perfilador de Corriente Acústico Doppler

**ADV:** Velocímetro Acústico Doppler

**ADC:** Correntómetro Acústico Doppler

**APRHI:** Administración Provincial de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba

**B:** Ancho de la sección

**B<sub>r</sub>:** Peso flotante del fluido que pasa a través de una sección transversal por unidad de tiempo

**b:** Ancho de la duna

**BT:** Sistema de referenciación por seguimiento de fondo (Bottom Track)

**b<sub>opt</sub>:** Tamaño de bloque optimo

**$\beta$ :** Coeficiente de la distribución de velocidades teórica de Seo y Baek (2004)

**C<sub>D</sub>:** Coeficiente de descarga de vertedero.

**C<sub>a</sub>:** Coeficiente de arrastre

**CETA:** Centro de Estudios y Tecnología del Agua de la FCEyN – UNC

**CIEGRI:** Centro Internacional de grandes ríos

**CIRSA:** Centro de Estudios de la Región Semiárida – Instituto Nacional del Agua

**Co.T.A.C:** Cooperativa de Trabajos Acueductos Centro Limitada.

**COOPI:** Cooperativa Integral Regional de Provisión de Servicios

**CTD:** Sonda de conductividad, temperatura y densidad

**CV:** Coeficiente de Variación

**D:** Coeficiente de Dispersión Longitudinal

**D<sub>90</sub>:** Tamaño de sedimento por el cual el 90% del material del lecho es más fino

**D<sub>50</sub>:** Tamaño de sedimento por el cual el 50% del material del lecho es más fino

**DGPS:** GPS diferencial

**d $\phi$ :** Diferencia de Fase

**dt:** Intervalo de tiempo entre 2 pulsos sucesivos o dos muestras correspondientes

**d:** Distancia arbitraria desde el fondo del cauce hasta el eje de referencia

**$\Delta$ :** Altura de duna

**EVARSA:** Evaluación de Recursos Hídricos S.A.

**ECM:** Error cuadrático medio

**$\varepsilon$ :** Constante de calibración curvas HQ. 1,67 para canales y 1,5 para vertederos.

**$\varepsilon$ :** Coeficiente de dispersión transversal

**$\varepsilon_v$ :** Coeficiente de dispersión vertical

**FCEyN:** Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

**FICH:** Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas – Universidad Nacional del Litoral

**FPS:** Cuadros por segundo

**Fr:** Número de Froude

**f:** Frecuencia de onda acústica

**GIS:** Sistema de Información Geográfica

**GPS:** Sistema de Posicionamiento Global

**g:** Aceleración de la gravedad

**$\gamma$ :** Coeficiente de la distribución teórica de profundidades de Deng et al. (2001)

**H:** Altura de superficie libre respecto a un nivel de referencia  
**H<sub>duna</sub>:** Altura de la duna  
**H<sub>max</sub>:** Profundidad máxima de la sección  
**H<sub>med</sub>:** Profundidad media de la sección  
**HQ:** Curvas Altura Caudal  
**H<sub>Q0</sub>:** Valor de superficie libre en donde el caudal es nulo para el nivel de referencia seleccionado  
**h:** Profundidad en una determinada vertical  
**h(y):** Profundidad de la vertical en la progresiva y  
 **$\eta$ :** Relación entre velocidad media y velocidad superficial  
**IDA:** Instituto Dante Alighieri  
**IGN:** Instituto Geográfico Nacional  
**IHLA:** Instituto de Hidrología de Llanuras  
**INA:** Instituto Nacional del Agua  
**INTA:** Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria  
**ISO:** Organización Internacional para la estandarización  
 **$\varphi$ :** Constante de calibración curvas HQ  
**K<sub>s</sub>:** Rugosidad de Nikuradse  
**K<sub>sforma</sub>:** Rugosidad de forma  
**K<sub>sgrano</sub>:** Rugosidad del grano  
 **$\lambda_p$ :** Longitud del pulso acústico  
 **$\lambda$ :** Longitud de duna  
**Lm:** Longitud de mezcla  
**LSPIV:** Velocimetría por imágenes de partículas a gran escala  
**M:** Numero de transectos  
**MAAySP:** Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos de la Provincia de Córdoba  
**MATTEO:** Monitoreo Automático del Tiempo en la Troposfera en Escuelas y Organismos  
**MATLAB:** Código de programación  
**MBB:** Moving Block Bootstrap  
**M<sub>r</sub>:** Relación de momentos  
**N:** Numero de iteraciones  
**NCAR:** Instituto Nacional de Estudios Atmosféricos de Estados Unidos  
**n:** Rugosidad de Manning  
**n<sub>forma</sub>:** Rugosidad de Manning por forma de fondo  
 **$\nu$ :** Viscosidad cinemática  
**OTT:** Fabricante de ADC  
**OSW:** Oficina de Agua Superficial del USGS (USGS - Office of Surface Water)  
**PDF:** Distribución de probabilidad  
**PPT:** Partes por mil  
**Q:** Caudal  
**Q<sub>e</sub>:** Caudal del tributario secundario  
**QMI:** Caudal máximo instantáneo  
**Q<sub>r</sub>:** Relación de caudales  
**QRev:** Programa para procesar datos medidos con ADCP desarrollado por el USGS.

**QUant:** Programa para hacer análisis de incertidumbre desarrollado por Water Service Canada y el USGS

**R:** Radio hidráulico

**R<sub>a</sub>:** Radio de la curva.

**Re:** Número de Reynolds

**RDl:** RD instruments, fabricante de ADCP.

**RSLive:** RiverSurveyor Live (programa para procesar datos de ADCP de YSI/SonTek)

**RSL:** RiverSurveyor Live (programa para procesar datos de ADCP de YSI/SonTek)

**RSU:** Incertidumbre relativa estándar.

**RTK:** Referenciación cinética satelital en tiempo real

**$\rho$ :** Densidad

**S:** Pendiente de energía

**$\sigma_{Qu}$ :** Desvío estandar de la distribución de probabilidad correspondiente a los caudales calculados por QUant para una transecta.

**SRH:** Secretaría de Recursos Hídricos de Santa Fe.

**SSRH:** Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación.

**T:** Periodo de retorno

**T<sub>x</sub>:** Escala integral de la señal de velocidad

**T<sub>y</sub>:** Tiempo de mezcla en la dirección trasversal

**T<sub>z</sub>:** Tiempo de mezcla en la dirección vertical.

**T<sub>m</sub>:** Tiempo de Medición.

**$\theta$ :** Coeficiente de Smeithlov (1990) para obtener el coeficiente de dispersión transversal

**U:** Velocidad media del flujo

**UCASAL:** Universidad Católica de Salta

**UNC:** Universidad Nacional de Córdoba

**UNCPBA:** Universidad del Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires

**UNL:** Universidad Nacional del Litoral

**UNSE:** Universidad Nacional de Santiago del Estero

**USGS:** Servicio Geológico de los Estados Unidos de América

**u:** Velocidad media en la vertical

**u(y):** Velocidad media en la vertical en la progresiva y

**u<sub>\*</sub>:** Velocidad de corte

**u<sub>Δ</sub>:** Velocidad en la cresta de la duna

**u<sub>p</sub>:** Valor de velocidad en el perfil logarítmico a una determinada distancia del eje de referencia

**u':** diferencia entre la velocidad media en la vertical y la velocidad media global de la sección

**Y:** Tirante medio de la sección

**YSI/SonTek:** Fabricante de ADCP y ADV

**y:** progresiva en la dirección transversal.

**$\Psi$ :** Relación entre altura y longitud de duna

**Var:** Varianza

**VMT:** Velocity Mapping Toolbox

**V<sub>s</sub>:** Velocidad superficial

**z:** Distancia del cero del sistema de referencia



---

**Capítulo I**  
**MARCO REFERENCIAL DE LA TESIS**

---

### **1.1. Introducción**

La disponibilidad de acceso al agua ha sido uno de los grandes impulsores del desarrollo de las civilizaciones antiguas. Los romanos construyeron grandes acueductos que les permitieron abastecer de agua potable a las ciudades, realizar riego y permitir su desarrollo, lo que los llevó a ser uno de los imperios más poderosos del mundo antiguo. Actualmente, la disponibilidad de agua en cantidad y calidad adecuada sigue siendo un motor clave para el desarrollo de un país. En los últimos 2 siglos la población mundial ha crecido vertiginosamente (de 1000 millones en el siglo XVI a 7000 millones en siglo XXI, Naciones Unidas, 2015), lo cual ha generado un crecimiento notable en el consumo de agua ya sea para uso doméstico, riego o industrias (Gleick, 2000). El ciclo del agua permite la renovación del agua en la tierra, por lo que se decía que la misma era un recurso renovable, pero el hombre consume esta agua a una tasa mayor que la que se regenera, por lo actualmente se considera a la misma como un recurso renovable con capacidad regeneradora finita (Dublin, 1992), lo que se traduce en una disponibilidad limitada de agua. Frente a esta problemática es fundamental llevar a cabo una gestión sustentable del recurso para poder satisfacer todas las demandas existentes, lo que exige una adecuada planificación y gestión del agua en la tierra.

La República Argentina se localiza en el subcontinente con más disponibilidad de agua per cápita del planeta (90.000 m<sup>3</sup> per cápita por año, Shiklomanov, 1998), pero el agua en el subcontinente tiene una distribución no homogénea concentrándose las mayores cantidades en la cuenca amazónica. A esto se le suma que, dentro del mismo territorio nacional, las mayores cantidades de agua se encuentran en la región del litoral y la pampa húmeda lo que representa un 25% del territorio del país. El 75% restante se encuentra en regiones con características áridas (Bertoni et al., 2004). Esta distribución desigual de la disponibilidad de agua supone un desafío importante para la gestión del agua, ya que la misma es necesaria para el desarrollo de todas las regiones del país ubicadas en esta zona semiárida.

En lo que respecta a la provincia de Córdoba, se dispone de un caudal superficial total aproximadamente de 200 m<sup>3</sup>/s escurridos en sistemas fluviales, de los cuales 100 m<sup>3</sup>/s pertenecen al río Dulce (Díaz, 2016) y su uso principalmente es para la preservación del Mar de Ansenúza (laguna de Mar Chiquita). De los 100 m<sup>3</sup>/s restantes (Díaz, 2016) deben satisfacerse las necesidades de 3 millones de habitantes (agua potable, riego,



industria, recreación, vertido de efluentes, etc.). De los 100 m<sup>3</sup>/s mencionados anteriormente, aproximadamente el 50% de ese caudal escurre por el río Carcarañá, por lo que esta cuenca es muy importante a nivel provincial, es por ello que se ha seleccionado como cuenca de estudio de esta tesis.

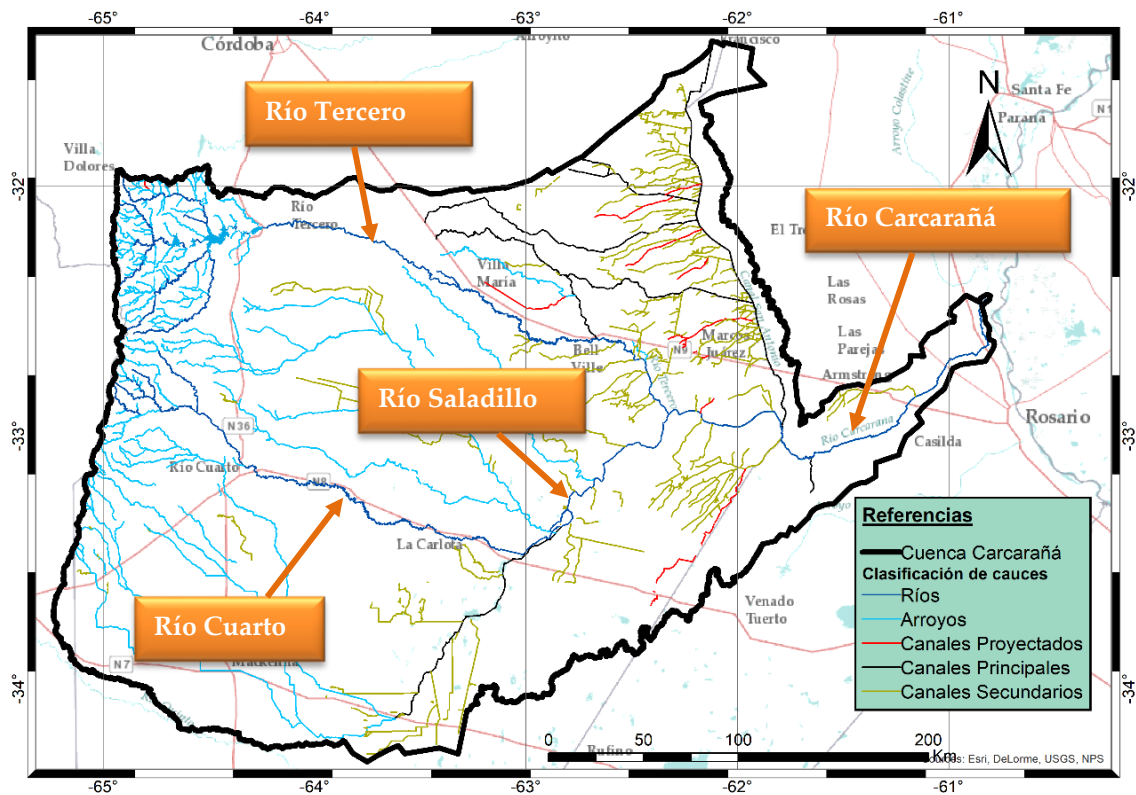
## **1.2. Área de estudio: Cuenca del Río Carcarañá**

### **1.2.1. Principales características de la cuenca**

La cuenca del río Carcarañá (Figura 1) se encuentra ubicada en la región central de la República Argentina con un área de aporte actual al escurrimiento superficial de 72.879 km<sup>2</sup> (el área puede cambiar debido a eventos de precipitación o construcción de infraestructura dado que es una cuenca que su mayor parte está en zona de llanura). El 89% de la cuenca se encuentra en territorio Cordobés, el 10 % en territorio Santafesino y el 1% restante en la provincia de San Luis. El río Carcarañá nace en la provincia de Córdoba, por la confluencia de los ríos Tercero o Ctlamochita y del río Saladillo (nombre del curso inferior del río Cuarto o Chocancharava). El río Saladillo a su vez recibe las aguas provenientes del canal Devoto que colecta las aguas de los arroyos menores del sur provincial (arroyos El Gato, Santa Catalina, el Ají, Chaján, entre otros) que ingresa al río Saladillo aproximadamente 30 km aguas abajo de la localidad de La Carlota (Córdoba). El río Carcarañá, además, recibe los aportes del arroyo Tortugas (que constituye el límite entre las provincias de Córdoba y Santa Fe) y de un sistema de depresiones endorreicas y alineadas que conforman el sistema de bajos de laguna “Las Mojaras”. Luego, el río Carcarañá ingresa en la provincia de Santa Fe en las cercanías de la localidad de Cruz Alta, a la que atraviesa de oeste a este, desembocando en el río Coronda en la localidad de Gaboto, que a su vez lo hace en el río Paraná (Figura 1).

Las nacientes de la cuenca se ubican a más de 2000 metros de altura (altura máxima 2790 m.s.n.m en el cerro Champaquí) en las sierras de Córdoba y su desembocadura se encuentra a 10 m.s.n.m. marcando una pendiente descendiente de oeste a este. En el sector de la cuenca ubicada en las sierras, la misma tiene un comportamiento de sistema hidrológico típico mientras que en la zona de llanuras la cuenca se comporta como un sistema hidrológico no típico es decir parte del escurrimiento se estanca en zonas bajas

en donde se dan procesos de infiltración y evaporación (predominan los escurrimientos de flujos verticales sobre los horizontales).



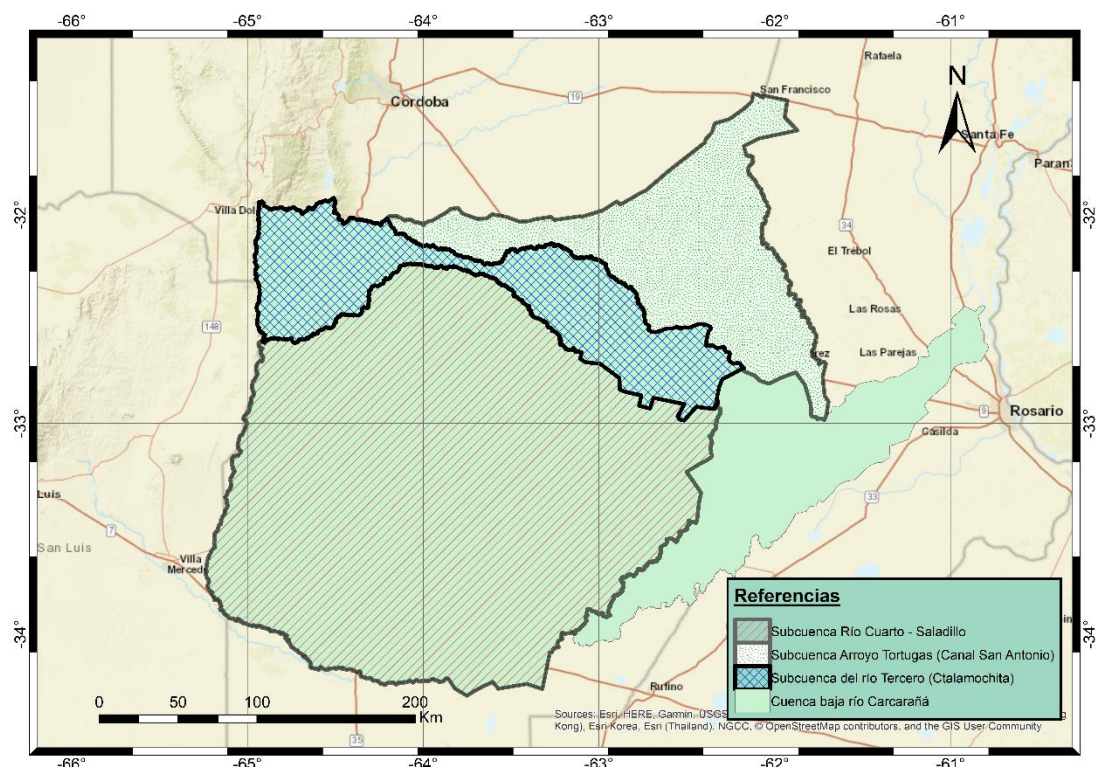
**Figura 1.:** Cuenca del río Carcarañá junto a sus principales tributarios (Fuente: Elaboración propia)

Actualmente las aguas de las subcuencas de los ríos Tercero (Ctalamochita) y Cuarto (Chocancharava) son utilizadas para abastecimiento de agua potable. Por ej. parte del este y sudeste provincial se abastece de agua de la cuenca del río Tercero y los caudales son derivados a diferentes localidades a través de acueductos administrados por la Cooperativa del Sudeste y Cooperativa de Trabajo Acueductos Centro Limitada (Co.T.A.C-) lo que genera una “*cuenca social*” (Porción del territorio que comprende la cuenca hidrográfica y sus zonas de influencia, determinadas por los usuarios del agua - Yañes y Poats, 2007-) de mayor extensión territorial que la propia cuenca hidrográfica del río Carcarañá). Además, las aguas de la cuenca son utilizadas para el vertido de efluentes (volcamientos de plantas depuradoras cloacales, volcamientos industrias químicas, curtiembres, etc.), recreación (la parte alta de la cuenca se encuentra en zona serrana donde la principal actividad económica es el turismo), generación hidroeléctrica (a través de un sistema de 6 embalses en cadena en la cuenca alta de río Tercero), riego

(a través del sistema de riego de Almafuerte, actualmente en reparación), etc. Este uso intensivo del recurso, sumado a la tendencia mundial de aumento en el consumo del agua debido a la aparición de nuevas necesidades y a la marcada variabilidad de la disponibilidad de volúmenes escurridos en las épocas de aguas altas (crecidas) y aguas bajas (estiaje) requieren una muy seria planificación integrada.

### 1.2.2. Breve descripción de los principales tributarios.

La cuenca del Río Carcarañá tiene 3 principales tributarios, el Río Tercero (Ctalamochita), el Río Saladillo (también conocido como tramo inferior del río Cuarto o Chocancharava) y el Arroyo Tortugas (Conocido también como canal San Antonio). En la Figura 2 se muestran las subcuencas de cada uno de estos principales tributarios.



**Figura 2.:** Principales subcuencas de la cuenca del Río Carcarañá. Cuencas obtenidas con modelo digital del terreno de STRM 30mx30m corregido por IGN e inspecciones visuales de la cuenca.

El río Tercero (Ctalamochita) posee una cuenca de 9.700 km<sup>2</sup> y un módulo de 27 m<sup>3</sup>/s. Esta cuenca posee la característica de estar fuertemente regulada en su cuenca alta por un sistema de 6 embalses (Cerro Pelado, Arroyo Corto, Embalse de Río Tercero, Reolín, Cassafouth y Piedras Moras) que poseen diversas funciones entre las que se encuentran la generación hidroeléctrica, abastecimiento de agua potable, recreación, atenuación de crecidas (especialmente embalse de río Tercero), etc. La capacidad de almacenamiento

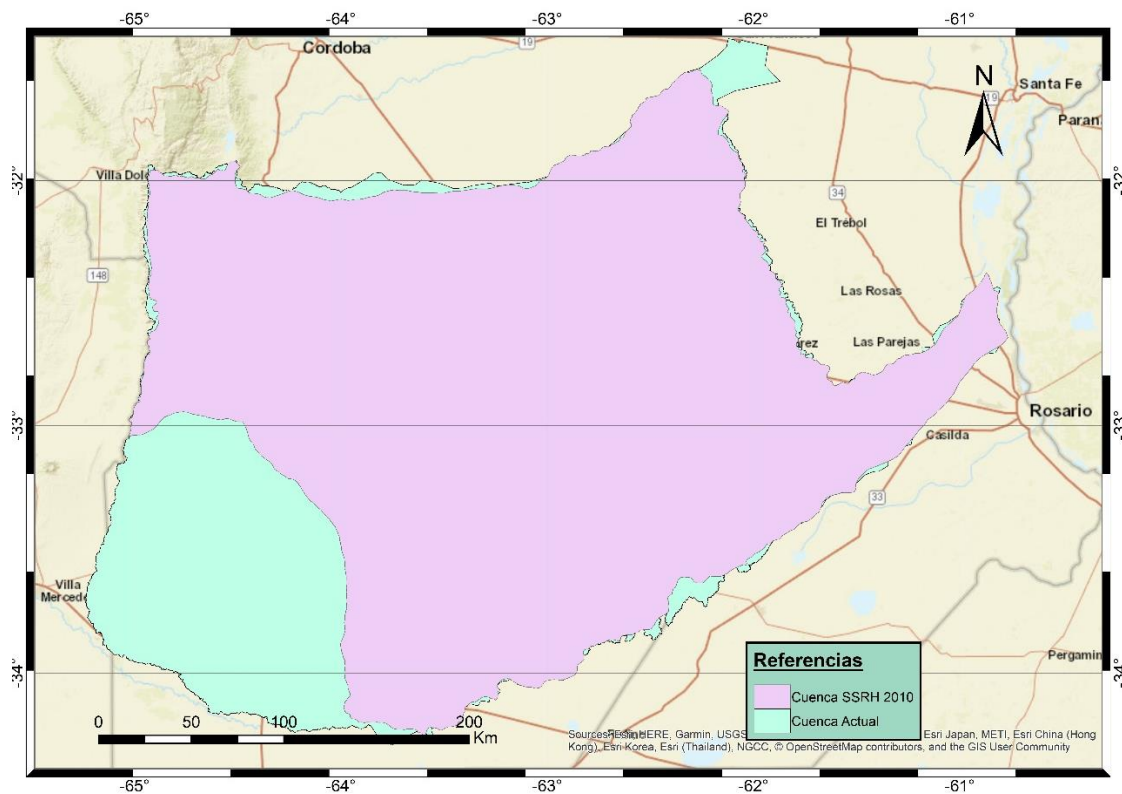
del sistema es de 1000 Hm<sup>3</sup> aproximadamente. Aguas abajo de Piedras Moras, el lecho adquiere características de un río de llanura, las barrancas del río disminuyen su altura y lo mismo sucede con las pendientes. Así se favorece el trazado de una gran cantidad de meandros, alcanzando en el tramo Río Tercero-Villa María el máximo ancho (Miatello, 1978).

La cuenca del río Cuarto – Saladillo, es la subcuenca más grande (41.100 km<sup>2</sup>), dentro de la cuenca del río Carcarañá. Esta cuenca, al igual que la del río Tercero, nace en las sierras de Comechingones y luego a pocos kilómetros aguas abajo de la ciudad de Río Cuarto toma características de cuenca de llanura. El río Cuarto desemboca en una serie de bañados conocidos como bañados del río Saladillo, aunque la superficie de bañados se ha reducido notablemente debido a canalizaciones realizadas para mitigar las inundaciones, (Brandolin et al., 2013). En esos bañados nace el río homónimo que posteriormente confluye con el río Tercero. El río Saladillo, además, recibe los escurrimientos de los arroyos de Tegua y Cabral provenientes de la parte central de la cuenca del Carcarañá. Además de los arroyos mencionados el río Saladillo colecta las aguas del Canal Devoto que acarrea los escurrimientos de los arroyos Santa Catalina, el Gato, Chaján, Suco, entre otros que escurren por el sud-oeste provincial (estos arroyos corresponden a lo que se denomina cuenca de los arroyos menores).

Por último, la cuenca del canal San Antonio-arroyo Tortugas se ubica en la zona limítrofe de las Provincias de Córdoba y Santa Fe y la misma posee una extensión de 11.926 km<sup>2</sup>, la cual su mayor parte se encuentra en territorio Cordobés (84 % del total). La cuenca se encuentra en zona de llanura y presenta características de una cuenca de este tipo. Ésta se extiende hacia el norte hasta la localidad de San Francisco (Córdoba), hacia el oeste se extiende hasta las cercanías de la localidad de Villa Ascasubi donde se encuentra el límite con la cuenca del Río Tercero (Ctalamochita), hacia el este la cuenca se extiende en una faja de norte a sur (en dirección de la falla de San Guillermo) de aproximadamente 20 km de ancho dentro de territorio Santafesino y hacia el sur hasta las cercanías de la localidad de Cruz Alta donde se encuentra la desembocadura del arroyo en el río Carcarañá.

### 1.2.3. Actualización del trazado de cuenca

La cuenca del río Carcarañá es una cuenca que posee gran parte de su extensión en zona de llanura, debido a esto, obras de infraestructura como caminos o canalizaciones produjeron cambios en la extensión de la misma. La Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación en el año 2010 realizó la delimitación de la cuenca obteniéndose una superficie total de 48.100 km<sup>2</sup> (SSRH,2010), ver Figura 3. La cuenca delimitada no tuvo en cuenta la subcuenca de los arroyos menores probablemente porque se delimitó utilizando las divisorias de aguas. La cuenca de los arroyos menores pasa a formar parte de la cuenca del río Carcarañá por las canalizaciones realizadas para llevar los excedentes hídricos producto de inundaciones hacia el canal Devoto.



**Figura 3.:** Cuenca definida por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SSRH, 2010) y la cuenca actual definida en el marco de las bases para el plan director.

En el año 2017 el gobierno de la Provincia de Córdoba pone en marcha junto con la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEyN) de Universidad Nacional de Córdoba un estudio para sentar las bases de un plan director para la cuenca del río Carcarañá. Uno de los principales puntos a resolver en este estudio fue delimitar nuevamente la cuenca teniendo en cuenta todos los cambios que ha sufrido la misma y que han modificado su extensión (canales, obras viales, defensas, etc.). El autor de esta

tesis ha participado en esa delimitación y luego de un consenso general con responsables de distintas autoridades de la provincia, se determinó la cuenca que se muestra en la Figura 3. Esta nueva delimitación, como se ha mencionado anteriormente, posee una extensión de 72.879 km<sup>2</sup>. Entre los principales cambios realizados se mencionan: (a) Incorporación de la cuenca de los arroyos menores al sistema del río Carcarañá; (b) Delimitación más detallada de la cuenca en la zona aledañas a la localidad de San Francisco y en la zona sur en las cercanías de la localidad de Laboulaye; (c) Se determinó que la ruta nacional 158 que une Villa María con San Francisco se convirtió en una divisoria de aguas de la cuenca de estudio con la cuenca del río Xanaes.

### **1.3. Problemática existente en el área de estudio**

#### **1.3.1. Conocimiento limitado del concepto de cuenca como territorio para la gestión sustentable del recurso hídrico**

Para realizar un manejo sustentable de los recursos hídricos es necesario que las tomas de decisiones se realicen a nivel de cuenca ya sea superficial o subterránea. A pesar de que la constitución nacional en su artículo 124 menciona *“Corresponde a las provincias el dominio originario de los recursos naturales existentes en su territorio”*, la cuenca de un río (como la que aquí se estudia) no distingue límites políticos y las decisiones que se tomen en una jurisdicción puede afectar notablemente al territorio de la cuenca en otra jurisdicción. Es por ello que se destaca que la planificación y manejo del recurso hídrico debe realizarse a nivel de cuenca para de ese modo poder satisfacer las demandas existentes y preservar la cuenca para las futuras generaciones. Actualmente existe un conocimiento limitado del concepto de cuenca por parte la comunidad en general y de su importancia como unidad de planificación. Frente a esta problemática es necesario realizar concientización y educación de la población en general para de ese modo cambiar la visión de la comunidad y tomar las acciones de planificación y decisión a nivel de cuenca de modo casi natural sin importar los límites políticos.

#### **1.3.2. Falta de información y de herramientas para apoyo a la gestión de los recursos hídricos**

En la actualidad, la disponibilidad de información hidrológica e hidráulica para la gestión sustentable de los recursos hídricos superficiales es escasa en toda la cuenca del río Carcarañá y esta situación se repite habitualmente en todo el territorio de la

República Argentina. Esta falta de información hace sumamente dificultosa la tarea de planificación del uso de los recursos hídricos en la cuenca como así también la generación de herramientas (modelos numéricos, curvas altura caudal, etc.) necesaria para apoyar la toma de decisiones y realizar una adecuada planificación.

En el caso de la cuenca del río Carcarañá, debido al gran tamaño de la misma, los eventos hidrometeorológicos que ocurren en la región afectan de distinta forma a las diferentes subcuencas, lo que influye de manera notable en el caudal que aporta cada tributario y por ende en el comportamiento general del sistema. Para caracterizar este sistema complejo se requiere una gran cantidad de información que cuantifique y caracterice la evolución espacial y temporal del recurso en el sistema fluvial de estudio. Debido a lo dicho anteriormente es que debe monitorearse toda la cuenca.

En las últimas décadas la República Argentina ha sufrido una fuerte caída en la cantidad de estaciones de diferentes tipos (meteorológicas, de nivel, caudalímetros, etc.) fundamentales para el registro de datos. Esta fuerte caída se debe a la falta de concientización de los actores de decisión de la importancia de medir, a importantes falencias como la falta de sistematización en la toma del dato (que incluye la toma del dato propiamente dicha y el almacenamiento y publicación de esos datos), vandalismo y poca conciencia social de la población en general que daña las estaciones de medición, entre otros. Es por ello que es fundamental generar programas de concientización y educación para revertir la situación que sufre actualmente el país y en particular la cuenca de estudio.

Además, debido a la gran extensión de la cuenca, diversos organismos hacen mediciones aisladas en los ríos de la misma aplicando diferentes protocolos de medición, lo cual genera problemas al momento de evaluar la calidad de los datos y su comparación. Es por ello que existen áreas que requieren una mayor investigación relacionadas al desarrollo de protocolos de medición estandarizados, a los métodos de estimación de incertidumbre de los valores determinados experimentalmente con el objeto de determinar los parámetros que contribuyen significativamente a la incertidumbre de la medición, capacitación y validación de las técnicas e instrumentos de medición.

### **1.3.3. Existencia de vertido de efluentes y desconocimiento de la intensidad de los procesos de mezcla en los tributarios.**

Otra problemática relacionada al manejo sustentable del recurso en la cuenca de estudio es que los diferentes tributarios se ven amenazados por vertido de diferentes tipos de efluentes industriales, cloacales y contaminantes de origen agroquímico. Uno de los ríos más afectados, es el río Tercero (Ctalamochita), Cossavella et al., 2003, el cual en su paso por la ciudad homónima escurre en cercanías de un complejo de industrias químicas, donde la producción de las mismas abarca desde sustancias elementales como ácido nítrico y agua oxigenada, hasta herbicidas, pesticidas y compuestos petroquímicos. Se observa que cuando desciende el caudal de agua en el río Tercero (Ctalamochita), no se produce una adecuada mezcla y dilución de los efluentes cloacales e industriales vertidos. Para evaluar la mezcla y dilución de los efluentes en el río para distintas condiciones de flujo (aguas altas, normales y bajas) es necesario determinar los parámetros que definen los patrones de mezcla. Con respecto al río Cuarto – Saladillo, cabe mencionar que es afectado notablemente en su paso por la ciudad homónima debido a la descarga de efluentes cloacales y de efluentes de la industria avícola ubicadas aguas abajo de la ciudad (Rodríguez et al., 2002)

### **1.3.4. Conocimiento limitado de los procesos de transporte de sedimentos y su influencia en la hidrodinámica del sistema fluvial.**

El transporte de sedimentos de fondo en estos ríos viene acompañado, en muchos casos, con la generación de formas de fondo, principalmente dunas (Heredia, 2018). Las características de estas formas de fondo dependen de los parámetros del flujo (velocidad media y profundidad) y del sedimento (tamaño de grano, densidad). La existencia de formas de fondo en el lecho incrementa la rugosidad generada al flujo por ese lecho (Julien, 2010; García, 2006), lo cual se manifiesta en un incremento de los niveles de superficie libre afectando el comportamiento hidrodinámico. Por ello, es necesario hacer mediciones hidrodinámicas para determinar el impacto de las formas de fondo en la rugosidad en el sistema de estudio.



## **1.4. Técnicas experimentales disponibles en el estado del arte para la caracterización hidrológica e hidráulica en el sistema fluvial.**

### **1.4.1. Introducción**

Para la cuantificación hidrológica, caracterización hidráulica y transporte de sedimentos se requiere instrumental preciso con gran resolución espacial y temporal. Para el estado del arte actual, el Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP) es el más adecuado y utilizado para realizar esta tarea. El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) utiliza este instrumento de manera generalizada desde hace más de 20 años, constituyendo las mediciones efectuadas con ADCP, el 82% aproximadamente de todas las mediciones de caudal que el USGS realiza desde un bote o puente (Tarrab, 2014).

Además, este instrumento ha demostrado ser adecuado para caracterizar diferentes tipos de flujo como lo muestran los trabajos de Carr y Rehmann (2007); Shen et al. (2010); Riley y Rhoads (2012); Parson et al. (2013); Herrero (2014); Heredia (2018); entre otros. Debido a los antecedentes que existen en el uso de este instrumento para la tarea que se busca realizar en esta tesis, es que se ha optado por utilizar esta técnica de medición.

### **1.4.2. Descripción del ADCP**

Durante las últimas dos décadas, los perfiladores de corriente acústicos Doppler (ADCP en sus siglas en inglés) han permitido obtener en forma precisa valores de caudal tanto en canales artificiales como en ríos con profundidades de unos pocos centímetros (desarrollo realizado en los últimos 10 años) hasta varios órdenes de magnitud superior, mayores a 50 m (Mueller et al., 2013). Esta tecnología permite realizar mediciones con una alta resolución espacial y temporal del flujo, reduciendo considerablemente los tiempos de realización de aforos. En la Figura 4 se muestran algunos de los ADCPs (compañías Sontek y Teledyne RD Instruments) comercialmente disponibles en el mercado.



**Figura 4.:** Imágenes de perfiladores acústicos Doppler. A) RDI Río Grande, B) RDI RiverPro, C) RDI RiverRay, E) YSI/SonTek M9 y F) YSI/SonTek S5.

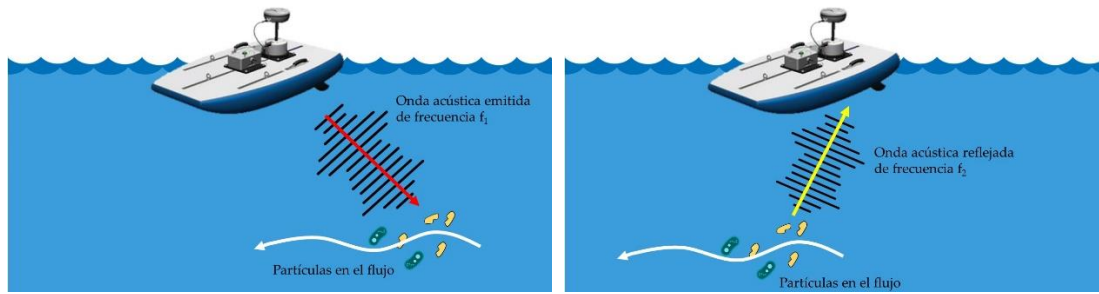
Los ADCPs determinan la velocidad del flujo utilizando el principio Doppler. El instrumento emite una onda acústica a una determinada frecuencia ( $f_1$ ), la cual es luego reflejada por partículas en suspensión en el flujo (sedimentos, plancton, algas, etc.). La onda acústica reflejada es detectada por el instrumento y la misma posee una frecuencia ( $f_2$ ) diferente con la que fue emitida. En la Figura 5 se muestra el esquema de funcionamiento del ADCP. Mediante el conocimiento de la frecuencia emitida y la recibida puede obtenerse el valor de la velocidad relativa entre el flujo y el instrumento mediante la ecuación clásica del efecto Doppler (Young y Freedman, 2009). Esta técnica de procesamiento de señales acústicas presenta un nivel de ruido considerable, es por ello que García et al. (2005) indica que para determinación de velocidad de flujo, la técnica de análisis de señales implementada en los ADCP calcula las velocidades relativas entre el instrumento y el flujo ( $U$ ) a partir de la diferencia de fase entre dos muestras diferentes de un único pulso de retorno en cada celda (modo incoherente) o a partir de la diferencia de fase entre dos pulsos acústicos sucesivos, (modo coherente).

Ec. 1

$$U = \frac{\lambda_p}{4\pi} \frac{d\phi}{dt}$$

Donde  $\lambda_p$  es la longitud del pulso,  $d\phi$  es la diferencia de fase y  $dt$  es el intervalo de tiempo entre 2 pulsos o dos muestras según corresponda.

En esta tesis se utilizó principalmente un ADCP YSI/SonTek RiverSurveyor S5® de 3 MHz. Las principales características de este equipo son (Sontek, 2013): (a) medición de velocidad desde los 0,3 m hasta los 5 m y profundidades hasta los 15 m. (b) Tamaño de celda variable entre los 0,02 m y 0,5 m seleccionado automáticamente en función de la velocidad y profundidad de flujo. (c) Cuatro sensores de 3MHz con un ángulo de 25° respecto a la vertical utilizados para medir la velocidad relativa entre el instrumento y el flujo en modo coherente o incoherente definido automáticamente en función de las profundidades y velocidades del flujo y (d) Un sensor vertical de 1 MHz para medir profundidades.

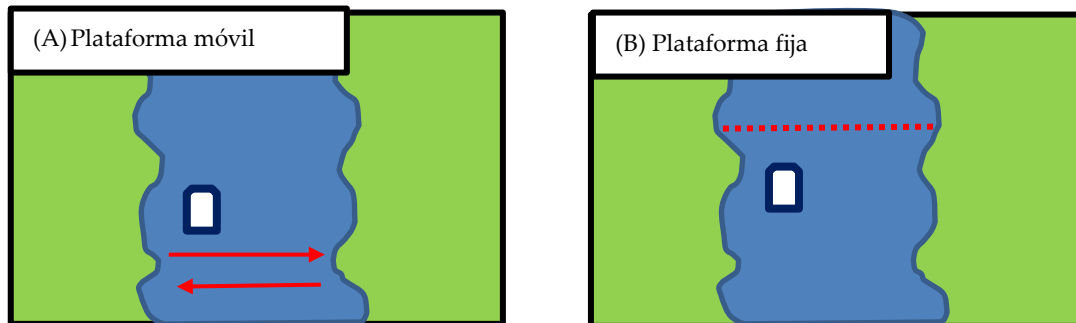


**Figura 5.:** Esquema de funcionamiento del ADCP

#### 1.4.3. Metodología experimental

Las mediciones con ADCP pueden realizarse siguiendo dos metodologías diferentes. La selección de la metodología más adecuada dependerá de las características de la sección y de los accesorios disponibles en el equipo. La primera forma de medir con ADCP, y la más común, es utilizar plataformas móviles, estas pueden ser una lancha con el ADCP montado en un costado de la misma (metodología utilizada cuando los ríos son anchos y profundos, como por ej. el río Paraná, Uruguay, Amazonas, etc.) o un pequeño bote controlado por los operarios desde ambas márgenes del río, o desde puente mediante una soga. En ambos casos se debe hacer un cruce transversal a la dirección del flujo (transecta) a una velocidad menor a la velocidad del flujo (Figura 6 A). Se debe efectuar un número par de transectas totalizando un tiempo de medición (el tiempo de medición debe ser tiempo de medición efectiva, sin contar los tiempos muertos que el instrumento no está midiendo) de 720 segundos (Mueller et al.; 2013). En las márgenes se debe tener un mínimo de 3 celdas en la vertical para realizar la extrapolación de los caudales en la misma. La metodología de medición desde plataforma móviles a pesar de ser rápida y sencilla, muchas veces no puede aplicarse debido que es necesario referenciar la velocidad del bote mediante un sistema de referencia que puede ser mediante el sistema por seguimiento de fondo (Bottom Track -BT- por su nombre en inglés) o GPS. Ante la falta de los sistemas de referenciación, por ej. presencia de fondo móvil, falta de señal GPS por presencia de árboles, edificios, etc., o alta concentración de sedimentos en suspensión es necesario utilizar otra metodología desde plataformas fijas. La metodología de medición en este caso es similar a la de la técnica de medición por vadeo de molinete o velocímetro acústico doppler (ADV). Dicha metodología consiste en dejar fijo el ADCP en un punto y medir perfiles de velocidades durante un tiempo determinado (40 segundos según las normativas actuales) para obtener un valor de

velocidad media en dicho punto (Figura 6 B). Se realiza esta labor a lo ancho de toda la sección hasta totalizar entre 30 o 40 verticales. Luego a través de los métodos de “sección media” o “sección promedio” (mid section o mean section por sus nombres en inglés) se obtiene el caudal.



**Figura 6.:** (A) medición desde plataforma móvil. Se deben hacer un numero par de transecta totalizando un tiempo total de medición de 720 segundos. (B) medición desde plataforma fija, se realiza un numero de verticales (ver puntos en la figura) y luego se calcula el caudal.

#### 1.4.4. Áreas de que requieren mayor investigación

Debido a los grandes avances de tecnología hidroacústica, es que actualmente esta ha reemplazado a las técnicas clásicas como los molinetes. A pesar del uso intensivo que tienen los ADCPs a nivel mundial todavía quedan nichos donde es necesario trabajar para mejorar la aplicación de la técnica y mejorar los tiempos de medición. Los mismos se detallan en los párrafos sucesivos.

En la actualidad existen dos grandes compañías que comercializan la mayoría de los modelos de ADCP existentes en el mercado: RDI y YSI/SonTek. Dichas empresas proveen programas de procesamiento de los datos relevados por sus equipos: WinRiver II para el caso de RDI y RiverSurveyor Live para el caso de YSI/SonTek. Estos programas procesan la información de ADCP de forma diferente, lo cual produce que para un mismo conjunto de datos dichos programas arrojen valores de caudal distintos. Además, los programas provistos por los fabricantes muchas veces no alertan a los usuarios de los errores que posee la medición (por ej. Los ADCP SonTek no alertan adecuadamente ante la pérdida de datos durante la medición).

Frente a dicha problemática, el USGS desarrolló un programa llamado QRev (Mueller, 2016), el cual procesa la información del ADCP de la misma manera independientemente de la marca del equipo y de acuerdo a las normativas y recomendaciones de esa institución, alertando frente a errores graves de una manera

llamativa. Además, esta herramienta utiliza la mayor cantidad de información disponible interpolando linealmente únicamente el dato perdido. Actualmente, la implementación de la herramienta en Argentina no ha sido muy difundida y el procesamiento de los caudales medidos se sigue realizando con los programas tradicionales provistos por los fabricantes con las problemáticas que ello genera en algunas situaciones. Dado su reciente aparición es necesario evaluar la necesidad de implementar esta herramienta en el sistema fluvial de estudio y a partir de su aplicación y la detección de errores e incertidumbres en la medición generar recomendaciones y sugerencias para el registro de datos con ADCP en el sistema de estudio.

A pesar de la existencia de Qrev (que permite la rápida detección de errores en la medición), en lo que respecta a análisis de incertidumbre, actualmente realiza una estimación cualitativa de la misma basado en los errores aleatorios suponiendo que los mismos siguen una distribución t-student (Mueller, 2016), lo cual resulta insuficiente en algunos casos. Estudios antecedentes en la temática se pueden mencionar el trabajo de González-Castro y Muste (2007), el cual permite determinar la incertidumbre de mediciones con ADCP, pero la metodología propuesta, aunque completa, es difícil de implementar debido a la complejidad de las ecuaciones matemáticas a las que arriba. García et al. (2012) presentaron un modelo para cuantificar la incertidumbre debido a los errores aleatorios, pero dicho modelo no toma en cuenta los errores de sesgo. Tarrab et al. (2012) presentaron un análisis para cuantificar el rol de las fluctuaciones turbulentas en las incertidumbres de caudal con ADCP utilizando transectas generadas por medio de simulaciones numéricas directas (DNS). Posteriormente Gonzales-Castro et al. (2016) crearon el programa RiverFlowUA, que determina la incertidumbre de mediciones con ADCP utilizando la metodología de González-Castro y Muste (2007). Finalmente, Moore et al. (2016) desarrolló un programa computacional en Matlab® llamado QUant que permite determinar la incertidumbre de cada una de las transectas de una medición a través de simulaciones de Montecarlo. La metodología propuesta es de simple aplicación, pero requiere un gran tiempo computacional. Para el cálculo de la incertidumbre de toda la medición (múltiples transectas), Moore et al. (2016) supone que no hay correlación entre las variables y entre las diferentes transectas y calcula la incertidumbre total a través de la incertidumbre relativa estándar (RSU, por sus siglas

en inglés). La metodología propuesta por Moore et al. (2016), al ser de simple aplicación tiene un potencial muy grande y deja un área de investigación que consiste en optimizar los tiempos de cálculo, determinar una metodología que tenga en cuenta la correlación entre variables y la necesidad de realizar un análisis de sensibilidad para evaluar las principales fuentes de incertidumbre.

En lo que respecta a mediciones estacionarias con ADCP (metodología que se usa cuando no es posible la aplicación de la metodología medición de plataforma móvil debido al transporte de sedimentos, incorrecta detección del fondo y falta de GPS, etc.), cabe mencionarse que la metodología existente sugiere en cada vertical debe medirse un tiempo mínimo de 40 segundos en Estados Unidos y 30 segundos en Argentina. Este tiempo de medición quedó definido para las mediciones con molinetes mecánicos y se extrapoló a mediciones estacionarias con ADCP y velocímetros acústicos sin tener en cuenta las condiciones de flujo muestreadas.

García et al. (2006) implementó la técnica “Moving Block Bootstrap” (MBB) para determinar el intervalo de confianza de diferentes parámetros de la turbulencia estimadas en base a señales de velocidad del flujo. Luego, García (2015) propuso el uso de esta metodología a los Velocímetros Acústicos (YSI/SonTek FlowTracker y OTT ADC) demostrando que si se fija un determinado nivel de error aceptable de velocidad es posible que el instrumento aplique esta metodología en tiempo real y al alcanzarse un valor de velocidad con un nivel de incertidumbre tolerable, el equipo finaliza la recolección de datos y se puede proceder a la siguiente vertical. Los resultados mostraron que en muchos casos es necesario menos de 40 segundos para alcanzar un valor medio de velocidad con un nivel de error aceptable. Por el contrario, se demostró que en ciertos sectores del flujo los 40 segundos resultan insuficientes. Actualmente, no se encuentran antecedentes del uso de esta metodología en mediciones estacionarias con ADCP.

Finalmente, a través del análisis de la información medida y procesada con Qrev, la realización de análisis de incertidumbre mediante técnicas computacionales (Montecarlo) y aplicación de guías de medición desarrolladas por Oberg et al. (2005); Mueller y Wagner (2006); y Mueller et al. (2013) pueden definirse las estrategias de

registro óptimas para medir en los ríos de la región central de Argentina con ADCP desde plataforma móviles.

### **1.5. Motivación Científico-Tecnológica**

En los apartados previos se detallaron las problemáticas y áreas que requieren una mayor investigación tanto en la cuenca de estudio como en la técnica experimental utilizada. En lo que respecta a la técnica experimental se encuentra como primera motivación comenzar a implementar el análisis de la información obtenida con ADCP mediante nuevos programas computacionales entre los cuales se encuentran: (a) QRev permite independizarse de la metodología de procesamiento del fabricante y posibilita comparar adecuadamente los datos recolectados con cualquier equipo. Se busca conocer además conocer el impacto del cambio de metodología de procesamiento de la información que se realiza con respecto a cómo lo realiza el programa original del fabricante y su impacto en herramientas de gestión generadas con la información medida con ADCP anteriormente y (b) QUant desarrollado por Moore et al. (2016) que estima incertidumbre de mediciones realizadas con ADCP mediante el método de Montecarlo. De aquí surge como segunda motivación aplicar dicha metodología al sistema fluvial de estudio con modificaciones en el método para determinar la incertidumbre de la medición completa (múltiples transectas). Mediante el uso de esta metodología se pretende identificar las variables que más contribuyen a la incertidumbre de las mediciones de caudal realizadas en el sistema de estudio. A través del procesamiento de los datos con QRev y el análisis de incertidumbre se busca definir estrategias de registro, recomendaciones y sugerencias para efectuar mediciones con ADCP en el sistema fluvial de estudio, lo cual también motiva a la realización de esta tesis. Como tercera motivación se encuentra la aplicación de la técnica MBB para la determinación del tiempo óptimo de medición en mediciones estacionarias con ADCP. Dicha técnica, además, permite el análisis de la serie de velocidad y determinar si existen errores durante el registro.

Dado que la cuenca del río Carcarañá es una de las cuencas más importantes de la Provincia de Córdoba y debido a las problemáticas que presenta, se encuentra como motivación trabajar para el uso habitual de la técnica de medición ADCP en el sistema fluvial de estudio para aumentar la información hidrológica existente. En este sentido se

encuentra como primer incentivo definir una metodología de capacitación, validar y comparar las técnicas de medición entre todos los organismos que miden con ADCP en la cuenca y en todo el país con el objeto de conocer las principales fuentes de incertidumbre en las mediciones y seleccionar la técnica y metodología más adecuada. Con la aplicación de la metodología definida y las herramientas generadas es posible realizar mediciones en diferentes secciones y generar herramientas para apoyo a la gestión.

Además, dado la gran resolución temporal y espacial que provee el instrumento se encuentra también la motivación de caracterizar la hidrodinámica del flujo sobre formas de fondo y su influencia en la rugosidad del lecho, caracterizar los procesos de mezcla en diferentes secciones (que permite evaluar los efectos de vertidos en el sistema) de la cuenca que incluyen diferentes tramos de río y una confluencia.

Finalmente dada la problemática que se observa a nivel general en el país sobre la falta de concientización acerca de la importancia de medir y que las decisiones de planificación y solución de problemas deben hacerse definiendo a la cuenca como sistema se encuentra como motivación la ejecución de proyectos educativos para alumnos y docentes de diferentes escuelas ya que los son las futuras generaciones las que deben conservar los recursos naturales y planificar adecuadamente su uso.

## **1.6. Objetivos**

### **1.6.1. Objetivo General**

El objetivo general de esta tesis es realizar **“Avances en la Cuantificación hidrológica y caracterización hidráulica del flujo en el sistema fluvial del río Carcarañá utilizando ADCP”**. Esta cuenca presenta procesos de interés desde el punto de vista científico y tecnológico (tributarios con diferentes características físicas y régimen hidrológico) y que actualmente se la utiliza para múltiples acciones como abastecimiento de agua potable, volcamiento de efluentes, extracción de áridos, riego y recreación. Para llevar a cabo la caracterización y cuantificación requerida, en esta tesis se desarrollan metodologías óptimas de medición, procesamiento de la información y análisis de incertidumbre.

### **1.6.2. Objetivos específicos**

Como objetivos específicos se propone:



- Estudiar los antecedentes existentes y definir temas de investigación a profundizar en el sistema de estudio y en la técnica experimental a utilizar.
- Realización de una cuantificación hidrológica en sistema fluvial seleccionado y desarrollo de herramientas requeridas para la gestión del recurso hídrico superficial en la cuenca del río Carcarañá. Los datos hidrológicos disponibles en la cuenca son escasos y con el planteo de este objetivo se pretende mejorar sustancialmente la información disponible, la cual es fundamental para mejorar los modelos hidrológicos e hidráulicos y de esa forma desarrollar herramientas requeridas para la gestión del recurso hídrico. Se complementan las mediciones experimentales realizadas con resultados de modelaciones hidrodinámicas de los tramos urbanos del Río Tercero en las ciudades de Villa María y Bell Ville, los cuales son importantes centros urbanos en la región. Los resultados de estas modelaciones permiten entre otras cosas, determinar las líneas de riberas y las zonas de inundación en los ramos analizados.
- Caracterizar la hidrodinámica de flujos complejos en el sistema fluvial del río Carcarañá para cuantificar los procesos de mezcla. Se pretende desarrollar e implementar una metodología más sencilla, precisa y novedosa para obtener el coeficiente de dispersión longitudinal necesario para caracterizar los procesos mezcla en los ríos de la cuenca y analizar en detalle cómo se da la mezcla de una confluencia fluvial poco convencional.
- Detallar las conclusiones arribadas después de la realización de esta tesis.
- Divulgar los contenidos adquiridos en esta tesis a la comunidad en general. Se busca compartir con la comunidad todos los desarrollos adquiridos en esta tesis de una manera entretenida y simple orientada a alumnos y maestros de escuelas primarias y secundarias. A través de esta divulgación se busca incentivar la ciencia ciudadana la cual es una forma innovadora de hacer ciencia en los últimos años.

### **1.7. Metodología**

Para el desarrollo de esta tesis, en primer lugar, se ha realizado una recopilación de antecedentes e información del sistema de estudio, lo que ha permitido definir la problemática existente, áreas que requieren mayor investigación y los objetivos de la tesis, siendo todos estos aspectos documentados en el presente capítulo. En el capítulo 2

se detalla toda (a) la metodología desarrollada para determinar el tiempo óptimo de medición desde plataformas fijas, (b) las herramientas utilizadas para el procesamiento de los datos de ADCP, destacando la necesidad de su implementación, y (c) la metodología desarrollada para estimar de la incertidumbre de las mediciones de caudal efectuadas con ADCP desde plataformas móviles. Los puntos detallados anteriormente permitieron determinar recomendaciones y sugerencias para el registro óptimo de caudal en el sistema de estudio. Dichas recomendaciones y sugerencias fueron complementados en utilizando los resultados obtenidos de la evaluación interinstitucional en campo de métodos y técnicas experimentales a través de Regatas de Medición de caudal.

Luego, en el capítulo 3, se detalla todas las mediciones realizadas en el sistema fluvial del río Carcarañá y la generación herramientas útiles para los organismos que tienen a cargo la gestión del recurso hídrico como son las curvas altura de superficie libre-caudal en diferentes secciones del sistema fluvial, determinación de la capacidad del cauce, verificación de los caudales erogados por los órganos de descarga de los principales diques del sistema y evaluación de los efectos de la rugosidad inducida por las formas de fondo. Con la gran cantidad de datos recolectados en el sistema, posteriormente en el capítulo 4 se determinó el coeficiente de dispersión longitudinal en varias secciones de la cuenca de estudio. Este coeficiente permite estimar la capacidad de mezcla/dilución de contaminante que tiene el río y se utiliza en modelaciones de calidad de agua en el sistema. Además, en este capítulo se detalla la hidrodinámica y los patrones de mezcla de una confluencia fluvial de diferente densidad en curva como lo es la confluencia de los ríos Tercero (Ctalamochita) y Saladillo. En el capítulo 5 se detallan las principales conclusiones alcanzadas a lo largo de toda la tesis, y se plantean las recomendaciones y sugerencias pertinentes para trabajos futuros. Finalmente, en el Anexo, se detallan los proyectos educativos que se realizan en diferentes escuelas para concientizar a los alumnos y a la comunidad en general de la importancia de medir para la planificación del uso de los recursos hídricos y el cuidado de las cuencas

---

## Capítulo II

# DESARROLLO Y OPTIMIZACIÓN DE TÉCNICAS Y MÉTODOS EXPERIMENTALES REQUERIDOS PARA EL REGISTRO DE DATOS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS EN EL SISTEMA FLUVIAL DE ESTUDIO

---

Contenidos de este capítulo han sido incluidos en las siguientes publicaciones en revistas científicas:

**Díaz Lozada, J.M; García, C.M; Flores Nieto, F.; Oberg, K.A; Over, T. (2018) en revision;** “Optimization of Uncertainty Analysis of Multiple Transects ADCP Discharge Measurements by Moving Boat using Sampling Methods”. – Revista: Journal of Hydraulic Engineering. Editorial: American Society of Civil Engineers. Estado actual: En revision por el USGS.

## 2.1. Introducción

A pesar de los grandes avances y gran aceptación que han tenido los Perfiladores de Corriente Acústicos Doppler (ADCP) a nivel mundial, en los últimos años se han generado nuevos desarrollos y todavía quedan aspectos de su implementación que requieren una mayor investigación. Uno de estos aspectos a investigar es el tiempo óptimo de registro de datos en mediciones estacionarias de caudal con ADCP. En la actualidad los protocolos de medición del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) recomiendan, para las mediciones estacionarias de caudal, un tiempo de registro fijo de 40 segundos en cada localización sin tener en cuenta las condiciones locales del flujo (magnitud de los valores medios y de las fluctuaciones de velocidad del flujo, profundidades, etc.). Solo en Estados Unidos, el USGS realiza entre 40.000 y 50.000 mediciones estacionarias de caudal por año (Oberg 2019, comunicación personal) por lo que utilizando un enfoque técnico más sólido para determinar este tiempo de registro que genere un pequeño ahorro de tiempo en la implementación de este método puede resultar en grandes mejoras de eficiencia. En esta tesis se presenta un nuevo desarrollo (en conjunto con el USGS) en la determinación del tiempo óptimo de registro en mediciones estacionarias con ADCP utilizando la técnica “Moving Block Bootstrap” (MBB) la cual se detalla en la sección 2.2 de esta tesis. García et al. (2006) utilizó previamente MBB para determinar la distribución de probabilidad de los parámetros de la turbulencia en flujos de agua (y su incertidumbre) y posteriormente (García 2015) la aplicó para obtener el tiempo óptimo de registro en mediciones de caudal con velocímetros Acústicos Doppler (YSI/SonTek FlowTracker y OTT ADC).“.

Durante el desarrollo de esta tesis (en particular desde el año 2016) surgieron a nivel mundial dos herramientas computacionales importantes para el análisis de información registrada en mediciones de caudales con ADCP desde plataformas móviles las cuales presentan a priori soluciones a problemáticas existentes en el procesamiento de la información y a la estimación de incertidumbre en las mediciones. Las principales problemáticas que fueron contempladas con estas herramientas son: falta de una metodología de procesamiento común para la información registrada por instrumentos de distintos fabricantes, la detección de las principales fuentes de errores, y la adopción de un modelo simple y rápido para determinar incertidumbre. Las principales

herramientas que surgieron son: (A) QRev (Mueller, 2016) para el procesamiento de la información obtenida con ADCP y la detección de las principales fuentes de errores y (B) QUant Moore et al. (2016) para la estimación de incertidumbre de mediciones de caudal desde plataforma móviles mediante métodos computacionales (en particular esta herramienta utiliza la técnica de simulaciones de Montecarlo).

El grupo de trabajo donde se desarrolla esta tesis ha decidido implementar el uso de QRev de forma obligatoria para el procesamiento de datos con ADCP en el sistema de estudio. Frente a este nuevo protocolo fue necesario verificar como impacta la nueva forma de procesamiento en los aforos realizados previamente y en las herramientas generadas a partir de esa información. Además, utilizando QRev fue posible detectar las principales fuentes de error en la medición de caudal con ADCP desde plataformas móviles en el sistema fluvial de estudio con lo cual fue posible generar recomendaciones y sugerencias para las mediciones en este sistema el cual presenta características particulares entre las que se destaca una gran variación estacional de caudales (mayor a un orden magnitud) entre los caudales de estiaje y de crecidas.

En lo que se refiere a la estimación de la incertidumbre en mediciones de caudal con ADCP desde plataformas móviles mediante el uso de métodos computacionales, se evaluó intensivamente la herramienta llamada QUant que determina la incertidumbre de la medición completa de caudales con ADCP desde plataformas móviles (compuesta por múltiples transectas o cruces) y se detectaron falencias que requieren nuevos desarrollos como por ejemplo el método empleado para estimar la incertidumbre de una medición completa de caudales con múltiples transectas, limitaciones computacionales (tiempos de ejecución extensos), y la necesidad de realizar un análisis de sensibilidad para evaluar las principales fuentes de incertidumbre. En la sección 2.4 se presentan los nuevos desarrollos de esta tesis, que superan las falencias detectadas, los cuales fueron realizados en conjunto con colegas del USGS.

Finalmente, en este Capítulo se presenta una “Evaluación interinstitucional de métodos y técnicas experimentales para medición de caudales en el sistema de estudio a través de Regatas de Medición de caudal”. Para ello se desarrolló por primera vez en Argentina, y en particular en el sistema de estudio, una regata de medición de caudales

la cual contó con la supervisión de un especialista del USGS de Estados Unidos. Esta institución está trabajando intensamente en el desarrollo de estas actividades en Europa (Francia) y Oceanía (Nueva Zelanda) para evaluar las ventajas de su realización ya que recientes publicaciones en revistas internacionales muestran a estas Regatas como una herramienta muy útil para estimar empíricamente la incertidumbre de los métodos y técnicas de medición de caudales. Además de la evaluación de la incertidumbre en la medición de caudales, el desarrollo de esta Regata y los resultados que se obtuvieron durante la misma contribuyeron en esta tesis a generar recomendaciones y sugerencias para el registro de datos con ADCP en el sistema de estudio.”

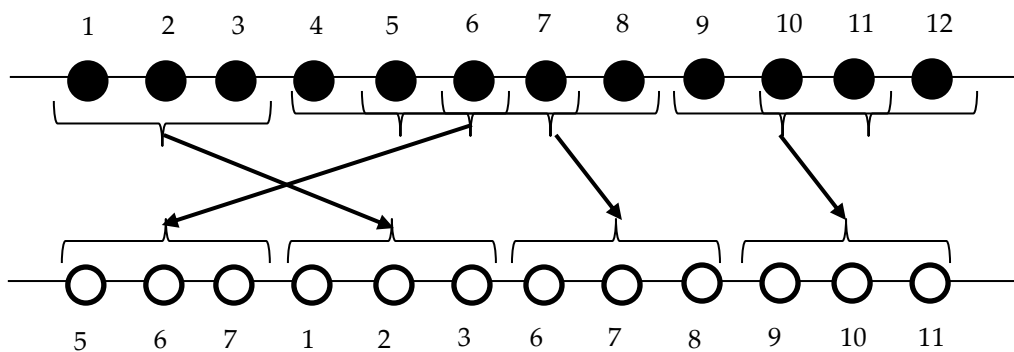
## **2.2. Determinación del tiempo óptimo de registro en mediciones estacionarias de caudal con ADCP**

### **2.2.1. Introducción**

Las mediciones estacionarias con ADCP se realizan cuando no es posible realizar mediciones desde plataforma móviles debido a: (a) Funcionamiento incorrecto del método de seguimiento de fondo debido por ejemplo a la alta carga de sedimentos y por no contar con GPS, ya sea por no poseer ese instrumental o por la imposibilidad de usarlo por la presencia de árboles u obstáculos, (b) La referenciación proporcionada por el método de seguimiento de fondo esta sesgada por presencia de transporte de fondo, no se posee o no funciona GPS y no es posible aplicar una corrección como por el método del lazo, (c) medición en ríos congelados donde es necesario perforar la capa de hielo. Las condiciones (a) y (b) son habituales en varias secciones del sistema del río Carcarañá. Las recomendaciones del USGS para realizar aforos utilizando esta metodología indican que en cada localización debe medirse un tiempo fijo de medición que es de 40 segundos en Estados Unidos y de 30 segundos en Argentina. Dicho tiempo de medición, como se ha mencionado anteriormente, proviene de las normativas de mediciones de velocidad puntuales con molinetes mecánicos y no tiene en cuenta las características del flujo (que se reflejan en la señal medida) para obtener un valor de velocidad media con un determinado nivel de error. En esta tesis, se implementa la técnica Moving Block Bootstrap (MBB) que García et al. (2006) utilizó para determinar la distribución de probabilidad de los parámetros de la turbulencia (y su incertidumbre) y que

posteriormente García (2015) aplicó para obtener el tiempo óptimo de medición en Velocímetros Acústicos Doppler. Además, a través de esta técnica es posible detectar errores que se comenten durante la medición, ya que se ven reflejados en un aumento del coeficiente de variación (CV) y desvío de la distribución de probabilidad de la señal de velocidad analizada.

La técnica MBB está basada en la técnica de Bootstrap introducida por Efron (1979) para análisis econométricos. La técnica de Bootstrap consiste en generar nuevas muestras a través de un remuestreo aleatorio de la muestra original. Con las nuevas muestras generadas es posible obtener la distribución estadística del parámetro que se esté analizando. Dado que se trabajará con señales de velocidad provenientes de un flujo turbulento, remuestrear los valores de velocidad sin tener en cuenta su correlación haría que el análisis fuese inadecuado. Es por ello que el remuestreo debe hacerse por bloques compuestos por varios valores de velocidad que mantienen una cierta correlación. A través del remuestreo de bloques se mantiene la estructura de correlación de la señal. Esta metodología de aplicación de la técnica de Bootstrap con bloques es llamada Moving Block Bootstrap. En la Figura 7 se detalla gráficamente la explicación anteriormente mencionada.



**Figura 7.:** Diagrama esquemático del método MBB para una determinada serie utilizando una longitud de tres datos por bloque. Los puntos negros representan la serie original mientras que los blancos la nueva serie generada (fuente: García et al., 2006).

### 2.2.2. Metodología

En lo que respecta a la aplicación de la técnica MBB para la determinación del tiempo óptimo, el análisis debería realizarse utilizando señales de caudal unitario por unidad de ancho, pero debido a que se busca que esta técnica se implemente a tiempo

real, se analiza únicamente la señal de velocidad medida promediada en la vertical, ya que el computo del caudal y su posterior análisis incluyen incertidumbres debido a otras variables y parámetros (extrapolación a la superficie, al fondo, etc.).

En el análisis propuesto, primero se procede a evaluar la incertidumbre de los valores de velocidad para distintos tiempos de medición (se realizaron pruebas tomando 10, 20, 30 y 40 segundos de registro). Luego se determina el tamaño de bloque óptimo. La selección de un tamaño óptimo de bloque es fundamental, ya que un tamaño de bloque grande mantiene la correlación de la señal, pero deja menos bloques para combinar y la incertidumbre será menor, en cambio un tamaño de bloque pequeño permite más combinaciones de elementos, pero puede destruir la correlación de la señal. El tamaño del bloque óptimo se determinó con la ecuación desarrollada por García et al. (2006).

Ec. 2

$$b_{opt} = 0,788 T_x^{2/3} T_m^{1/3}$$

Donde  $T_x$  es la escala integral de la señal de velocidad en segundos y  $T_m$  es el tiempo de medición en segundos.

La Ec. 2 se basa en la metodología propuesta por Politis y White (2004). Para simplificar las ecuaciones desarrolladas por los autores, García et al. (2006) adopta un modelo exponencial de para la función de autocorrelación de una señal turbulenta.

Ec. 3

$$R_{xx}(k\Delta t) = e^{-\left(\frac{k\Delta t}{T_x}\right)}$$

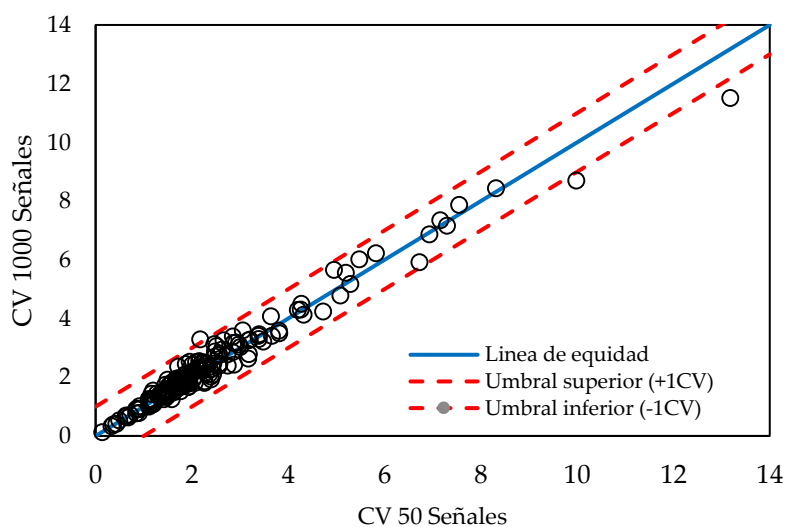
Donde  $\Delta t$  es el intervalo de tiempo entre medición de cada valor,  $k$  es la posición del dato, y  $T_x$  es la escala integral de la señal de velocidad. Reemplazando esta función de autocorrelación en las ecuaciones de Politis y White (2004), el autor obtiene una función para determinar el bloque óptimo para señales turbulentas. Dicha ecuación es más simple y rápida de resolver que las ecuaciones de Politis y White (2004). Para la obtención de la constante, García et al. (2006) realizaron una regresión utilizando datos de 37 mediciones que incluían frecuencias de muestreo de que iban de los 25 Hz a 200 Hz y tiempos de medición de entre 0,5 y 4 minutos. A través de este ajuste se obtiene finalmente la Ec. 2.



Una vez definido el bloque óptimo se generan aleatoriamente nuevas señales de velocidad de la señal medida, con las cuales se obtiene valores medios de velocidad. Del análisis estadístico del conjunto de valores medios de velocidad generados a partir del remuestreo de la serie original, se puede obtener la distribución de probabilidades de la velocidad en dicho lugar y así su coeficiente de variación.

“En esta tesis, se analizaron datos registrados por el USGS en diferentes ríos y arroyos de Estados Unidos. Estos datos fueron provistos por la oficina de Aguas Superficiales del USGS específicamente para esta tesis. Las características de los mismos se detallan en las Tablas 1 y 2. En la actualidad no existen datos registrados con mediciones estacionarias en el sistema fluvial del río Carcarañá. Sin embargo, las mediciones de este tipo son cada vez más frecuentes a nivel mundial y los avances alcanzados en esta tesis permitirán realizar estas mediciones en el sistema de estudio en secciones que lo requieran.

Para determinar el número de señales sintéticas a generar se realizó un análisis de sensibilidad generando 50, 100 y 1000 señales con el método MBB, no observándose diferencias importantes entre los resultados obtenidos al generar 50 y 1000 señales (menores a  $\pm$  unidad de CV). En la Figura 8 se muestra la comparación entre los CV utilizando 50 señales y los CV utilizando 1000 señales. Este análisis permitió reducir notablemente el tiempo computacional requerido.



**Figura 8.:** Comparación entre los coeficientes de variación (CV) de las señales de velocidad obtenidas utilizando 50 señales y 1000 señales respectivamente. Las líneas punteadas definen los umbrales superior e inferior ( $\pm 1$  unidad de CV)

**Tabla 1.:** Localización de las estaciones utilizadas para el desarrollo de la herramienta.

# de conjunto de datos	Río	Código de la Estación	Latitud	Longitud
1	Antietam Creek	01619500	39°26'59,2" N	77°43'48,7"O
2	Aroostook	01015800	46°31'23,0" N	68°22'18,0"O
3	Skykomish	12134500	47°50'15,0" N	121°39'56,0" O
4	Qu'Appelle	05JK002	50°42'23,0"N	104°47'59,0"O
5	Snoqualmie	12149000	47°39'58,0" N	121°55'27,0" O
6	Meduxnekeag	01018000	46°06'18,0" N	67°52'00,0"O
7	Truckee	10351600	39°35'05,0" N	119°26'25,0" O

**Tabla 2.:** Datos de las mediciones estacionarias utilizadas para el desarrollo de la herramienta.

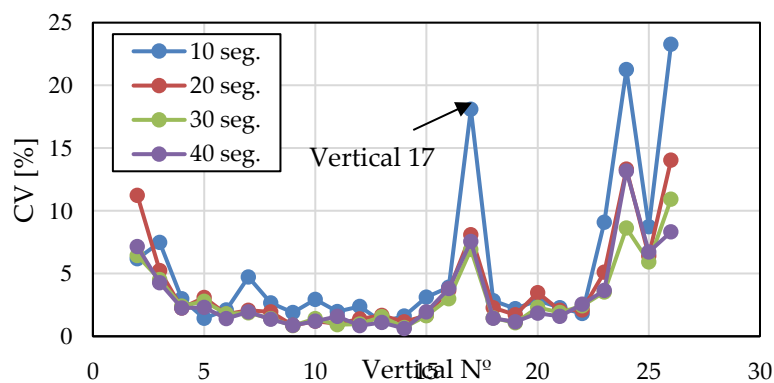
# de conjunto de datos	Fecha	Caudal [m³/s]	Ancho [m]	Profundidad Media [m]	Velocidad Media [m/s]	ADCP
1	13/05/2014	11,63	33,1	0,61	0,58	RDI/ StreamPro 2000 Mhz
2	28/07/2014	7,69	35,97	0,55	0,39	RDI/ StreamPro 2000 Mhz
3	24/03/2015	90,52	77,11	1,26	0,93	RDI/ StreamPro 2000 Mhz
4	15/03/2011	5,76	17,2	1,45	0,23	RDI/ StreamPro 2000 Mhz
5	24/03/2015	99,03	53,64	2,79	0,66	RDI/ StreamPro 2000 Mhz
6	01/08/2014	2,26	23,77	0,57	0,17	RDI/ StreamPro 2000 Mhz
7	24/07/2014	3,68	24,536	0,21	0,17	SonTek M9

### 2.2.3. Resultados

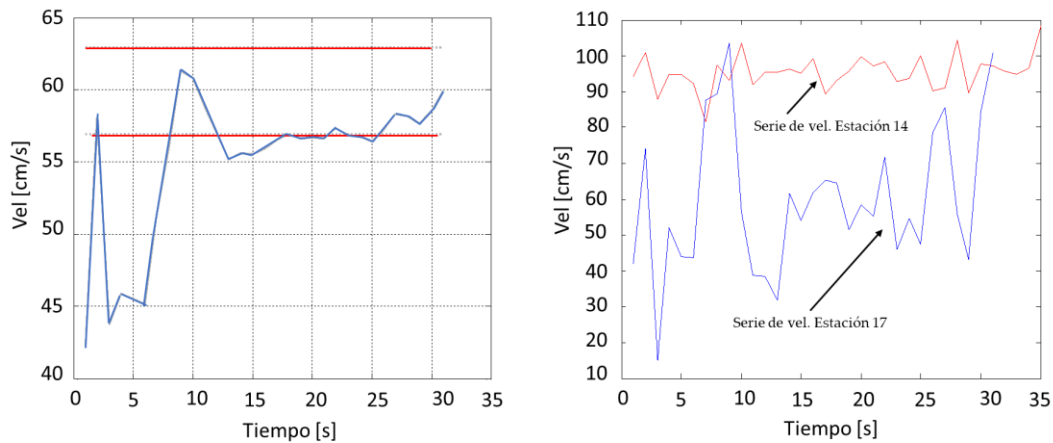
A continuación, se presenta un ejemplo que ilustra la metodología desarrollada con el conjunto de datos número 5 (ver Tablas 1 y 2). Luego se implementará la misma metodología para todo el conjunto de datos. La sección de medición 5, posee 53,64 metros de ancho y se han muestreado 25 verticales con 40 segundos cada una. Como se ha mencionado anteriormente, se ha aplicado el método MBB tomando en cada vertical una serie de datos de velocidad de 10, 20, 30 y 40 segundos (todos los datos). A partir de los valores de media y desvío de velocidad de cada vertical obtenidos con la técnica

MBB, se procedió a obtener el Coeficiente de Variación (CV) en cada vertical, los valores obtenidos se han graficado en la Figura 9.

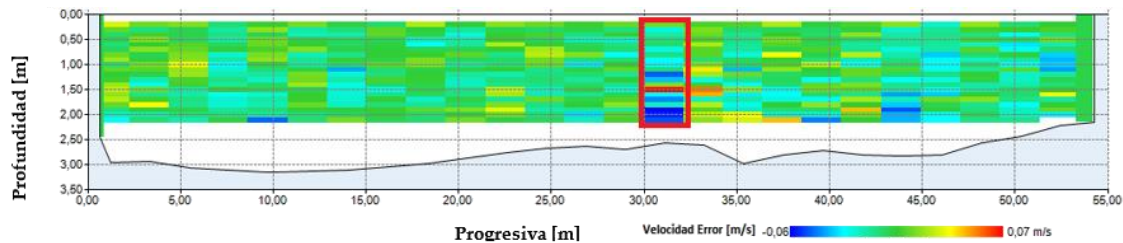
Del análisis de los coeficientes de variación puede observarse que los valores más altos se ubican en los extremos y en un sector central de la sección. En los bordes es esperable altos valores de coeficientes de variación dado que la velocidad media es baja. Actualmente se está analizando utilizar el desvío como indicador de la calidad de la medición en vez del coeficiente de variación en esos sitios de baja velocidad. Con respecto a lo que sucede en la zona central de la sección se procede a analizar las verticales 16 y 17. Si se observa el perfil de velocidades, puede verse que, en el sector de las verticales de análisis, la velocidad sufre un drástico descenso probablemente por la presencia de un obstáculo como una pila de puente. Observando en detalle los gráficos de convergencia de la media y la serie de velocidad pudo verse una importante dispersión de los valores. En la Figura 10 se muestran los gráficos mencionados para la vertical 17. Otro aspecto interesante que destacar en la Figura 11 es que la vertical 16 además de poseer un importante CV (3,6 % con 40 segundos de medición) respecto a los CV de puntos vecinos a excepción de la estación 17, posee los mayores valores de velocidad error, definida como la diferencia entre las velocidades verticales obtenidas con 2 pares diferentes de sensores del ADCP, comúnmente se conoce como Error Velocity por su nombre en inglés (Figura 11). Valores altos de velocidad error indica la presencia de un flujo no homogéneo que se da por ej. detrás de un obstáculo como una pila de puente. En análisis mostrado anteriormente muestra como esta metodología de MBB puede ser aplicada, también, para detectar registros con mayor incertidumbre en las mediciones estacionarias.



**Figura 9.:** Coeficiente de variación (CV) por vertical para el conjunto de datos número 5.



**Figura 10.:** Convergencia de la media con un intervalo 5% alrededor de la media final en la vertical 17 (izquierda) y comparación de velocidades entre el perfil 14 con bajo CV y el 17 con alto CV (derecha).

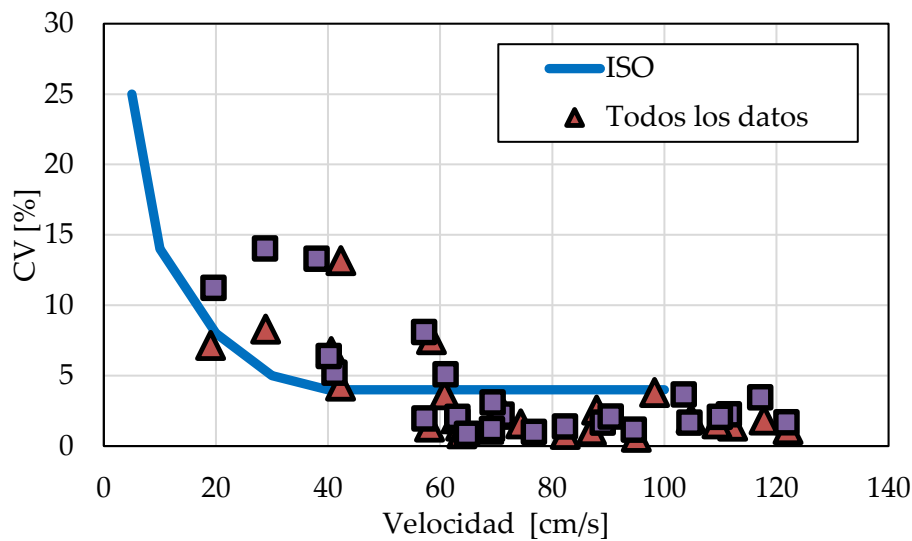


**Figura 11.:** Valores de velocidad error por celda. En rojo está marcada la vertical 16 que posee los valores más altos de velocidad error

La medición perteneciente al conjunto de datos 5 requirió un total de 1000 segundos (17 minutos aproximadamente) de registro de datos (sumando todos los tiempos de medición de cada vertical), es decir el tiempo que realmente estuvo midiendo el equipo. Comparando con las recomendaciones de ISO 748/2007 (para mediciones puntuales al 60% de la profundidad y con tiempo de muestreo de 30 segundos en cada localización) midiendo 20 segundos por vertical (excepto los 6 puntos que superan la incertidumbre tolerada por ISO aun cuando se utilicen en estas 6 localizaciones los 40 segundos de datos de velocidad registrada por el ADCP, ver Figura 12) la medición requeriría de aproximadamente de 11 minutos de medición continua lo que significa una reducción del 36% en el tiempo de medición. En la Tabla 3 se detalla el tiempo de medición continuo que requirió cada una de las mediciones analizadas (todos los conjuntos de datos) junto al tiempo que se habría sido requerido si se hubiese utilizado la técnica MBB para alcanzar un CV menor al 4% al igual que la norma ISO (se consideró constante este umbral en el análisis a pesar de que ISO define otros umbrales para velocidades menores

a 40 cm/s). Vale aclarar aquí que a pesar que el análisis se hizo también para 10 segundos de medición (10 perfiles de velocidad), se adoptó como tiempo mínimo de medición 20 segundos para de ese modo tener un valor de CV más confiable. Puede observarse que al utilizar MBB se reduce el tiempo de registro de datos entre un 35% y 48%. Cabe destacar que las mejoras en el tiempo de medición, por pequeñas que sean, pueden resultar en un gran impacto en la eficiencia de la técnica de medición. A modo ilustrativo vale mencionar que en el USGS se realizan entre 40.000 y 50.000 mediciones estacionarias de caudal por año (Oberger 2019, comunicación personal) por lo que utilizando un enfoque técnico más sólido para determinar este tiempo de registro permite ahorrar gran cantidad de tiempo y esfuerzo para la obtención de registro de caudales apropiados.

El desarrollo tecnológico propuesto en esta tesis es que, a través del método de MBB, el instrumento cada cierta cantidad de datos registrados realice este análisis en tiempo real para definir si se alcanzó el tiempo óptimo de medición. Al alcanzarse un coeficiente de variación menor a un umbral definido se finaliza la medición y se procede a medir la próxima vertical. Análisis realizados por el autor de esta tesis en un pc portátil i5 2400, 8Gb de RAM utilizando Matlab® con señales compuestas por 40 datos y generado 50 señales con MBB requiere un tiempo de procesamiento de 2 segundos aproximadamente por lo que reescribir este código en un lenguaje más eficiente y diseñado específicamente para el ADCP reduciría aún más este tiempo y permitiría implementarlo en tiempo real. En el caso de las márgenes donde la velocidad del flujo es pequeña, el valor de CV puede ser importante. Para estas situaciones se propone, en caso de que el CV no sea menor que el umbral definido luego de 40 segundos, continuar la medición hasta 60 segundos y reportar los valores medidos con los CV obtenidos en ese tiempo. Aun cuando los CV en ese sector sean importantes, la contribución a la incertidumbre total no será significativa por ser una zona de bajo caudal unitario



**Figura 12.:** Comparación de los valores de CV obtenidos con la técnica MBB y el umbral de CV definido por ISO 748/2007 para mediciones puntuales a 60% de la profundidad con 30 segundos de medición.

**Tabla 3.:** Tiempo de medición continuo utilizando 40 segundos por vertical y el tiempo de medición que habría sido requerido si se hubiese aplicado MBB.

# de conjunto de datos	Nombre de la Estación	Tiempo de medición continua requerida [seg]	Tiempo aplicando MBB [seg]	Diferencia porcentual relativa [%]
1	Antietam Creek nr. Sharpburg, MD	1000	570	-43%
2	Masardis - 01015800	960	580	-40%
3	12134500	960	490	-49%
4	Quappelle 20110310	880	480	-45%
5	12149000	1000	640	-36%
6	1018000	1120	690	-38%
7	10351600 - Derby	920	480	-48%

## 2.3. Procesamiento con QRev de datos de caudales registrados con ADCP desde plataformas móviles.

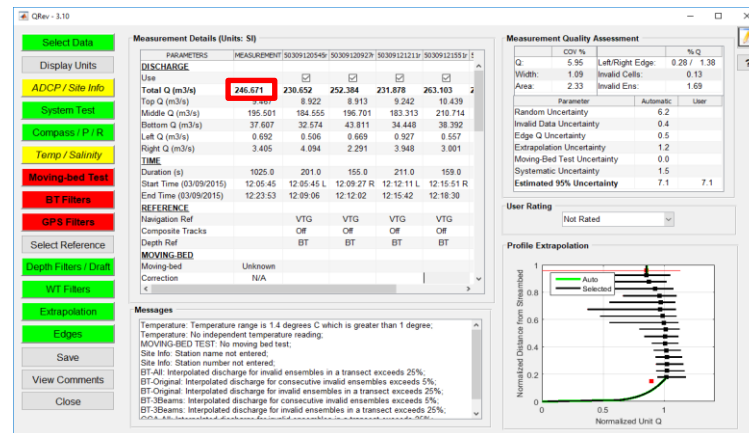
### 2.3.1. Introducción

Ante la necesidad que tenía el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) de uniformizar la forma en que se procesan los datos registrados con ADCP independientemente de la marca del equipo y de acuerdo a las normativas y recomendaciones de esa institución en 2016 se presentó un nuevo programa, desarrollado por dicho organismo, para analizar los datos registrados con ADCP de distintos fabricantes. Este programa se denomina QRev (Mueller, 2016), cuya interfaz gráfica se muestra en la Figura 13. En la actualidad existen dos grandes compañías que

comercializan la mayoría de estos instrumentos: RDI y YSI/SonTek. Dichas empresas proveen programas de procesamiento de los datos relevados por sus equipos: WinRiver II para el caso de RDI y RiverSurveyor Live (RSLive) para el caso de YSI/SonTek. Estos programas de procesamiento procesan la información de ADCP de forma diferente, lo cual produce que para un mismo conjunto de datos dichos programas arrojen valores de caudal distintos. En la Figura 14 se muestra como para un mismo conjunto de datos la forma de procesamiento que realiza cada uno de los fabricantes produce diferencias en el valor final de caudal. Puede observarse que la diferencia entre las diferentes formas de procesamiento (RSLive y Winriver II), para este caso, se encuentran dentro del error de la medición (4% cuando lo tolerable es  $< 5\%$ ), esto se debe a que el porcentaje de caudal que escurre por muestras invalidas es del 2%. Las diferencias se incrementan notablemente cuando existe una mayor pérdida de datos debido a las adversas condiciones experimentales como oleaje, fondo móvil, etc. Además de uniformizar la forma de procesamiento, QRev es una herramienta muy útil para detectar errores cometidos durante la medición notificando al usuario de dichos errores con una escala de colores tipo semáforo en los botones del programa, donde el rojo indica si el error es grave, amarillo significa advertencia de error a tener en cuenta y verde para condiciones óptimas. Los valores utilizados para generar la escala de color se desprenden de las guías y normativas del USGS. Dichas normativas pueden encontrarse resumidas en el trabajo de Mueller et al. (2013). Otra ventaja que tiene QRev es que muestra explícitamente los errores en las mediciones que los programas provistos por los fabricantes a veces no informan. A modo de ejemplo se muestra una medición analizada por el autor de esta tesis para colegas de Perú en el río Madre de Dios. En la Figura 15 puede verse como al terminar una transecta el programa RSLive como si hubiese medido toda la sección, pero al analizarla con QRev se observa claramente que se ha perdido información por falta de determinación de la velocidad del bote por el sistema de referenciación por seguimiento de fondo (Bottom Track, por su nombre en inglés).

Otra ventaja del programa es que utiliza la mayor cantidad de información disponible e interpola aquellos datos que son inválidos. A modo de ejemplo, el caso del ADCP RiverSurveyor, para obtener el caudal en una vertical el instrumento mide la

profundidad, la velocidad relativa entre el agua y el instrumento y la velocidad del bote. Si la medición de velocidad del agua es inválida, se repite la última muestra medida (ensemble) hasta 9 veces. Si la profundidad es inválida utiliza el último valor de profundidad válido medido (hasta 9 veces). Si la velocidad del bote es inválida, utiliza el ultimo valor de velocidad bote medido (hasta 9 veces). En este caso QRev utiliza para calcular el caudal en la vertical los datos válidos y al valor inválido lo interpola linealmente, lo que evita al mínimo la estimación de datos. Además, se destaca que el programa QRev cuenta con una serie de filtros que permiten determinar límites para la aceptación de un determinado valor registrado. Por ejemplo, es posible filtrar aquellas celdas cuya velocidad error (conocido comúnmente como Error Velocity por su nombre en inglés) este fuera de un determinado rango y los valores filtrados son interpolados linealmente. Los rangos de los filtros pueden ser definidos por el usuario o utilizar los valores estándar definidos por el USGS. Para más información de los filtros el lector puede remitirse al manual del usuario de QRev (Mueller, 2016).



**Figura 13.:** Interfaz Gráfica del programa computacional QRev.

Caudal procesado con RSLive

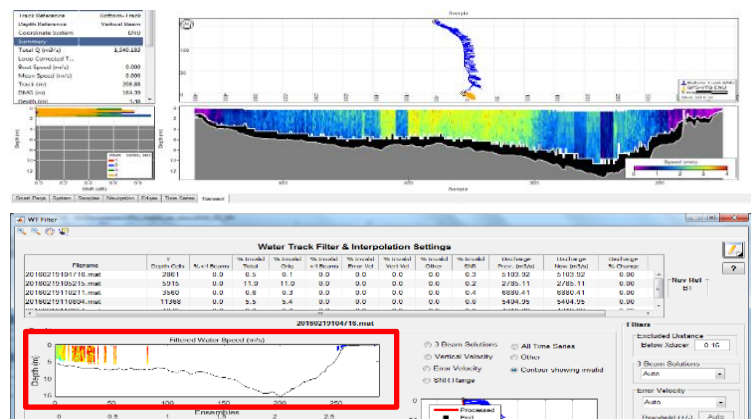
DISCHARGE					
Use	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Total Q (m³/s)	249.501	232.229	249.786	242.455	260.644
Top Q (m³/s)	12.161	11.250	12.270	11.875	12.962
Middle Q (m³/s)	202.671	190.391	200.331	199.333	212.627
Bottom Q (m³/s)	32.161	28.078	36.911	28.831	32.125
Left Q (m³/s)	0.423	0.550	-0.116	0.320	0.403
Right Q (m³/s)	2.085	1.959	0.391	2.097	2.528
TIME					
Duration (s)	1025.0	201.0	155.0	211.0	159.0
Start Time (03/09/2015)	12:05:45	12:05:45 L	12:09:27 R	12:12:11 L	12:15:51 R
End Time (03/09/2015)	12:23:53	12:09:06	12:12:02	12:15:42	12:18:30
REFERENCE					
Navigation Ref		VTG	VTG	VTG	VTG
Composite Tracks		Off	Off	Off	Off
Depth Ref		VB	VB	VB	VB
MOVING-BED					
Moving-bed		Unknown			
Correction		N/A			

Caudal procesado con WinRiver II

DISCHARGE					
Use	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Total Q (m³/s)	259.895	235.609	280.225	249.590	267.319
Top Q (m³/s)	12.709	11.703	13.863	12.082	13.242
Middle Q (m³/s)	211.848	196.508	225.346	205.825	217.481
Bottom Q (m³/s)	32.814	24.834	40.758	29.197	33.689
Left Q (m³/s)	0.426	0.561	-0.113	0.319	0.407
Right Q (m³/s)	2.098	2.003	0.371	2.167	2.499
TIME					
Duration (s)	1025.0	201.0	155.0	211.0	159.0
Start Time (03/09/2015)	12:05:45	12:05:45 L	12:09:27 R	12:12:11 L	12:15:51 R
End Time (03/09/2015)	12:23:53	12:09:06	12:12:02	12:15:42	12:18:30
REFERENCE					
Navigation Ref		VTG	VTG	VTG	VTG
Composite Tracks		Off	Off	Off	Off
Depth Ref		VB	VB	VB	VB
MOVING-BED					
Moving-bed		Unknown			
Correction		N/A			

**Figura 14.:** Comparación de procesamiento del mismo conjunto de datos con la metodología de RiverSurveyor live (YSI/SonTek) y WinRiver II (RDI)





**Figura 15.:** QRev muestra explícitamente los errores cometidos. En la parte superior de la figura se muestra que el programa RiverSurveyor Live no indica adecuadamente que se está cometiendo un error grave por pérdida de referenciación del bote mientras que en QRev se puede ver este error de manera muy clara.

Como desventajas que tiene el programa cabe mencionar que es necesario contar con una serie de librerías de Matlab® cuya licencia no es libre (ya que está escrito en este lenguaje de programación), presenta algunos problemas de estabilidad (en el momento del procesamiento puede haber un cierre repentino del programa), solo funciona en la plataforma Windows, el análisis de incertidumbre que realiza es cualitativo (Mueller, 2016) y no permite el análisis de los datos en tiempo real. Es decir, debe hacerse la recolección de los datos con los programas provistos por los fabricantes y una vez finalizada la misma se analizan los datos con QRev.

Sobre la base de las ventajas anteriormente expuestas en la implementación de QRev en el sistema de estudio es que el Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA) de la FCEfyN de la Universidad Nacional de Córdoba ha decidido implementar el uso de este programa de forma obligatoria para el procesamiento de datos con ADCP. Frente a este nuevo protocolo fue preciso verificar como impacta la nueva forma de procesamiento en los aforos realizados previamente y en las herramientas generadas. Además, mediante el uso de esta versátil herramienta se pretende generar recomendaciones para el registro de datos con ADCP en el sistema fluvial de estudio.

### 2.3.2. Metodología

Para comparar los resultados obtenidos al procesar las mediciones de ADCP utilizando los programas QRev (v. 3.10) y Riversurveyor Live, RSL (v. 4.0), ya que el instrumento utilizado fue el RiverSurveyor S5. En primera instancia se compararon los

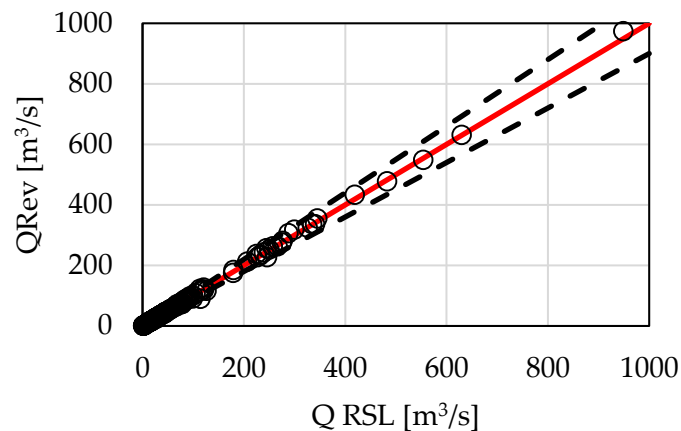
resultados obtenidos por ambos programas seleccionando la configuración óptima (aquel que tiene la menor cantidad de datos perdidos) de referenciación de la plataforma móvil donde se encuentra instalada el ADCP. Se define el sistema de referenciación óptimo como aquel sistema de referencia que minimiza el coeficiente de variación de los caudales muestreados en los distintos cruces o transectas durante una medición completa de caudal (ya sea utilizando referencia por seguimiento de fondo, GPS o combinación de ambos). Para esta primera actividad se procesaron 191 conjuntos de mediciones completas (compuestas de múltiples transectas o cruces) realizadas por el grupo de trabajo donde el autor realiza su tesis (participando en la mayoría de esas mediciones). Posteriormente, debido a que en algunas situaciones el usuario no cuenta con la posibilidad de elegir entre distintos sistemas de referencia (por limitaciones de cada sistema), se comparó el desempeño de los programas QRev y RiverSurveyor Live procesando separadamente mediciones realizadas con los sistemas de referencia óptimo, por seguimiento de fondo y GPS. Para esta actividad se seleccionó un conjunto reducido de datos (23 mediciones) que representan distintas condiciones de flujo (ver tablas 4, 5, 6, 7, 8, 9, y 10).

### **2.3.3. Resultados**

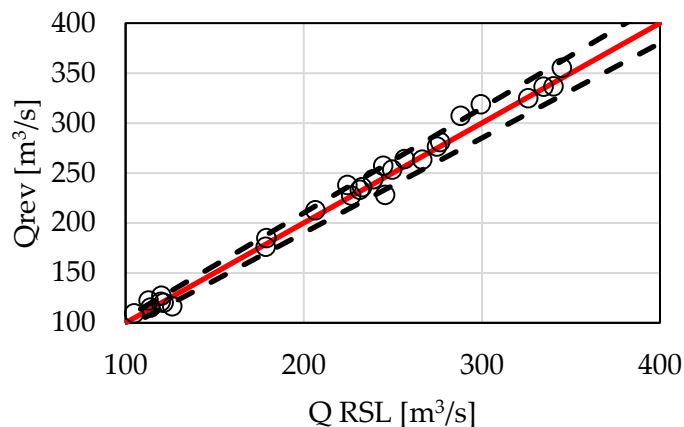
#### Mediciones realizadas con el sistema óptimo de seguimiento del instrumental

En la Figura 16 se muestra el contraste entre los caudales obtenidos procesando con QRev y RiverSurveyor Live las mediciones realizadas seleccionando la configuración óptima de referenciación (definido como aquel que tiene la menor cantidad de datos perdidos) de la plataforma móvil donde se encuentra instalada el ADCP en el rango completo de condiciones de flujo monitoreadas (191 mediciones completas). El contraste incluido en la Figura 16 muestra que los valores obtenidos del procesamiento con ambos programas generalmente no difieren más de  $\pm 10\%$ , aunque un importante número de mediciones caen fuera del intervalo del  $\pm 5\%$  como se muestra en la Figura 17 donde se incluyen las mediciones realizadas en el rango de  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $400 \text{ m}^3/\text{s}$ . Estas diferencias exceden el error generalmente admisible en mediciones con ADCP lo que muestra la conveniencia de realizar el procesamiento de las mediciones con las nuevas

herramientas propuestas en el estado del arte por el USGS de Estados Unidos (QRev) aun cuando el sistema de seguimiento del instrumental sea el óptimo.



**Figura 16.:** Comparación de los caudales resultantes de procesar las mediciones utilizando los programas Qrev y RiverSurveyor Live. Las mediciones fueron realizadas con un ADCP YSI/SonTek S5. Líneas punteadas representan los intervalos de  $\pm 10\%$  de variación



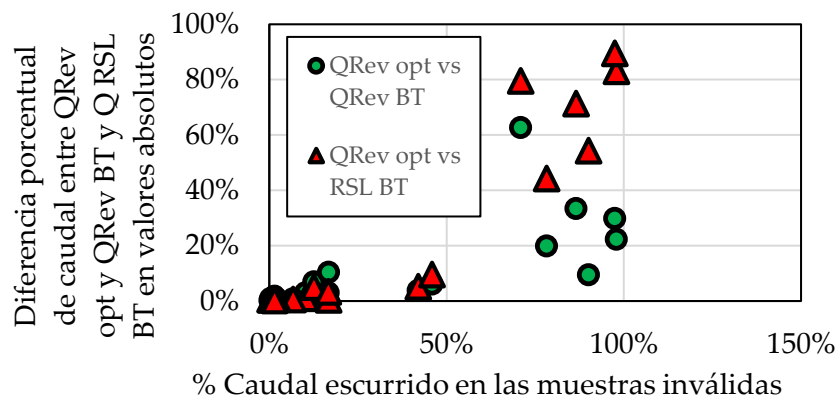
**Figura 17.:** Comparación de los caudales resultantes de procesar las mediciones utilizando los programas Qrev y RiverSurveyor Live para el rango de caudales entre 100 y 400 m³/s. Las mediciones fueron realizadas con un ADCP YSI/SonTek S5. Líneas punteadas representan los intervalos de  $\pm 5\%$  de variación.

#### Mediciones realizadas con el sistema de seguimiento de fondo

Realizada la comparación entre los resultados del procesamiento de las mediciones de caudal con ambos programas para un sistema de seguimiento óptimo (aquel que tiene la menor cantidad de datos perdidos), a continuación, se analiza el caso donde solo se disponga como sistema de referencia del instrumental el seguimiento de fondo. El sistema de seguimiento de fondo del ADCP YSI/SonTek S5 utilizado para realizar las mediciones tiene falencias significativas (debido a la frecuencia acústica utilizada,

3MHz) para profundidades mayores a 2,5m lo que generalmente sucede en las zonas centrales de cada sección de medición en condiciones de aguas medias y altas.

En primer lugar, para evaluar los errores que se generan al utilizar como sistema de referencia de fondo en condiciones adversas de flujo, se contrastan los resultados del procesamiento con QRev de las mediciones realizadas con el sistema de referencia óptimo (considerado como valor de referencia en este procesamiento, ver Tabla 4) y analizados con Qrev y RiverSurveyor Live (Tablas 5 y 6). Del análisis realizado se desprende que, si el porcentaje de caudal que escurre en las verticales donde falla el sistema de seguimiento, es mayor al 50%, se observan diferencias porcentuales absolutas generalmente mayores al 10% en las determinaciones de caudales (Tabla 7 y Figura 18). Esta importante pérdida de muestras se suele dar en regiones de la sección con alta velocidad y/o profundidades mayores a 2,5 m (generalmente donde se concentra el mayor caudal). Frente a esta problemática QRev, a pesar de que interpola eficientemente los datos faltantes, no puede estimar adecuadamente el caudal porque gran parte de la sección no esta medida (principalmente donde escurren los mayores caudales). En estos casos donde se observa un gran porcentaje de muestras perdidas, se recomienda utilizar el sistema de seguimiento por GPS (si está disponible) o cambiar la sección de medición.

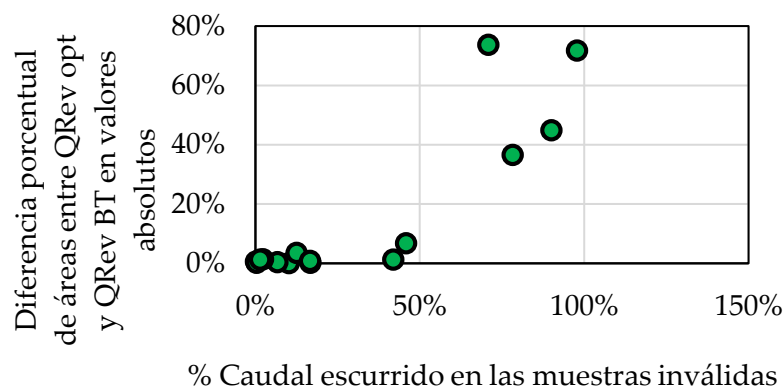


**Figura 18.:** Relación entre la diferencia porcentual existente entre los valores de caudal obtenidos del procesamiento con QRev y Riversurveyor Live (RSL) de mediciones con sistema de referencia óptimo y de fondo (BT) y el porcentaje de caudal que escurre en las muestras invalidas para los datos procesados con QRev utilizando el sistema de referencia por seguimiento de fondo.

Con respecto a RiverSurveyor Live puede verse que las diferencias porcentuales entre los valores obtenidos del procesamiento realizado con este programa con el sistema de seguimiento de fondo y los caudales obtenidos con QRev con la configuración óptima

son mayores a los obtenidos con QRev bajo el mismo sistema de referencia, principalmente en condiciones donde la pérdida de muestras afectan a zonas donde escurren caudales mayores al 50% del total (Figura 18). Esta diferencia se debe a que en condiciones de flujo en las cuales el ADCP S5 registra datos inválidos, estos son reemplazados de diferentes maneras por los dos programas de procesamiento (QRev y RiverSurveyor Live). Cuando el ADCP pierde una muestra, RiverSurveyor Live repite el ultimo valor calculado (velocidad de bote, profundidad, o velocidad del agua) registrado hasta 9 veces consecutivas. Si el instrumento continúa perdiendo datos, descarta todas las muestras hasta que registra una nueva mientras que QRev interpola los datos faltantes cuando sucede esto.

Si se procede a analizar las áreas obtenidas por ambos programas a mediciones realizadas con el sistema de seguimiento de fondo puede verse que el área obtenida por QRev en la mayoría de los casos es mayor que la de RiverSurveyor Live (Tabla 7), esto se debe nuevamente a la interpolación que realiza QRev que aprovecha la información existente en vez de descartarla como hace el otro programa. Además, puede verse que si por las muestras perdidas escurre el 50% del caudal o más, la diferencia de caudal es mayor al 20% (Figura 19).

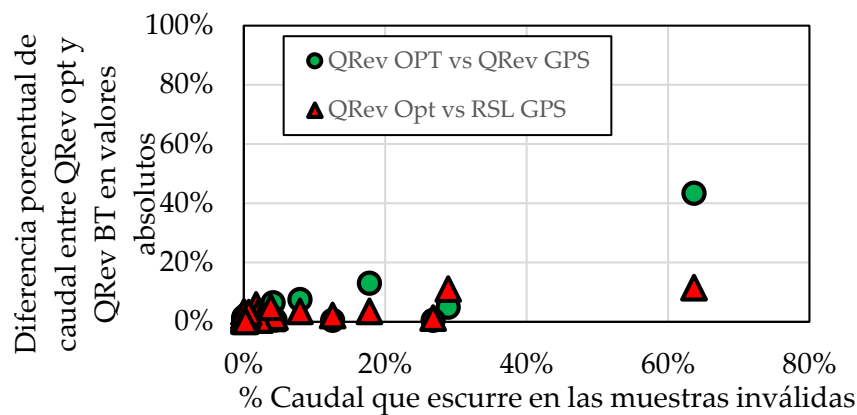


**Figura 19.:** Evolución de la diferencia porcentual de áreas de flujo estimadas con QRev y RiverSurveyor Live (RSL), ambos utilizando el sistema de referencia por seguimiento de fondo con el porcentaje de caudal que escurren en las muestras inválidas.

#### Mediciones realizadas con el sistema de seguimiento por GPS

Ahora se realiza el mismo análisis, pero ahora utilizando los datos registrados con el sistema de referencia GPS (Tablas 8 y 9). Del procesamiento de los datos puede

observarse que las diferencias porcentuales que se obtienen al contrastarlas con la óptima se reducen notablemente debido a las pocas muestras inválidas obtenidas (Figura 20). Con respecto a los valores que poseen un número alto de muestras inválidas y una baja diferencia porcentual puede decirse que las mismas han perdido GPS, pero en gran parte la señal GPS detectada era de menor calidad a la óptima (El instrumento la reporta como GPS calidad 2), este valor de menor calidad es filtrado por QRev (es decir QRev lo considera inválido) y el valor de velocidad del bote es interpolado. En cambio, RiverSurveyor Live utiliza este dato de menor calidad.

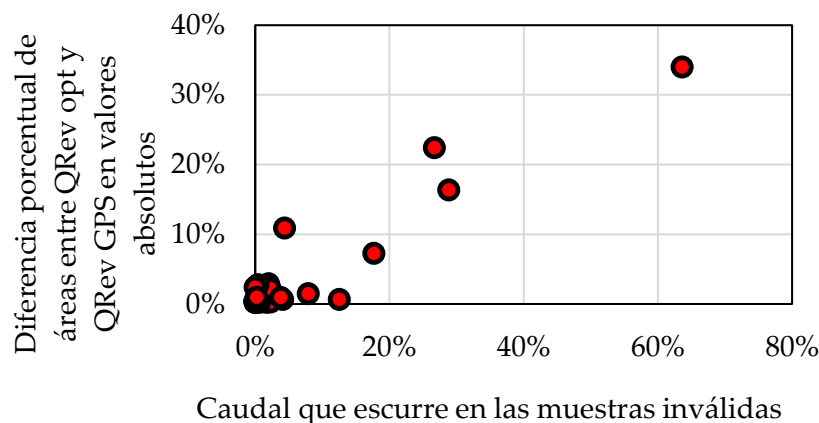


**Figura 20.:** Diferencia porcentual entre el caudal obtenido con QRev para la configuración óptima y el porcentaje de caudal que escurre en las muestras inválidas para datos procesados con QRev y RiverSurveyor utilizando el sistema de referenciación GPS.

Si al igual que en caso anterior se procede a analizar la diferencia de áreas bajo el sistema de referencia GPS (Tabla 10 y Figura 21), se observa que a las diferencias porcentuales entre ambos sistemas se incrementan a medida que más muestras perdidas se tiene, al igual que en el caso anterior, en la mayoría de las mediciones QRev reporta un área mayor debido a la interpolación que realiza.

Para finalizar puede decirse que la diferencias entre caudales medios obtenidos al procesar las mediciones con ambos programas son menores al 10% cuando la medición se realiza adecuadamente bajo condiciones de flujo para las que fue diseñado el equipo, con poca pérdida de muestras y seleccionando el sistema de referencia más adecuado. Aun así, esas pequeñas diferencias son del orden de los errores esperados al realizar mediciones con ADCP por lo que se recomienda utilizar las herramientas desarrolladas por el USGS de Estados Unidos (QRev) ya que por sus técnicas de procesamiento de los

datos faltantes permite utilizar la mayor cantidad de datos posibles e interpola los faltantes mejorando en muchos casos la determinación del caudal. Cabe destacar que si se tiene muchas muestras perdidas las diferencias de los resultados entre ambos RiverSurveyor Live y QRev es notable. Estas importantes diferencias se dan cuando las muestras inválidas representan más del 50% del caudal total. En estos casos se recomienda cambiar de sección o seleccionar un instrumento (si esto fuera posible) acorde a las características del flujo que se mide. Además, se destaca la capacidad de QRev para detectar errores e inconsistencias en las mediciones. Con respecto a la implementación de QRev en el país, esta herramienta no está siendo muy utilizada principalmente por falta de conocimiento de su existencia y de las ventajas que presenta. El grupo de trabajo del CETA – UNC, donde se elaboró esta tesis, fue pionera en implementar esta herramienta al país y actualmente en las jornadas de capacitación que realiza la institución se capacita a los colegas sobre esta herramienta para el procesamiento de los datos. Al momento de escritura de esta tesis el código de QRev está siendo traducido a lenguaje Python de manera de optimizar su funcionamiento. También cabe destacar que se está trabajando en mejorar la estimación de la incertidumbre incluida en QRev a través de la implementación de la técnica de Montecarlo que se presenta en esta tesis y que describirá en el apartado posterior. El grupo de trabajo del CETA, junto a investigadores del CANADA WATER SERVICE y el USGS está trabajando en esa implementación.



**Figura 21.:** Evolución de la diferencia porcentual de áreas de escurrimientos obtenidas al procesar las mediciones con QRev y RiverSurveyor Live (ambos utilizando el sistema de referencia GPS) con el porcentaje de caudal que escurre en las muestras inválidas.

A partir del análisis presentado en las tablas 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 se obtienen las siguientes recomendaciones para las mediciones de caudal en el sistema de estudio para un ADCP SonTek S5 para obtener valores de CV menores a 20%. Si se selecciona como sistema de referencia el seguimiento de fondo (Bottom track, BT) se puede utilizar en el siguiente rango de caudales en el sistema de estudio: (A) Villa María hasta 70 m<sup>3</sup>/s (en esta sección puede haber un sesgo por fondo móvil) (B) Bell Ville hasta 40 m<sup>3</sup>/s (C) Saladillo hasta 10 m<sup>3</sup>/s y (D) Cruz Alta hasta 70 m<sup>3</sup>/s. Finalmente cabe destacar que el GPS puede presentar inconvenientes cuando el número de satélites utilizados en el seguimiento es menor a 4 (calidad 2 de GPS en Villa María por ej.).



**Tabla 4.:** Comparación entre resultados del procesamiento de datos obtenidos con QRev y RiverSurveyor Live con la configuración optima

Sección	Fecha	Configuración Optima.		
		Caudal RS Live [m³/s]	Caudal QRev [m³/s]	Diferencia relativa [%]
Río Saladillo, Puente Ruta 6	10/09/2013	9,2	9,4	-2,0%
Río Saladillo - Puente Ruta 6	08/09/2015	22,6	22,9	-1,5%
Río Saladillo - Puente Ruta 6	08/03/2016	224,4	238,0	-5,7%
Río Saladillo - Puente Ruta 6	09/03/2015	266,5	263,3	1,2%
Río Tercero - Puente Sarmiento, Bell Ville	05/09/2016	28,1	27,9	0,8%
Río Tercero - Puente Sarmiento, Bell Ville	09/06/2015	30,0	29,8	0,8%
Río Tercero - Puente Sarmiento, Bell Ville	28/04/2015	34,3	34,6	-0,8%
Río Tercero - Puente Sarmiento, Bell Ville	09/03/2015	249,6	253,3	-1,5%
Río Tercero - Puente Sarmiento, Bell Ville	05/03/2014	256,7	262,4	-2,2%
Río Tercero - Puente Alberdi, Villa Maria	07/11/2016	18,5	18,5	-0,1%
Río Tercero - Puente Alberdi, Villa Maria	07/06/2016	29,2	26,1	11,6%
Río Tercero - Puente Alberdi, Villa Maria	22/12/2015	78,1	72,8	7,2%
Río Carcarañá, Puente Ruta 9	28/04/2015	244,5	257,4	-5,0%
Río Carcarañá, Ruta 9	08/03/2016	418,2	433,8	-3,6%
Río Carcarañá, Puente ruta 12 (Inrville)	09/03/2015	629,4	631,5	-0,3%
Río Carcarañá, Cruz Alta	11/06/2013	49,8	49,7	0,2%
Río Carcarañá, Cruz Alta	08/09/2015	64,9	65,4	-0,8%
Río Carcarañá, Cruz Alta	08/11/2016	151,1	156,7	-3,5%
Río Carcarañá, Cruz Alta	07/06/2016	178,9	184,7	-3,1%
Río Carcarañá, Cruz Alta	09/03/2015	948,7	984,3	-3,6%
Río Santa Rosa - Puente Negro	11/02/2015	11,9	11,9	0,4%
Río Santa Rosa - Puente Negro	04/03/2015	39,3	39,5	-0,3%
Río Tercero - Puente San Marcos Este, San Marcos Sud	05/03/2014	232,8	235,9	-1,3%

**Tabla 5.:** Resultados obtenidos con QRev seleccionado como sistema de referencia el sistema de seguimiento de fondo (Bottom Track, BT)

Sección	Fecha	QRev: Sistema de Seguimiento de fondo (Bottom Track)							
		Caudal QRev [m³/s]	CV [%]	Área [m²]	CV [%]	Ancho [m]	CV [%]	Prof. Max [m]	Vmedia [m/s]
Río Saladillo, Puente Ruta 6	10/09/2013	9,4	2,3	18,8	0,8	22	2,07	1,7	0,5
Río Saladillo - Puente Ruta 6	08/09/2015	18,4	13,5	29,5	9,4	21,3	8,5	2,4	0,6
Río Saladillo - Puente Ruta 6	08/03/2016	215,7	48,3	123,4	34,7	29,7	25	5,9	1,7
Río Saladillo - Puente Ruta 6	09/03/2015	321,8	64,6	285	78	47,5	63	7,8	1,1
Río Tercero - Puente Sarmiento, Bell Ville	05/09/2016	28,7	2,7	31,8	3,7	25,9	2,1	1,8	0,9
Río Tercero - Puente Sarmiento, Bell Ville	09/06/2015	29,6	7,8	31,8	7,3	26,4	5,8	1,8	0,9
Río Tercero - Puente Sarmiento, Bell Ville	28/04/2015	32,2	9,4	36	3,8	27,1	3	2,0	0,9
Río Tercero - Puente Sarmiento, Bell Ville	09/03/2015	TODAS LAS VERTICALES SON INVALIDAS							
Río Tercero - Puente Sarmiento, Bell Ville	05/03/2014	TODAS LAS VERTICALES SON INVALIDAS							
Río Tercero - Puente Alberdi, Villa Maria	07/11/2016	20,4	12,5	27,2	12,2	38,2	9,8	1,2	0,8
Río Tercero - Puente Alberdi, Villa Maria	07/06/2016	27,1	9,6	36,6	5,6	43,1	14,7	1,6	0,7
Río Tercero - Puente Alberdi, Villa Maria	22/12/2015	68,4	9	65,3	14,3	42	12,1	2,4	1
Río Carcarañá, Puente Ruta 9	28/04/2015	TODAS LAS VERTICALES SON INVALIDAS							
Río Carcarañá, Ruta 9	08/03/2016	TODAS LAS VERTICALES SON INVALIDAS							
Río Carcarañá, Puente ruta 12 (Inrville)	09/03/2015	TODAS LAS VERTICALES SON INVALIDAS							
Río Carcarañá, Cruz Alta	11/06/2013	49,4	3,7	77,6	2,1	56	2,5	2,4	0,6
Río Carcarañá, Cruz Alta	08/09/2015	63,4	3,5	87,9	2,3	61,6	3,8	2,4	0,7
Río Carcarañá, Cruz Alta	08/11/2016	110	49,2	197,4	21,3	81	20,1	4,0	0,6
Río Carcarañá, Cruz Alta	07/06/2016	123,2	39,4	154	17	63,7	17	4,0	0,8
Río Carcarañá, Cruz Alta	09/03/2015	368,1	111	627,9	120,7	116,3	76,6	9,3	0,6
Río Santa Rosa - Puente Negro	11/02/2015	11,8	4	29,1	0,4	25,2	0,5	1,6	0,4
Río Santa Rosa - Puente Negro	04/03/2015	38,8	4,9	43,1	3,2	31	2,7	2,1	0,9
Río Tercero - Puente San Marcos Este, San Marcos Sud	05/03/2014	TODAS LAS VERTICALES SON INVALIDAS							

**Tabla 6.:** Resultados obtenidos con RiverSurveyor Live seleccionado como sistema de referencia el sistema de seguimiento de fondo (Bottom Track, BT)

Sección	Fecha	RSL: Sistema de Seguimiento de fondo (Bottom Track)							
		Caudal RS Live [m³/s]	CV [%]	Area [m²]	CV [%]	Ancho [m]	CV [%]	Prof. Max [m]	Vmedia [m/s]
Río Saladillo, Puente Ruta 6	10/09/2013	9,3	1,5	18,9	0,7	21,7	1,0	1,7	0,5
Río Saladillo - Puente Ruta 6	08/09/2015	12,8	16,4	18,7	19,7	16,1	17,1	2,4	0,7
Río Saladillo - Puente Ruta 6	08/03/2016	108,8	26,0	68,1	18,7	19,9	14,5	5,9	1,6
Río Saladillo - Puente Ruta 6	09/03/2015	44,7	129,5	80,7	56,0	16,3	39,0	7,8	0,6
Río Tercero - Puente Sarmiento, Bell Ville	05/09/2016	28,2	2,3	31,8	2,9	25,9	2,8	1,8	0,9
Río Tercero - Puente Sarmiento, Bell Ville	09/06/2015	30,0	6,7	31,7	6,8	26,5	5,4	1,8	0,9
Río Tercero - Puente Sarmiento, Bell Ville	28/04/2015	32,9	7,0	34,7	1,9	27,1	1,9	2,0	0,9
Río Tercero - Puente Sarmiento, Bell Ville	09/03/2015	TODAS LAS VERTICALES SON INVALIDAS							
Río Tercero - Puente Sarmiento, Bell Ville	05/03/2014	TODAS LAS VERTICALES SON INVALIDAS							
Río Tercero - Puente Alberdi, Villa Maria	07/11/2016	18,6	10,5	27,2	11,1	38,4	8,1	1,2	0,7
Río Tercero - Puente Alberdi, Villa Maria	07/06/2016	27,5	7,5	37,0	6,1	40,5	4,7	1,6	0,7
Río Tercero - Puente Alberdi, Villa Maria	22/12/2015	65,9	7,7	60,9	7,2	40,3	7,6	2,4	1,1
Río Carcarañá, Puente Ruta 9	28/04/2015	TODAS LAS VERTICALES SON INVALIDAS							
Río Carcarañá, Ruta 9	08/03/2016	TODAS LAS VERTICALES SON INVALIDAS							
Río Carcarañá, Puente ruta 12 (Inrville)	09/03/2015	TODAS LAS VERTICALES SON INVALIDAS							
Río Carcarañá, Cruz Alta	11/06/2013	50,0	3,3	76,6	1,7	57,3	4,9	2,4	0,7
Río Carcarañá, Cruz Alta	08/09/2015	63,2	3,1	87,3	2,4	60,4	1,9	2,4	0,7
Río Carcarañá, Cruz Alta	08/11/2016	16,5	147,2	29,3	54,1	18,9	40,0	4,0	0,6
Río Carcarañá, Cruz Alta	07/06/2016	53,0	29,3	67,2	8,2	34,6	5,2	4,0	0,8
Río Carcarañá, Cruz Alta	09/03/2015	201,2	44,3	166,0	13,3	63,1	5,6	9,3	1,2
Río Santa Rosa - Puente Negro	11/02/2015	11,9	3,8	29,1	0,2	25,2	1,1	1,6	0,4
Río Santa Rosa - Puente Negro	04/03/2015	39,5	4,0	42,6	2,6	31,3	1,8	2,1	0,9
Río Tercero - Puente San Marcos Este, San Marcos Sud	05/03/2014	TODAS LAS VERTICALES SON INVALIDAS							

**Tabla 7.:** Resultados obtenidos de la comparación de los caudales obtenidos con QRev BT, QRev con configuración optima y RiverSurveyor live BT

Sección	Fecha	% del caudal medido	Muestras Invalidas [%Q] obtenida de QRev	Diferencia Rel. de caudal QRev Opt vs Qrev BT	Diferencia Rel. de caudal QRev Opt vs RSL BT	Diferencia Rel. de caudal QRev BT vs RSL BT	Diferencia Rel. áreas QRev BT vs RSL BT
Río Saladillo, Puente Ruta 6	10/09/2013	67,5	0%	0%	-1%	0%	1%
Rio Saladillo - Puente Ruta 6	08/09/2015	66,8	78%	-20%	-44%	-30%	-36%
Rio Saladillo - Puente Ruta 6	08/03/2016	70,2	90%	-9%	-54%	-50%	-45%
Rio Saladillo - Puente Ruta 6	09/03/2015	61,7	98%	22%	-83%	-86%	-72%
Rio Tercero - Puente Sarmiento, Bell Ville	05/09/2016	71,3	10%	3%	1%	-2%	0%
Rio Tercero - Puente Sarmiento, Bell Ville	09/06/2015	67,6	7%	-1%	1%	1%	0%
Rio Tercero - Puente Sarmiento, Bell Ville	28/04/2015	70,1	13%	-7%	-5%	2%	-3%
Rio Tercero - Puente Sarmiento, Bell Ville	09/03/2015	TODAS LAS VERTICALES SON INVALIDAS					
Rio Tercero - Puente Sarmiento, Bell Ville	05/03/2014	TODAS LAS VERTICALES SON INVALIDAS					
Rio Tercero - Puente Alberdi, Villa Maria	07/11/2016	55,7	17%	10%	0%	-9%	0%
Rio Tercero - Puente Alberdi, Villa Maria	07/06/2016	57,6	42%	4%	5%	1%	1%
Rio Tercero - Puente Alberdi, Villa Maria	22/12/2015	70,3	46%	-6%	-9%	-4%	-7%
Río Carcarañá, Puente Ruta 9	28/04/2015	TODAS LAS VERTICALES SON INVALIDAS					
Río Carcarañá, Ruta 9	08/03/2016	TODAS LAS VERTICALES SON INVALIDAS					
Río Carcarañá, Puente ruta 12 (Inriville)	09/03/2015	TODAS LAS VERTICALES SON INVALIDAS					
Río Carcarañá, Cruz Alta	11/06/2013	73,7	2%	-1%	1%	1%	-1%
Río Carcarañá, Cruz Alta	08/09/2015	72,6	17%	-3%	-3%	0%	-1%
Río Carcarañá, Cruz Alta	08/11/2016	67,7	97%	-30%	-89%	-85%	-85%
Río Carcarañá, Cruz Alta	07/06/2016	72,5	87%	-33%	-71%	-57%	-56%
Río Carcarañá, Cruz Alta	09/03/2015	66	71%	-63%	-80%	-45%	-74%
Río Santa Rosa - Puente Negro	11/02/2015	72,4	0%	-1%	0%	1%	0%
Río Santa Rosa - Puente Negro	04/03/2015	72,6	2%	-2%	0%	2%	-1%
Rio Tercero - Puente San Marcos Este, San Marcos Sud	05/03/2014	TODAS LAS VERTICALES SON INVALIDAS					

**Tabla 8.:** Resultados obtenidos con QRev seleccionado como sistema de referencia el GPS

Sección	Fecha	QRev: Sistema de Referencia GPS							
		Caudal Qrev [m³/s]	CV [%]	Área [m²]	CV [%]	Ancho [m]	CV [%]	Prof. Max [m]	Vmedia [m/s]
Río Saladillo, Puente Ruta 6	10/09/2013	9,3	1,6	18,8	1,6	21,7	1,7	1,7	0,5
Río Saladillo - Puente Ruta 6	08/09/2015	22,5	2,0	32,1	0,8	23,0	0,6	2,4	0,7
Río Saladillo - Puente Ruta 6	08/03/2016	233,0	3,4	129,0	1,5	31,2	2,7	5,9	1,8
Río Saladillo - Puente Ruta 6	09/03/2015	280,3	7,4	186,1	1,5	32,5	2,6	7,8	1,5
Río Tercero - Puente Sarmiento, Bell Ville	05/09/2016	28,6	2,8	31,6	3,1	25,7	1,5	1,8	0,9
Río Tercero - Puente Sarmiento, Bell Ville	09/06/2015	31,3	21,7	30,9	18,5	25,0	18,8	1,8	1,0
Río Tercero - Puente Sarmiento, Bell Ville	28/04/2015	33,8	8,6	33,2	5,7	24,6	6,6	2,0	1,0
Río Tercero - Puente Sarmiento, Bell Ville	09/03/2015	254,9	6,0	242,4	1,8	44,9	1,1	8,3	1,1
Río Tercero - Puente Sarmiento, Bell Ville	05/03/2014	263,9	7,3	234,1	4,7	44,2	3,5	8,2	1,1
Río Tercero - Puente Alberdi, Villa Maria	07/11/2016	18,7	3,9	25,7	7,1	36,3	6,4	1,2	0,7
Río Tercero - Puente Alberdi, Villa Maria	07/06/2016	14,8	81,2	26,1	55,2	34,1	60,4	1,6	0,6
Río Tercero - Puente Alberdi, Villa Maria	22/12/2015	13,9	79,1	54,6	56,9	31,8	41,9	2,4	0,3
Río Carcarañá, Puente Ruta 9	28/04/2015	252,2	11,2	395,5	6,9	68,1	5,9	8,1	0,6
Río Carcarañá, Ruta 9	08/03/2016	466,7	10,5	522,4	5,8	81,1	7,0	9,4	0,9
Río Carcarañá, Puente ruta 12 (Inrville)	09/03/2015	647,7	1,8	474,8	4,2	91,9	5,8	8,3	1,4
Río Carcarañá, Cruz Alta	11/06/2013	50,1	1,7	78,2	0,9	56,5	1,6	2,4	0,6
Río Carcarañá, Cruz Alta	08/09/2015	64,8	2,4	87,5	0,9	61,3	3,8	2,4	0,7
Río Carcarañá, Cruz Alta	08/11/2016	154,2	5,1	149,4	2,2	65,6	1,8	4,0	1,0
Río Carcarañá, Cruz Alta	07/06/2016	181,8	2,8	172,9	0,9	68,2	0,4	4,0	1,1
Río Carcarañá, Cruz Alta	09/03/2015	856,1	22,4	585,3	9,5	114,8	7,3	9,3	1,5
Río Santa Rosa - Puente Negro	11/02/2015	11,7	4,2	29,2	1,8	25,3	2,0	1,6	0,4
Río Santa Rosa - Puente Negro	04/03/2015	38,8	2,3	43,0	1,1	31,1	1,5	2,1	0,9
Río Tercero - Puente San Marcos Este, San Marcos Sud	05/03/2014	237,0	9,4	207,8	14,1	37,7	9,5	7,7	1,1

**Tabla 9.:** Resultados obtenidos con RiverSurveyor Live seleccionado como sistema de referencia el sistema GPS

Sección	Fecha	RSL: Sistema de Referencia GPS							
		Caudal RS Live [m³/s]	CV [%]	Área [m²]	CV [%]	Ancho [m]	CV [%]	Prof. Max [m]	Vmedia [m/s]
Río Saladillo, Puente Ruta 6	10/09/2013	9,2	1,4	18,9	1,6	21,7	0,8	1,7	0,5
Río Saladillo - Puente Ruta 6	08/09/2015	22,7	1,6	32,0	0,5	23,0	0,9	2,4	0,7
Río Saladillo - Puente Ruta 6	08/03/2016	224,4	3,1	129,3	1,4	31,0	0,0	5,9	1,7
Río Saladillo - Puente Ruta 6	09/03/2015	266,5	6,7	187,3	0,9	34,5	1,3	7,8	1,4
Río Tercero - Puente Sarmiento, Bell Ville	05/09/2016	27,7	4,4	31,5	3,4	25,9	2,8	1,8	0,9
Río Tercero - Puente Sarmiento, Bell Ville	09/06/2015	26,5	21,7	25,8	21,0	21,2	18,3	1,8	1,0
Río Tercero - Puente Sarmiento, Bell Ville	28/04/2015	33,5	8,0	32,2	7,1	24,2	9,9	2,0	1,0
Río Tercero - Puente Sarmiento, Bell Ville	09/03/2015	249,3	4,6	216,1	2,5	45,0	1,0	8,3	1,2
Río Tercero - Puente Sarmiento, Bell Ville	05/03/2014	256,7	4,2	232,6	6,8	44,3	3,0	8,2	1,1
Río Tercero - Puente Alberdi, Villa Maria	07/11/2016	18,6	2,5	25,1	4,8	35,9	2,6	1,2	0,7
Río Tercero - Puente Alberdi, Villa Maria	07/06/2016	29,2	2,9	35,0	2,7	37,7	1,7	1,6	0,8
Río Tercero - Puente Alberdi, Villa Maria	22/12/2015	78,4	1,8	64,2	2,1	40,8	0,8	2,4	1,2
Río Carcarañá, Puente Ruta 9	28/04/2015	244,5	11,8	391,8	5,6	69,9	5,5	8,1	0,6
Río Carcarañá, Ruta 9	08/03/2016	418,3	8,9	514,8	5,1	76,9	4,5	9,4	0,8
Río Carcarañá, Puente ruta 12 (Inrville)	09/03/2015	619,4	2,2	461,7	4,4	93,7	4,4	8,3	1,3
Río Carcarañá, Cruz Alta	11/06/2013	50,6	1,2	76,3	0,5	56,8	1,7	2,4	0,7
Río Carcarañá, Cruz Alta	08/09/2015	65,1	1,9	87,1	0,7	60,0	0,8	2,4	0,8
Río Carcarañá, Cruz Alta	08/11/2016	151,4	4,8	149,7	2,0	65,6	1,6	4,0	1,0
Río Carcarañá, Cruz Alta	07/06/2016	178,9	2,5	172,5	0,7	68,3	0,4	4,0	1,0
Río Carcarañá, Cruz Alta	09/03/2015	949,7	2,0	627,8	1,0	120,7	0,5	9,3	1,5
Río Santa Rosa - Puente Negro	11/02/2015	11,8	3,9	29,1	1,5	25,4	2,0	1,6	0,4
Río Santa Rosa - Puente Negro	04/03/2015	39,5	4,0	42,6	2,6	31,3	1,8	2,1	0,9
Río Tercero - Puente San Marcos Este, San Marcos Sud	05/03/2014	232,8	1,1	161,2	4,1	37,4	5,1	7,7	1,4

**Tabla 10.:** Resultados obtenidos de la comparación de los caudales obtenidos con QRev GPS, QRev con configuración optima y RiverSurveyor live GPS

Sección	Fecha	%medido	Muestras Invalidas [%Q] obtenida de QRev	Diferencia Rel. de caudal QRev Opt vs Qrev GPS	Diferencia Rel. de caudal QRev Opt vs RSL GPS	Diferencia Rel. de caudal QRev GPS vs RSL GPS	Diferencia Rel. áreas QRev GPS vs RSL GPS
Río Saladillo, Puente Ruta 6	10/09/2013	67,3	0%	-1%	-2%	-1%	0%
Río Saladillo - Puente Ruta 6	08/09/2015	68,1	0%	-2%	-1%	1%	0%
Río Saladillo - Puente Ruta 6	08/03/2016	73,1	2%	-2%	-6%	-4%	0%
Río Saladillo - Puente Ruta 6	09/03/2015	74,2	4%	6%	1%	-5%	1%
Río Tercero - Puente Sarmiento, Bell Ville	05/09/2016	71,4	2%	2%	-1%	-3%	0%
Río Tercero - Puente Sarmiento, Bell Ville	09/06/2015	68,4	29%	5%	-11%	-15%	-16%
Río Tercero - Puente Sarmiento, Bell Ville	28/04/2015	70,4	2%	-2%	-3%	-1%	-3%
Río Tercero - Puente Sarmiento, Bell Ville	09/03/2015	81,3	4%	1%	-2%	-2%	-11%
Río Tercero - Puente Sarmiento, Bell Ville	05/03/2014	77,6	13%	1%	-2%	-3%	-1%
Río Tercero - Puente Alberdi, Villa Maria	07/11/2016	55,6	2%	1%	1%	0%	-2%
Río Tercero - Puente Alberdi, Villa Maria	07/06/2016	57,8	64%	-43%	12%	97%	34%
Río Tercero - Puente Alberdi, Villa Maria	22/12/2015	70,6		-81%	8%	464%	18%
Río Carcarañá, Puente Ruta 9	28/04/2015	80,7	4%	-2%	-5%	-3%	-1%
Río Carcarañá, Ruta 9	08/03/2016	77,8	8%	8%	-4%	-10%	-1%
Río Carcarañá, Puente ruta 12 (Inrville)	09/03/2015	71,1	0%	3%	-2%	-4%	-3%
Río Carcarañá, Cruz Alta	11/06/2013	73,8	0%	1%	2%	1%	-2%
Río Carcarañá, Cruz Alta	08/09/2015	72,7	0%	-1%	0%	0%	-1%
Río Carcarañá, Cruz Alta	08/11/2016	75,3	0%	-2%	-3%	-2%	0%
Río Carcarañá, Cruz Alta	07/06/2016	75,3	1%	-2%	-3%	-2%	0%
Río Carcarañá, Cruz Alta	09/03/2015	76,5	18%	-13%	-4%	11%	7%
Río Santa Rosa - Puente Negro	11/02/2015	72,4	0%	-1%	0%	1%	0%
Río Santa Rosa - Puente Negro	04/03/2015	72,6	0%	-2%	0%	2%	-1%
Río Tercero - Puente San Marcos Este, San Marcos Sud	05/03/2014	72,4	27%	0%	-1%	-2%	-22%

## **2.4. Estimación de la incertidumbre en mediciones de caudal con ADCP desde plataformas móviles mediante el uso de métodos computacionales**

### **2.4.1. Introducción**

El método de Montecarlo es un método computacional estadístico (Metropolis y Ulam, 1949) que permite estimar la distribución de probabilidad de una variable donde es complejo determinar su distribución probabilística en forma analítica mediante alguna formulación matemática. El método se llamó así en referencia a Montecarlo (Mónaco) por ser “la capital del juego de azar”. El método para estimar la incertidumbre básicamente consiste en muestrear aleatoriamente un determinado número de veces la distribución de probabilidad de las variables y/o parámetros que contribuyen a la incertidumbre de la variable de interés (estas pueden ser tipo A, donde los parámetros de la distribución de probabilidad son determinados en base a los datos existentes, o tipo B donde los parámetros de la distribución son definidos en base a la experiencia). Al ser los muestreos aleatorios, los valores de la variable o parámetro de interés irán variando de simulación en simulación, luego con la serie de valores de la variable de interés generada se puede calcular la distribución de probabilidad de esa variable.

La ventaja del método es que se puede obtener la distribución de probabilidad de cualquier variable sin importar que distribución tengan las variables de entrada. La principal desventaja radica en la gran cantidad de simulaciones que son necesarias para arribar a un resultado confiable. Esto se debe a que el método Montecarlo realiza un muestreo totalmente aleatorio que produce que los valores correspondientes a aquellas zonas de la distribución con mayor probabilidad de ocurrencia tienen mayor probabilidad de ser muestreados. Este muestreo implica que es necesario un gran número de simulaciones para poder muestrear los valores con menor probabilidad de ocurrencia, lo que conlleva a un gran costo computacional y lentitud en el cálculo. Por ello se propone otro método de muestreo conocido como “Latin Hypercube” y actualmente se encuentra en discusión su implementación para análisis de incertidumbre. Resultados obtenidos recientemente muestran que con solo 200 simulaciones de mediciones de caudal con ADCP utilizando esta técnica de muestreo se obtiene la misma dispersión que 1000 simulaciones de Montecarlo. En términos de computaciones se necesitan 18 segundos por transecta (200 simulaciones con Latin



Hypercube) para obtener el mismo resultado que 1000 simulaciones de Montecarlo (57 segundos). En otras palabras, Latin Hypercube es 3 veces más rápido según pruebas realizadas en una PC I7 con 8 Gb de RAM, con lo cual la metodología es prometedora.

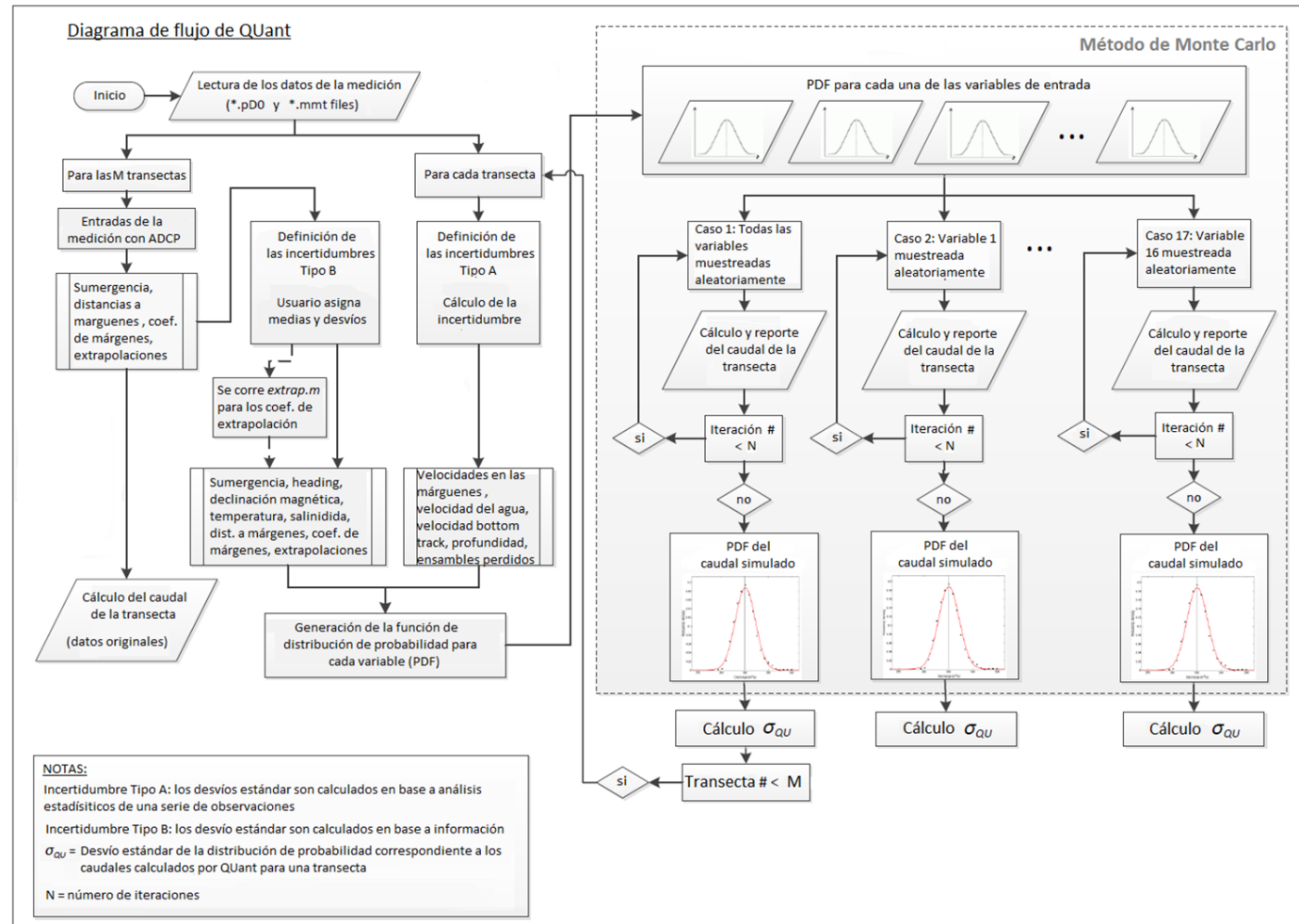
Moore et al. (2016) desarrollaron un programa computacional en Matlab® llamado QUant donde se implementa el método de Montecarlo para cuantificar la incertidumbre en mediciones con ADCP. El programa permite determinar el impacto que tiene en la contribución a la incertidumbre total de la medición de caudal cada una de las 16 variables intervinientes en el cálculo de caudal (Profundidad, velocidad del agua, velocidad del bote, temperatura, salinidad, sumergencia del equipo, cabeceo, declinación magnética, distancia a las márgenes izquierda y derecha, velocidad en las márgenes izquierda y derecha, extrapolación de la zona no medida, coeficiente de las márgenes izquierda y derecha y muestras perdidas). Para ello se determina el caudal de cada transecta realizando un cierto número de simulaciones de Montecarlo (actualmente 1000) y en cada simulación se analiza únicamente la variable que desea evaluarse su contribución a la incertidumbre de caudal. Posteriormente es posible variar aleatoriamente todas las variables en conjunto y determinar la incertidumbre total de cada transecta (Figura 22). Es importante destacar que al día de la fecha QUant no permite analizar datos registrados utilizando GPS como técnica de seguimiento del bote. Por ello la referenciación de las velocidades del bote y del agua en QUant se realiza con el sistema “referencia por seguimiento de fondo” (Bottom Track, por su nombre en inglés). Además, en un primer momento QUant funcionaba para datos obtenidos con ADCP de la marca RDI, actualmente se ha hecho una modificación en el código que permite cargar datos procesados con QRev (incluyendo así todos los fabricantes). Gracias a esta modificación es posible realizar análisis de incertidumbre en datos generados con ADCPs de la marca YSI/SonTek como el que se utilizó en el sistema de estudio.

Para obtener la incertidumbre de la medición (compuesta por un conjunto de transectas) Moore et al. (2016) utiliza el método de la incertidumbre relativa estándar (RSU, por sus siglas en inglés) bajo la hipótesis que todas las variables son independientes entre sí al igual en todas las transectas. En esta tesis se propone una

metodología que tiene en cuenta esta correlación entre las variables la cual se detallará a continuación y se realiza un análisis de sensibilidad para evaluar las principales fuentes de incertidumbre en las mediciones de caudal realizadas en el sistema fluvial de estudio.

#### **2.4.2. Metodología**

En primer lugar se realizó un análisis exploratorio, que incluyó interacciones con investigadores del USGS, a los fines de determinar cuáles de las variables consideradas originalmente por QUant deberían mantenerse en el análisis y cuáles deberían variar aleatoriamente en cada muestra, cuáles en cada transecta y cuáles permanecen iguales a lo largo de toda la medición (ver Tabla 11). Se detalla, también en dicha tabla, los desvíos de los parámetros, dichos valores están en concordancia con los seleccionados por Moore et al (2016) a excepción de la sumergencia, ya que los 5 cm originales propuestos por los autores es excesivo para el bote donde se montó instrumento Sontek S5 para aforar el sistema de estudio. Se justifica el valor de 1 cm ya que es el error (por la apreciación que se puede tener el campo) que se puede tener al medir sumergencia de un bote más pequeño y en donde se puede realizar la medición fuera del agua”. En esa tabla se resalta que las variables Salinidad, Cabeceo y Declinación Magnética fueron descartadas del análisis de simulación debido a su baja contribución a la incertidumbre total (Coeficiente de variación del caudal  $< 0,4$ ) cuando el sistema de referencia utilizado es “referencia por seguimiento de fondo” (Bottom Track). Esto se condice con lo mencionado por Mueller et al. (2013) en donde se menciona que estas variables no afectan los valores de caudal notablemente cuando no se utiliza GPS como sistema de referencia. En esta tabla también se detallan los valores de desvío estándar utilizados. Se asume como distribución de probabilidad de todas las variables la distribución normal acorde con Moore et al. (2016)



**Figura 22.:** Diagrama de flujo del programa QUant y cálculo de la incertidumbre en el caudal (Fuente: Moore et al., 2016)

**Tabla 11.:** Variables que cambian en cada pulso, transecta y medición junto al desvío estándar que utilizan en QUant

VARIABLE	PARÁMETROS QUE CAMBIAN EN CADA:			DESVIO
	MUESTRA	TRANSECTA	MEDICIÓN	
Profundidad	X			Desvío estándar obtenido a partir de las 4 profundidades por cada muestra
Velocidad del agua (relativa al instrumento)	X			Desvío estándar obtenido a partir de la velocidad error
Velocidad del bote	X			Desvío estándar obtenido a partir de la velocidad error para seguimiento de fondo
Temperatura	X			2°C
Salinidad			X	2 PPT
Sumergencia			X	0,01 m
Cabeceo	X			2°
Declinación Magnética			X	2°
Dist. a margen izquierda		X		30%
Dist. a margen derecha		X		30%
Velocidad margen izquierda		X		Desvío estándar de las velocidades en la margen izquierda
Velocidad margen derecha		X		Desvío estándar de las velocidades en la margen derecha
Extrapolación			X	Diferencia entre el caudal extrapolado en la zona (superior y cercana al

				fondo) calculado con él una función potencial a la 1/6 y el mejor ajuste determinado mediante extrap*
Coef. margen izquierda			X	<b>10%</b>
Coef. margen derecha			X	<b>10%</b>
Muestras perdidas	X			**Diferencia absoluta entre las muestras perdidas de caudal calculadas de dos maneras (ver texto abajo)
<p>*Extrap es un programa desarrollado por el USGS para seleccionar el mejor método de extrapolación de las zonas no medidas (Mueller, 2013)</p> <p>** (1) Calculando el caudal de la muestra perdida repitiendo la siguiente muestra valida (método que usa WinRiver II) y (2) calculando el caudal de la muestra perdida utilizando la última muestra valida (método que usa RiverSurveyor Live)</p>				

Una vez definidas las variables a incluir en el análisis, se procede a calcular el caudal  $Q_{n1}$  correspondiente a la primer transecta, muestreando aleatoriamente todas las variables involucradas y almacenando los valores de aquellas variables que se repiten a lo largo de la medición (ver Tabla 11). Luego para cada una de las M transectas, se ejecutan N simulaciones de Monte Carlo, utilizando los valores guardados para el caso de las variables que se repiten y muestreando aleatoriamente las demás variables, calculando los caudales  $Q_{nm}$  correspondientes (con n que va de 1 a N y m que va de 1 a M). Posteriormente para cada simulación, los M valores de caudal son promediados obteniendo un caudal para cada medición (M transecta) por simulación  $Q_n$ . Finalmente, con N valores de  $Q_n$  se obtiene la distribución de probabilidad correspondiente a la medición de caudal utilizando el coeficiente de variación (CV) como un estimador de la incertidumbre de la misma. Para cada conjunto de datos se efectuaron 1000 simulaciones de Monte Carlo (N = 1000). La metodología anteriormente descrita se detalla en el diagrama de flujo de la Figura 23.



**Figura 23.:** Diagrama de flujo del método de análisis de incertidumbre propuesto para las mediciones de caudal de múltiples transectas.

Para evaluar esta metodología, se confeccionó una base de datos (Tabla 12) de medición de caudal buscando representar diferentes condiciones de flujo y asegurando que en todos los casos se haya utilizado y funcione correctamente el sistema de seguimiento de fondo o Bottom-track, ya que como se mencionó anteriormente, en la actualidad QUant todavía no permite procesar datos recolectados utilizando como referencia el GPS. La totalidad de los datos fueron recolectados por un ADCP YSI/SonTek S5 cuyas características técnicas fueron mencionadas anteriormente. Las secciones donde se tomaron los datos son secciones monitoreadas estacionalmente por el CETA – UNC desde hace más de 5 años. Las mismas son: (A) río Tercero en la localidad de Bell Ville, coordenadas 32°37'42.88"S, 62°41'38.19"O (B) río Saladillo puente ruta provincial 6, coordenadas 32°55'53.91"S, 62°19'54.59"O y (C) arroyo Tortugas en el puente de ruta 9 coordenadas 32°44'44.29"S 61°49'50.55"O.

**Tabla 12.:** Base de datos utilizada para la aplicación del QUant a los tributarios del río Carcarañá.

Categoría	Rango	Definición del rango	Conjuntos de datos
<i>Profundidad</i>	Poco profunda	Prof. media < 1 m	Bell Ville 08/09/2015, Bell Ville 08/11/2016, Saladillo 10/09/2013, Saladillo 30/09/2013,

			Tortugas 11/06/2014, Tortugas 12/09/2017, Tortugas 14/03/2017
	Moderada	1 m < Prof. media < 2 m	Bell Ville 09/06/2015, Bell Ville 09/09/2014, Bell Ville 16/10/2014, Bell Ville 18/11/2014, Bell Ville 28/04/2015, Saladillo 09/09/2014, Saladillo 10/06/2014, Saladillo 16/10/2014, Saladillo 18/11/2014, Saladillo 19/11/2013
	Profunda	Prof. media > 2 m	Tortugas 20/11/2013
<b>Velocidad del agua</b>	Baja	Velocidad media < 0,5 m/s	Saladillo 10/09/2013, Saladillo 18/11/2014, Tortugas 14/03/2017
	Moderada	Velocidad media 0,5 – 1,0 m/s	Bell Ville 08/09/2015, Bell Ville 08/11/2016, Bell Ville 09/06/2015, Bell Ville 09/09/2014, Bell Ville 16/10/2014, Bell Ville 18/11/2014, Bell Ville 28/04/2015, Saladillo 09/09/2014, Saladillo 10/06/2014, Saladillo 19/11/2013, Saladillo 30/09/2013, Tortugas 11/06/2014, Tortugas 12/09/2017, Tortugas 20/11/2013
	Alta	Velocidad media > 1,0 m/s	
<b>Área no medida</b>	Importante en las márgenes.	Caudal en la margen > 10 %	
	Moderado en las márgenes.	Caudal en la margen < 10%	Bell Ville 08/09/2015, Bell Ville 08/11/2016, Bell Ville 09/06/2015, Bell Ville 09/09/2014, Bell Ville 16/10/2014, Bell Ville 18/11/2014, Bell Ville 28/04/2015, Saladillo 09/09/2014, Saladillo 10/09/2013, Saladillo 10/06/2014, Saladillo 16/10/2014, Saladillo 18/11/2014, Saladillo 19/11/2013, Saladillo 30/09/2013, Tortugas 11/06/2014, Tortugas 12/09/2017, Tortugas 14/03/2017, Tortugas 20/11/2013
	Importante en toda la sección.	% caudal no medido > 50 %	
	Moderado en toda la sección.	% caudal no medido < 30 %	Bell Ville 08/09/2015, Bell Ville 08/11/2016, Bell Ville 09/06/2015, Bell Ville 09/09/2014, Bell Ville 16/10/2014, Bell Ville 18/11/2014, Bell Ville 28/04/2015, Saladillo 09/09/2014, Saladillo 10/09/2013, Saladillo 16/10/2014, Saladillo 18/11/2014, Saladillo 19/11/2013, Saladillo 30/09/2013, Tortugas 11/06/2014, Tortugas 14/03/2017
	% Datos inválidos	% celdas inválidas > 10 %	
		% ensambles inválidos > 20 %	
		% ensambles perdidos > 20 %	Saladillo 10/06/2014, Saladillo 16/10/2014, Tortugas 20/11/2013, Saladillo 09/09/2014

### **2.4.3. Resultados**

En las Figuras 24, 25 y 26 se muestran los resultados de los análisis realizados en las diferentes secciones que afora periódicamente el CETA – UNC en la cuenca del río Carcarañá con el ADCP YSI/SonTek S5. Los porcentajes indicados en los gráficos de torta indican la contribución que tiene cada variable en la varianza total del caudal medida con ADCP desde plataforma móviles. Del análisis de las figuras puede observarse que la incertidumbre de las variables sumergencia del ADCP y muestras perdidas son las que más contribuyen a la incertidumbre total de caudal.

### **2.4.4. Análisis de los resultados**

En las Figuras 24, 25 y 26 se observa que la variable sumergencia de ADCP tiene un impacto importante cuando los caudales escurridos son bajos en las secciones analizadas. Esto se debe a que, para condiciones de flujo bajas, al ser bajo el tirante, errores en la determinación de la sumergencia del equipo producen que el área de blanqueo de ADCP y profundidad cambien y dado a la poca profundidad el impacto de estos cambios es importante. De este análisis desprende que debe medirse minuciosamente la sumergencia del equipo en condiciones de estiaje.

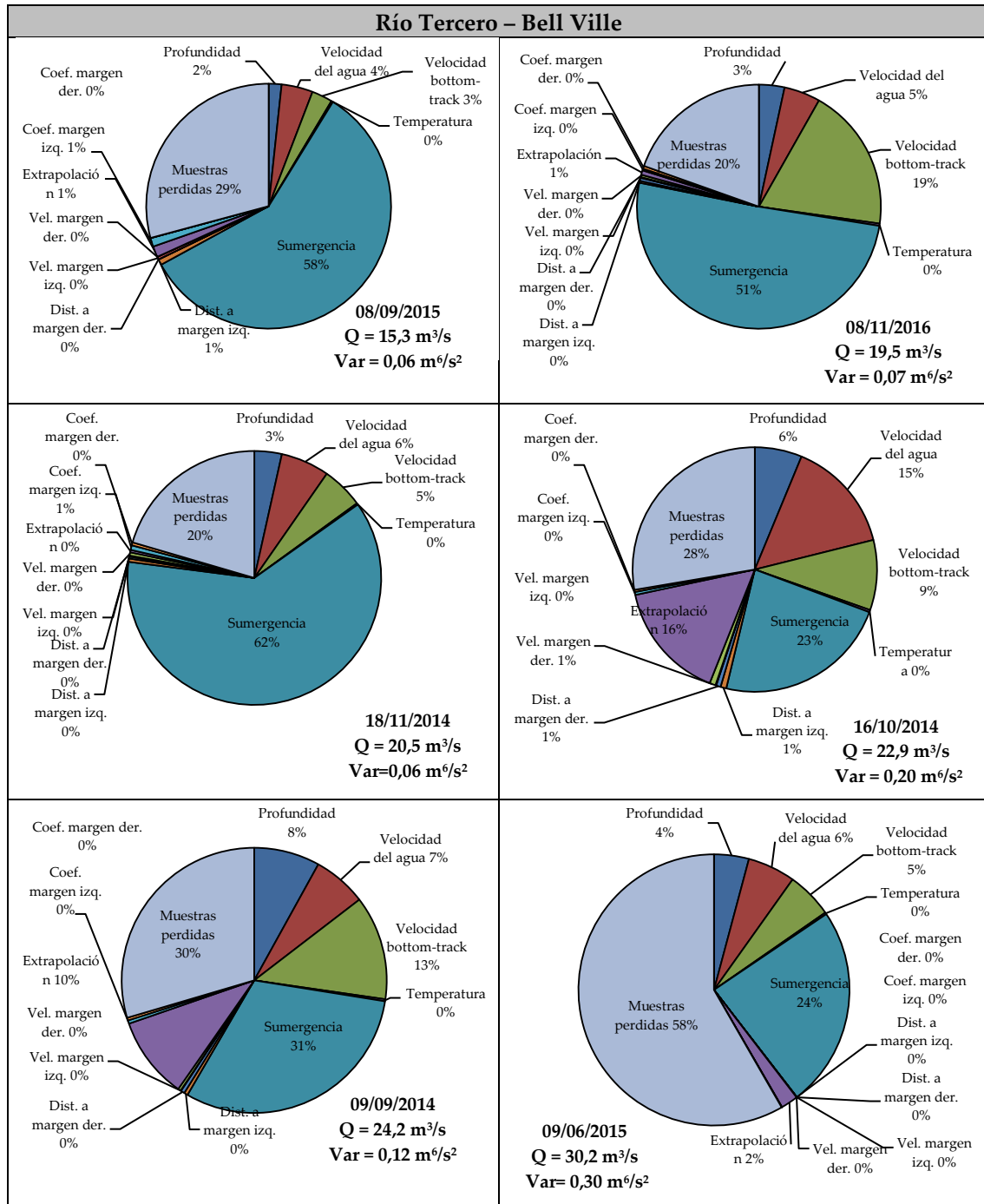
Con respecto a las muestras perdidas, lo que sucede es que gran parte de estas muestras perdidas se dan en zonas de mayor caudal, lo cual produce una incertidumbre importante en la medición. Estas pérdidas de muestras suelen producirse en esas zonas, porque el flujo es profundo (mayor a 2,5 metros en caso de usar el sistema de ref. de seguimiento de fondo –Bottom Track- con el ADCP S5) o hay alta velocidad y turbulencia. El análisis de los datos muestra un gran impacto de las muestras perdidas en la incertidumbre de caudal. Es por ello que el operario debe prestar atención a la cantidad de muestras perdidas durante la medición y en el caso de que las mismas sean excesivas se debe cambiar de sección o de instrumento.

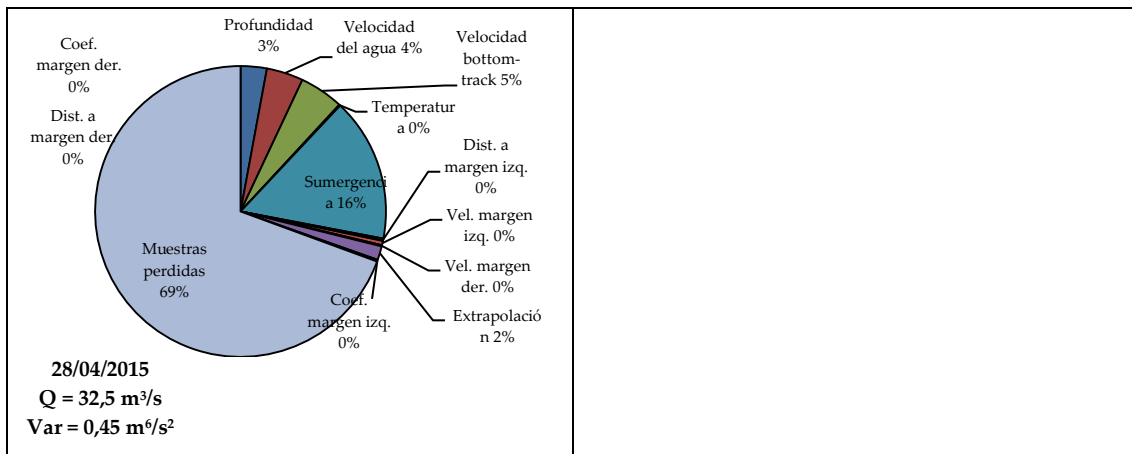
Con respecto a las incertidumbres de variables temperatura, coeficiente de márgenes, distancia a las márgenes, velocidad de las márgenes no se observaron contribuciones importantes. En el caso de las márgenes la incertidumbre es baja ya que al ser la embarcación pequeña y poder controlarla adecuadamente con la soga, el equipo mide muy cerca de las márgenes reduciendo la incertidumbre. Las variaciones de



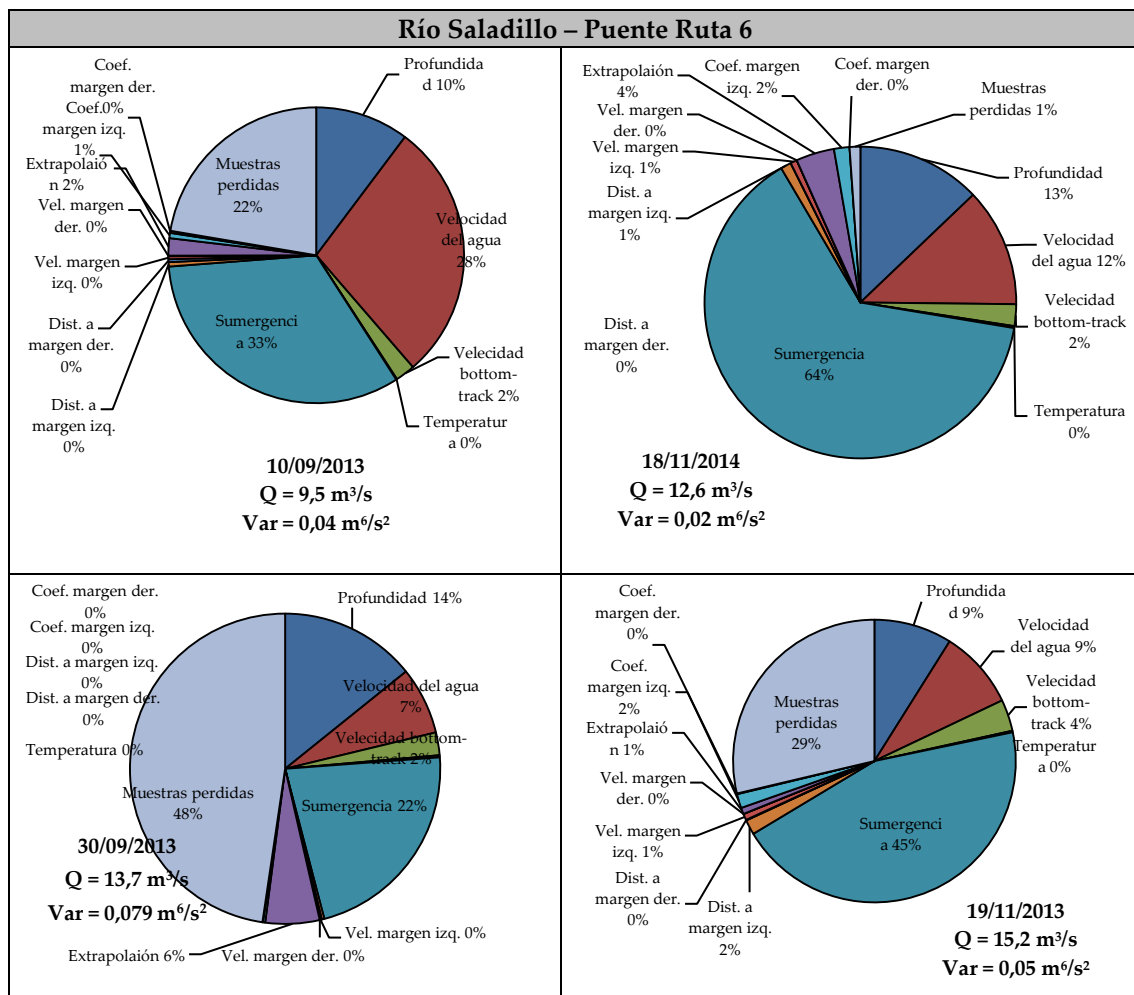
temperaturas detectadas suelen ser menor a los 2°C, lo cual tiene un impacto menor en la incertidumbre total.

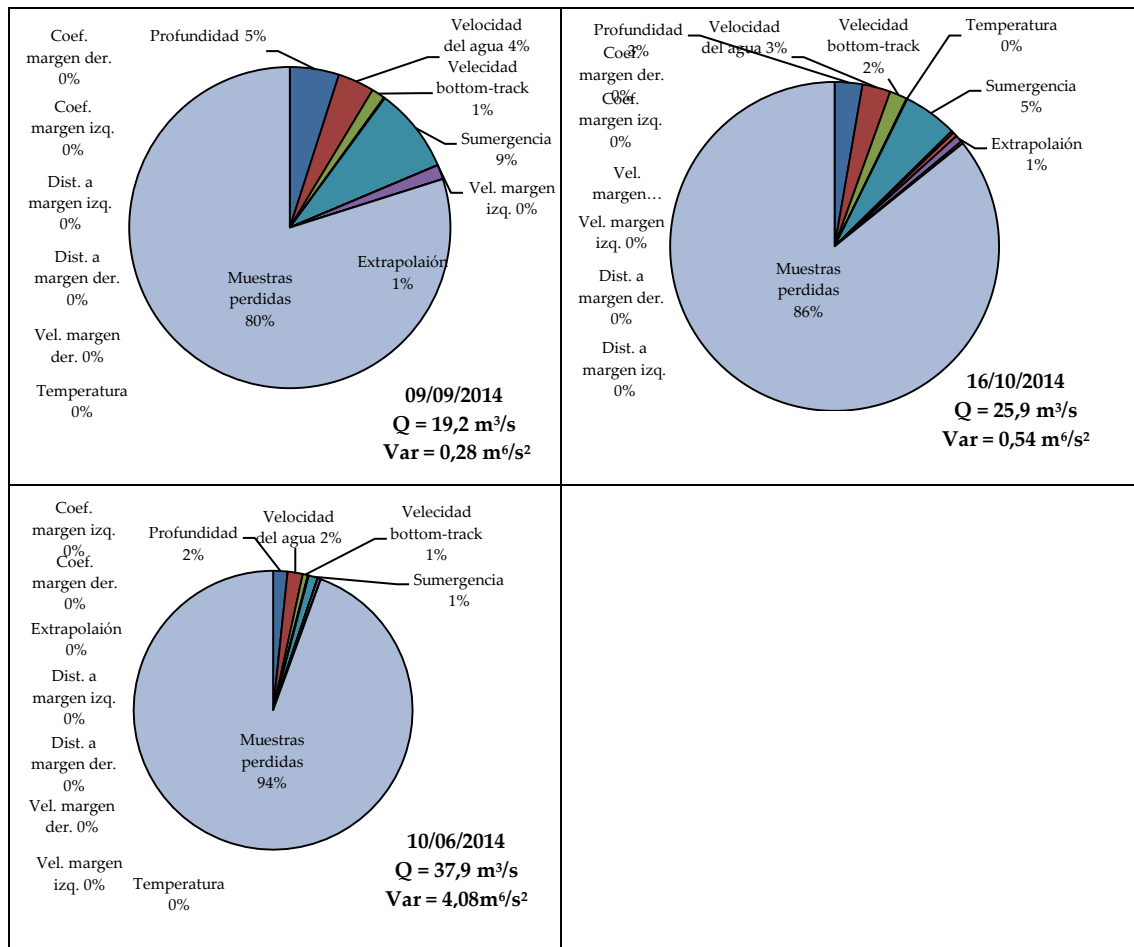
**Figura 24.:** Contribución a la varianza total de cada variable analizada a la sección del río Tercero ubicada en la localidad de Bell Ville.



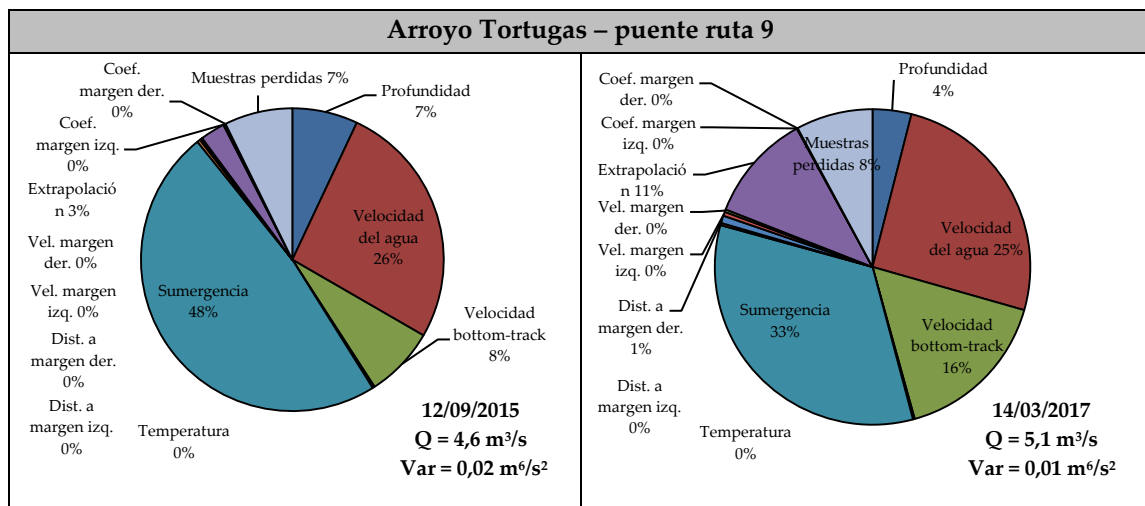


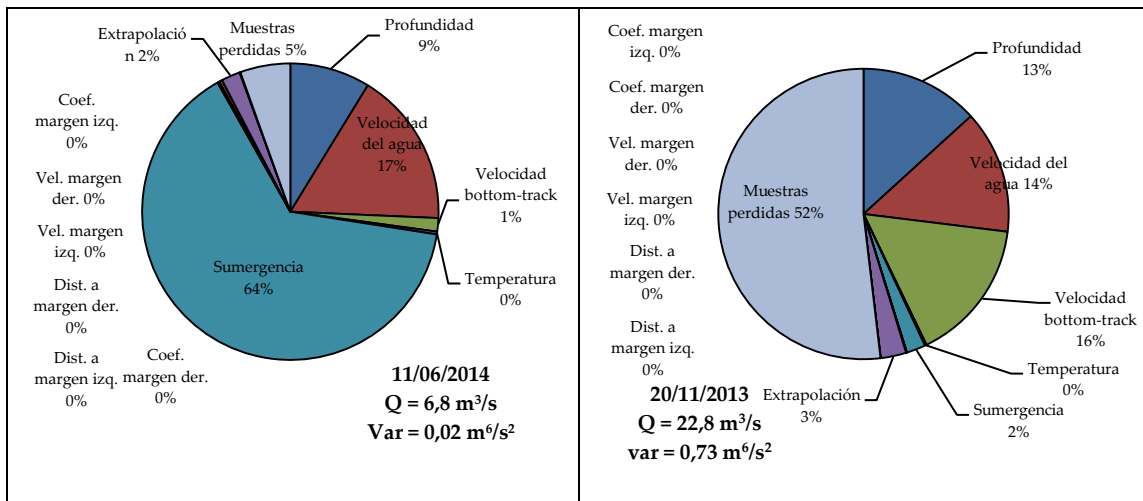
**Figura 25.:** Contribución a la varianza total de cada variable analizada a la sección del río Saladillo ubicada en el puente de ruta 6.





**Figura 26.:** Contribución a la varianza total de cada variable analizada a la sección del arroyo Tortugas en el puente de ruta 9.





## 2.5. Evaluación interinstitucional de métodos y técnicas experimentales para medición de caudales en el sistema de estudio a través de Regatas de Medición de caudal.

### 2.5.1. Introducción

Desde principios de este siglo, se han implementado paulatinamente nuevas técnicas de medición de caudales de flujo en Argentina. Sin embargo, existen áreas que requieren una mayor investigación relacionadas al desarrollo de protocolos de medición estandarizados para cada sistema fluvial y a los métodos de estimación de incertidumbre de los valores determinados experimentalmente. Para superar esta problemática, en los últimos años se han desarrollado en distintas partes del mundo regatas de medición de caudales de flujo en las cuales consisten en que diferentes instituciones, con distintos instrumentos, técnicas y operadores, se convocan en un tramo de río midiendo bajo las mismas condiciones de flujo.

La regata que se realizó en el marco de esta tesis fue la primera regata de medición de Argentina, ya que regatas anteriores se realizaron en: Alemania, Canadá, Estados Unidos, Inglaterra, Croacia y Francia (Le Coz et al., 2009; Pobanz et al., 2011; Hauet et al., 2012; Pobanz et al., 2015). Las regatas internacionales mencionadas se centraron en cuatro objetivos principales presentados a continuación (Le Coz et al. 2016, Despax et al, 2017, Huag, 2018):

- 1) Verificar que los instrumentos funcionan correctamente, determinar cuál instrumento y/o técnica es óptimo para las características presentes en el flujo y que los operadores midan adecuadamente, de acuerdo con los demás participantes.

2) Capacitación de técnicos y profesionales en instrumentos y metodologías experimentales recomendados para medir los caudales de flujo.

3) Generar y fortalecer los vínculos interinstitucionales entre los principales organismos dedicados a la medición de caudales de flujo.

4) Evaluar empíricamente niveles de incertidumbre presentes en la determinación experimental de los caudales de flujo y evaluar la contribución a esa incertidumbre de los diferentes componentes (instrumentos, condiciones experimentales, recursos humanos, etc.).

La primera regata de medición en Argentina se ha realizado con el apoyo de las siguientes instituciones. El autor de esta tesis formó parte activa del comité de organización y de las mediciones. Las instituciones organizadoras fueron:

- Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA) y Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba (CETA-FCEyN-UNC). Al cual pertenece el autor de esta tesis.
- El Centro Internacional de Estudios de Grandes Ríos (CIEGRI) de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral (CIEGRI-FICH-UNL)
- Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos del Gobierno de la Provincia de Córdoba (MAAySP Cba).
- Colaboraron en la organización: Centro de la Región Semiárida del Instituto Nacional del Agua (INA-CIRSA).
- Supervisión de las mediciones: Kevin Oberg, Hidrólogo de la Oficina de Agua Superficial del Servicio Geológico (OSW- USGS) de los Estados Unidos

### **2.5.2. Objetivos de la Regata**

En la regata de medición realizada en Córdoba el 5 de diciembre de 2017, los organizadores se han focalizado en los siguientes objetivos citados anteriormente:

1) Verificar que los instrumentos funcionan correctamente, determinar cuál instrumento y/o técnica es óptimo para las características presentes en el flujo y que los operadores midan adecuadamente, de acuerdo con los demás participantes.

- 2) Capacitación de técnicos y profesionales en instrumentos y metodologías experimentales recomendados para medir los caudales de flujo superficial en Argentina.
- 3) Generar y fortalecer los vínculos interinstitucionales entre los principales organismos que están dedicados a la medición de caudales de flujo.

### **2.5.3. Actividad experimental**

#### **Instituciones participantes**

Las instituciones participantes en la regata son las que se detallan a continuación y son las que realizan la mayoría de las mediciones de caudal en los diferentes ríos del país.

- Universidad Nacional de Córdoba (UNC) a través del Centro de Estudios y Tecnología del Agua y el Laboratorio de Hidráulica de la facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba (CETA-LH-FCEfyN-UNC),
- Universidad Nacional del Litoral a través del Centro Internacional de Estudios de Grandes Ríos de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (CIEGRI-FICH-UNL),
- Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos del Gobierno de la Provincia de Córdoba (MAAySP Cba),
- Instituto Nacional del Agua (Centro de la Región Semiárida – CIRSA),
- Instituto Nacional del Agua (Centro de Ezeiza),
- Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Santa Fe (SRH),
- Evaluación de Recursos Hídricos SA (EVARSA),
- Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA) «Dr. Eduardo Jorge Usunoff», centro de investigación y servicios de triple dependencia (Comisión de Investigaciones Científica de la Prov. de Bs. As. -CIC-, Universidad Nacional del Centro de la Prov. de Bs. As. -UNCPBA- y Municipalidad de Azul).
- Instituto de Clima y Agua, CIRN, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)-Castelar
- Aguas Cordobesas S.A.



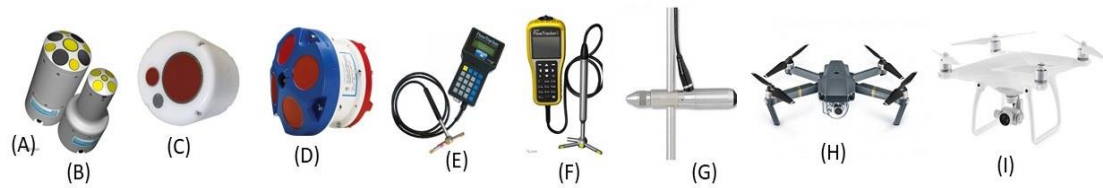
Además, participaron de esta jornada alrededor de 40 estudiantes de grado y posgrado de la FCEPyN-UNC (Figura 27).



**Figura 27.:** Miembros de las instituciones participantes en la Regata de medición realizada en Villa María.

### **Instrumentos, software y técnicas utilizados (ADCP, ADV, LSPIV)**

En la regata cada institución realizó mediciones de caudal del río con diferentes instrumentales los cuales están detallados en la Tabla 13. Se utilizaron 4 modelos de ADCP: S5 y M9, fabricados por YSI/SonTek (Figura 28 A), RiverRay y Rio Grande (Figura 28 C y D) de RD Instruments; Tres tipos de ADV: FlowTracker 1 y 2 de SonTek (Figura 28 E y F) y OTT Hydromet (Figura 28 G). Las características técnicas de estos equipos están detalladas en las Tabla 14 y Tabla 15. Para la implementación de la técnica de velocimetría por Imágenes a gran escala LSPIV se utilizaron dos modelos de drones: El Mavic Pro (Figura 28 H) y el Phantom 4 (Figura 28 I), ambos de la marca DJI. Las características de estos equipos se detallan en la Tabla 16. Para las técnicas de velocimetría por imágenes se utilizó viruta de madera como trazador de la velocidad superficial. El trazador se sembró aguas arriba de las secciones de mediciones, desde el puente Juan Bautista Alberdi hacia aguas arriba del mismo. Esta tarea fue realizada por 6 operarios distribuidos en todo el ancho del río para lograr un sembrado uniforme.



**Figura 28.:** Instrumentales utilizados en la regata. (A) ADCP SonTek M9; (B) ADCP SonTek S5; (C) ADCP RDI RiverRay; (D) ADCP RDI Rio Grande; (E) SonTek FlowTracker 1; (F) SonTek FlowTracker 2; (G) OTT ADC; (H) Mavic Pro DJI; (I) Phantom 4 DJI.

**Tabla 13.:** Equipamiento utilizado por cada institución y la cantidad de participantes.

Institución	Instrumental utilizado	Cantidad de Participantes (aprox)
CETA-LH UNC Córdoba	ADCP YSI/Sontek S5, ADV Sontek Flowtracker, Mavic Pro DJI	10
CIEGRI-FICH-UNL	ADCP TRDI Rio Grande 1200KHz	3
MAAySP Cba	---	5
INA – CIRSA	ADC - OTT/ Phantom 4	8
INA Ezeiza	ADCP YSI/Sontek M9	4
SRH Santa Fe,	ADCP YSI/Sontek M9	5
EVARSA	ADCP YSI/Sontek M9 ADV Sontek Flowtracker, LSPIV	5
IHLLA	ADCP TRDI RiverRay ADV Sontek Flowtracker	5
CIRN-INTA	ADV Sontek Flowtracker	1
FCEPyN		40 estudiantes de grado
TOTAL		Alrededor de 80

**Tabla 14.:** Características técnicas de los Perfiladores de Corriente Acústicos Doppler (ADCP) utilizados en la regata

ADCP	Fabricante	Cantidad de ADCPs	Frecuencia	Número de Transductores	Eco-sonda	Bote
M9	SonTek	3	1-3 MHz	8	0,5 MHz	Hydroboard
S5	SonTek	1	3 MHz	4	1 MHz	Hydroboard



ADCP	Fabricante	Cantidad de ADCPs	Frecuencia	Número de Transductores	Eco-sonda	Bote
Rio Grande	Teledyne RDI	1	0,6-1,2 MHz	4		Trimaran
RiverRay	Teledyne RDI	1	0,6 MHz	1		Trimaran

**Tabla 15.:** Características técnicas de los velocímetros acústicos doppler (ADV - ADC) utilizados en la regata

ADV	Fabricante	Cantidad de instrumentos	Frecuencia
FlowTracker 1	SonTek	2	10 MHz
FlowTracker 2	SonTek	2	10 MHz
OTT	Hydromet	1	6 MHz

**Tabla 16.:** Instrumentos utilizados para las técnicas de Velocimetría por imágenes

Drone	Fabricante	Cantidad de instrumentos	Imágenes por segundo	Resolución
Mavic Pro DJI	DJI	1	30fps	3840x2160
Phantom 4	DJI	1	30fps	1920x1080

### Secciones y zona de medición.

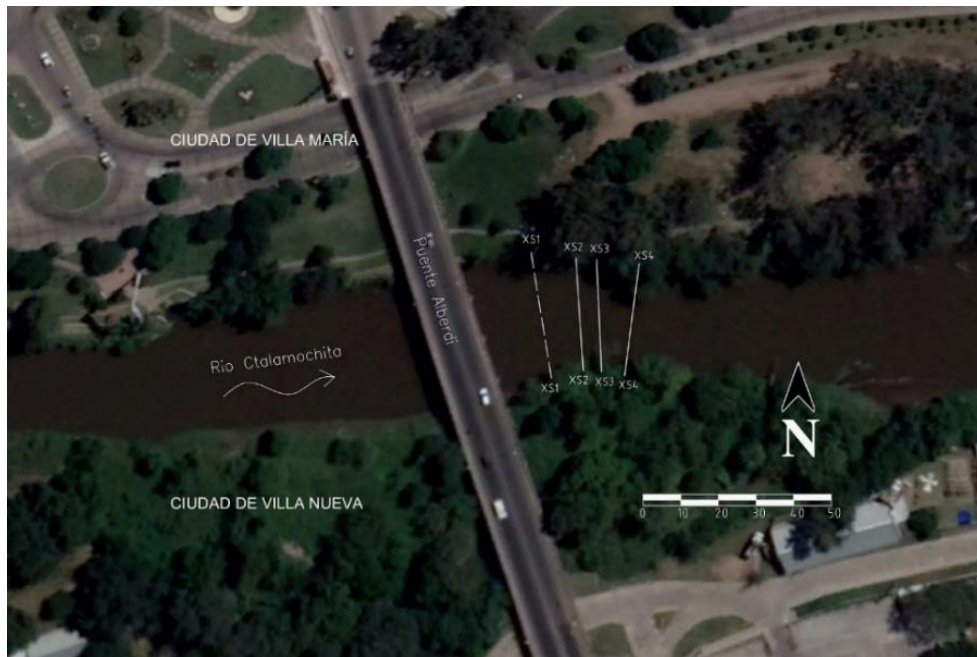
El sitio de medición seleccionado para realizar la regata se encuentra sobre el río Tercero (Ctalamochita) en el Puente Alberdi de la ciudad de Villa María, en la Provincia de Córdoba, Argentina (Latitud: 32°25'19.10 "S, Longitud:63°14'40.88"W). En la Figura 29 se muestra la ubicación del sitio de medición. El sitio de medición fue seleccionado considerando que este río se encuentra regulado, lo cual permitió tener una previsión del caudal líquido escurrido el día de la regata (aproximadamente 13 m<sup>3</sup>/s erogados por la central Piedras Moras en la parte alta de la cuenca). Este es el caudal más bajo que eroga la central Piedras Moras (100 Km de distancia entre la ciudad de Villa María y el dique Piedras Moras) para mantener un caudal ecológico y poder satisfacer todas las demandas de agua potable y vertido que posee el río. Para este caudal el sitio de

medición posee profundidades máximas de entre 1 a 1,5 m y velocidades máximas de entre 0,80 a 1,2 m/s



**Figura 29.:** Ubicación del sitio de medición donde se realizó la primera regata de medición de Argentina.

Además, dicha condición era la adecuada para realizar la medición con diferentes instrumentos de manera segura, y así evitar riesgos a las personas que ingresaban al mismo para realizar mediciones por vadeo. Para la medición con ADV, por el método de vadeo, se definió una sección (XS1) 15 m aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi (en línea de trazo en la Figura 30). Se seleccionó esta sección debido a que características de la sesión eran las adecuadas para poder realizar mediciones por vadeo en forma segura (0,66 m de profundidad media y 30 m de ancho). En esta sección también se realizó las mediciones de caudal con la técnica LSPIV. Para la medición con ADCP se definieron 3 secciones con profundidades y características del flujo diferentes (ver Figura 30). La primera de ellas (XS2) se ubicó 30 m aguas abajo del puente, la profundidad media del flujo era la más baja (0,64 m) y el ancho de dicha sección fue de 30 m. La sección XS3 se materializo 6 m metros aguas abajo de la sección anterior con una profundidad media mayor que la anterior (0,70 m) y 27 metros de ancho. La última sección (XS4) se ubicó 10 m aguas debajo de XS3 con la mayor profundidad media del flujo de las 3 secciones (0,75 m) y 25 m de ancho. En esta última sección flujo no se veía afectado por las pilas del puente.



**Figura 30.:** Ubicación de las de medición con ADCP (línea continua). La línea trazo fue la utilizada por las personas que realizaron aforos por vadeo con ADV.

### Seguridad

La zona de trabajo (aguas abajo del Puente Alberdi) fue previamente desmalezada y delimitada por operarios de la Municipalidad de Villa María. De esta forma se dejó correctamente despejadas de obstáculos las secciones de medición. Además, la delimitación del área de trabajo realizada por los integrantes de las fuerzas de seguridad permitió brindarle seguridad a las personas y a los instrumentos al desviar el paso de las personas no participantes de la regata por otro sector.

Además, se contó con la presencia de la Patrulla del Río de la Provincia de Córdoba para garantizar la seguridad de los operarios. Todas las personas que ingresaron al agua (para cruzar la sog, colocar el equipo, etc.) utilizaron chalecos salvavidas y fueron escoltadas por un integrante de la mencionada patrulla (Figura 31). Además, esta institución trabajó en la concientización de los riesgos asociados a no adoptar las medidas de seguridad adecuadas.



**Figura 31.:** La patrulla del río del Gobierno de la Provincia de Córdoba estuvo colaborando con la seguridad de los operarios que ingresaron al río. Puede verse que todas las personas poseen salvavidas y son escoltadas por un miembro de dicha institución.

### Metodología experimental

A continuación, se detallan las metodologías experimentales adoptadas durante la realización de las mediciones en la regata.

#### ADCP

Los distintos grupos realizaron mediciones con ADCP en las secciones XS2, XS3 y XS4. Si bien cada grupo podía elegir una sección para iniciar la actividad, a todos los grupos se les requirió medir en la sección XS4. Al inicio se les entregó también a cada grupo un breve resumen de la metodología a implementar al momento de realizar mediciones con ADCP. Dicho documento se detalla en las Tablas 17 y 18. Además, se les entregó una guía rápida de sugerencias y explicaciones adicionales de cada tipo de ADCP, según sea RDI o SonTek (dichas guías están en Mueller et al., 2013). Al finalizar la regata se hizo una discusión general sobre los errores cometidos durante la medición con ADCP como así también como solucionarlos y evitarlos en futuras mediciones.

**Tabla 17.:** Metodología a implementar para realizar mediciones con ADCP (traducido y adaptado de Mueller et al., 2013)

✓	<b>Metodología para para mediciones de caudal con ADCP desde plataformas móviles</b>
	<b>1- Montaje del ADCP y otros equipos</b>

	a) Montar el ADCP en embarcación o barrenador
	b) Sujetar adecuadamente el ADCP a la embarcación o sogas.
	c) Conectar el ADCP/GPS/Computadores/etc.
	d) Verificar comunicación entre todos los dispositivos
	e) Verificar y configurar el reloj del ADCP con el horario correcto.
	<b>2- Preparación para aforo de caudal</b>
	a) Localizar una sección de medición adecuada/ si es necesario hacer varias mediciones de prueba.
	b) Seleccionar un sitio de medición con flujo uniforme. Evitar sitios con resaltos u obstáculos.
	c) Seleccionar una sección donde el área medida sea la mayor posible
	d) Determinar la profundidad máxima a medir. Para seleccionar el modo de medición adecuado.
	e) Si se esperan salinidades mayores a 6 ppt (partes por mil), medirla e ingresar este valor en el programa del ADCP.
	f) Medir la sumergencia del ADCP y anotarla. Tener cuidado con cabeceo y balanceo el equipo.
	g) Si es necesario, utilice el ADCP utilizando las opciones por defecto que proporciona el programa del fabricante
	h) Anotar todas las observaciones de campo en especial las relacionadas a las condiciones del sitio de medición.
	<b>3- Configurar el ADCP</b>
	a) Realizar las pruebas de diagnóstico
	b) Realizar la calibración de la brújula interna del ADCP (error menor a 1 grado).
	c) Medir la temperatura del agua, comparar con la temperatura que registra el ADCP y anotarla.
	d) Realizar la prueba de existencia de fondo móvil (estacionaria o por el método del lazo).

	e) Si hay fondo móvil, utilizar GPS o la corrección adecuada.
	f) Verificar y marcar los puntos de inicio/fin de las transectas.
	i. Se requieren dos celdas válidas en la vertical.
	ii. Se pueden utilizar boyas o jalones para marcar los puntos de inicio/fin (evitar elementos metálicos).
	<b>4-Registro de datos</b>
	a) Posicional el bote en la margen de inicio (se requieren dos celdas en la profundidad validas)
	i. Comenzar a grabar datos
	ii. Medir y anotar la distancia a la margen.
	b) Mantenerse en la margen y registrar un mínimo de 10 perfiles de velocidad.
	c) Mover la embarcación con el ADCP a lo largo de la sección de medición.
	i. Mantener la velocidad de cruce menor que la velocidad del agua.
	ii. El movimiento de la embarcación a lo largo de la sección debe ser suave. Mantener una velocidad y dirección de cruce es más importante que ir cruzar lentamente la sección.
	d) Aproximarse lentamente a la otra margen
	i. Mantenerse en la margen y registrar un mínimo de 10 perfiles de velocidad.
	ii. Finalizar el registro de datos en la transecta.
	iii. Medir y anotar la distancia a la margen.
	iv. Verificar que los caudales estimados en las márgenes sean razonables.
	e) Realizar un número par de transectas hasta superar un tiempo de registro continuo de datos mayor a 720 segundos.
	f) Analizar y evaluar la medición realizada, buscando problemas en los datos medidos (Utilizar QRev)
	g) Comparar el valor de caudal obtenido con el valor de la curva altura caudal (si existe) y revisar nuevamente la medición si es requerido.

	h) Hacer un respaldo de la información antes de irse del sitio de medición. ( <b>LA MEDICIÓN NO TERMINA SIN EL CORRECTO ALMACENAMIENTO DE LA INFORMACIÓN REGISTRADA</b> )
--	---

**Tabla 18.:** Aspectos a tener en cuenta durante la medición (traducido y adaptado de Mueller et al., 2013)

Aspectos a tener en cuenta durante la medición
<b>Flujo de baja velocidad:</b> Medir más transectas; Movimientos Suaves; Utilizar un sistema que permita controlar y mantener una velocidad de cruce suave y constante.
<b>Flujo de alta velocidad:</b> Fondo móvil es esperable; Incrementar la sumergencia; controlar el cabeceo; Rio Grande: WM12 o WM1.
<b>Flujo bidireccional:</b> Revisar los métodos de extrapolación.
<b>Flujo poco profundo:</b> Considerar la posibilidad de utilizar un método por vadeo (molinete o FlowTracker)
<b>Flujo profundo:</b> Usar un ADCP de baja frecuencia
<b>Flujo profundo:</b> Usar un ADCP de baja frecuencia
<b>Margen vertical:</b> Mantener el ADCP una distancia del muro igual a su profundidad.
<b>Fondo rugoso:</b> Velocidad de cruce baja; Mayor exponente de extrapolación.
<b>Viento:</b> Anotar las condiciones; Verificar los métodos de extrapolación
<b>Alta carga de sedimentos:</b> Fondo móvil es esperable; Usar un ADCP de baja frecuencia; Usar GPS y Ecosonda
<b>Alta salinidad:</b> Medir salinidad e ingresarlo en el programa de registro del ADCP para corregir los cálculos de velocidad.
Pruebas de Fondo Móvil
<b>Estacionario:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Duración &gt; 300 segundos</li> <li>• Usar donde hay mucho fondo móvil.</li> <li>• Si hay mucha incertidumbre; hacer la prueba en más localizaciones.</li> <li>• Minimizar el movimiento en dirección del flujo.</li> <li>• Usar el método SMBA (Stationary Moving Bed Analysis) o equivalente</li> </ul>
Pruebas de Fondo Móvil



**Método del lazo:**

- Duración mayor a 180 segundos (más tiempo es mejor)
- Mantener una Velocidad de movimiento del bote constante.
- Tener una calibración de brújula adecuada y muestras válidas obtenidas con el sistema de referenciación por fondo (Bottom Track).
- Usar cuando la velocidad media del agua es mayor a 0,25 m/s

ADV

Las mediciones con Velocímetros Acústicos Doppler se realizaron en la sección XS1 dada que era la sección más adecuada en términos de accesibilidad y seguridad para realizar medición por vadeo. En esta sección las distancias de cada localización de medición desde margen izquierda (margen de inicio de todos los grupos) se tomaron mediante el uso de un distanciómetro laser.

Aproximadamente se realizaron mediciones puntuales cada un metro que lo que permitió realizar 30 verticales en todo el ancho de la sección. Las mediciones de velocidad se realizaron al 60% de la profundidad si el tirante era menor a 0,5 m y al 80% y 20% si el tirante era mayor a 0,5 m. Debido a la velocidad y profundidad del flujo en las cercanías de margen derecha (0,8 m/s con 0,8 m de profundidad), y que estos valores se encuentran en el límite que producen arrastre y caída de las personas se extremaron las medidas de seguridad con miembros de patrulla del río ubicados pocos metros aguas abajo para escoltar a los aforadores.

LSPIV

Para implementar LSPIV se despejó completamente la sección, se marcaron 4 puntos en la sección lo más espaciados posible (para que ocupen toda el área de la imagen), ubicados en las márgenes sobre la superficie del agua. Dichos puntos son utilizados para rectificar los resultados obtenidos acorde a la metodología de Patalano et al., (2017). Debido a las condiciones de flujo analizadas (caudal relativamente bajo en la sección de medición) no se encontraban trazadores naturales en la superficie. Por ello se arrojó un trazador al río, en este caso se utilizó viruta de madera y se la sembró en el flujo aguas



arriba del puente por 4 operarios. A medida que el trazador recorría el área de interés se filmaron dos videos de la sección con dos drones.

Para el procesamiento de los videos se utilizaron los programas PIVlab (Thielicke y Stamhuis, 2014) y RIVeR (Patalano et al., 2017) este último desarrollado por el grupo de trabajo donde se desarrolló esta tesis. PIVlab permite el procesamiento del desplazamiento de la superficie en pixel/imagen. RIVeR permite la rectificación de estos resultados para obtener el campo de velocidad medio en m/s y la estimación de caudal. La estimación de caudal con LSPIV requiere el relevamiento batimétrico de la sección de interés. Para la determinación del caudal con esta técnica, se utilizó la batimetría relevada con el Flowtracker en la sección XS1. Además, se asume que la batimetría es constante durante el tiempo de medición y que el perfil vertical de velocidad en la columna de agua es logarítmico (al igual que a realizar las mediciones con ADV por el método de vadeo). Si el perfil de velocidad es logarítmico la velocidad media ( $U$ ) en la vertical es el 85% de la velocidad superficial (Plant et al. 2005)

Ec. 4

$$U = 0,85 * V_s$$

Donde  $U$  es la velocidad media en la sección de medición y  $V_s$  la velocidad superficial procesada con las técnicas de velocidad por imágenes mencionadas.

#### **2.5.4. Resultados**

A continuación, se detallan los principales resultados obtenidos por cada grupo de trabajo

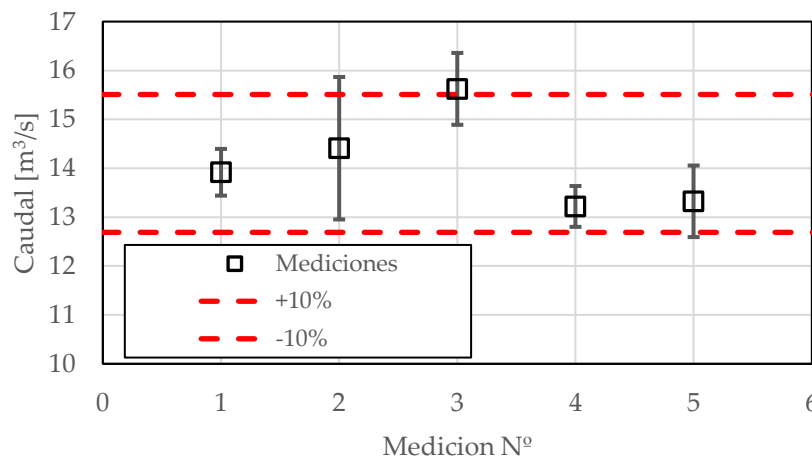
##### ADCP

Para el análisis de los resultados de las mediciones con ADCP se utilizó el programa computacional Qrev mencionado en el apartado 2.3. En la Tabla 19 se detallan los resultados referidos al caudal medido con Perfiladores Acústicos Doppler (ADCP). Los datos comparados fueron registrados en la sección XS4 ya que todos los grupos midieron en dicha sección. También se pueden observar estos resultados en la Figura 32, donde se han graficado los valores de caudal junto a su intervalo de confianza (95 %).

**Tabla 19.:** Resultado del caudal de flujo medido con perfiladores acústicos en la sección XS4

Medición	Institución	Sección	Caudal [m³/s]	Desvío [m³/s]	CV [%]	Incertidumbre estimada 95% QRev	Ancho [m]	Área [m²]	Velocidad Media [m/s]	Velocidad del Bote [m/s]	Vfondo [m/s]
1	CETA	XS4	13,92	0,24	1,75	4,3	25,7	18,0	0,77	0,15	0,05
2	EVARSA	XS4	14,41	0,74	5,16	8,9	24,8	18,6	0,77	0,16	0,05
3	IHLLA	XS4	15,62	0,37	2,40	7,2	24,4	20,4	0,77	0,22	No se detectó
4	INA EZ.	XS4	13,22	0,33	2,47	5,2	25,3	17,6	0,75	0,12	0,03
5	SRH – SF	XS4	13,32	0,24	2,80	5,5	25,5	18,1	0,74	0,16	0,03
6	FICH	XS4	El instrumento utilizado no registró suficientes celdas para obtener un resultado razonable de caudal.								
Promedio			14,10	-	-	-	-	-	-	-	-
CV			6,9%	-	-	-	-	-	-	-	-

Las mediciones de cada grupo en la seccion XS4 contaba con al menos 4 cruces o transectas.



**Figura 32.:** Caudal promedio e intervalo de confianza 95% según las mediciones con ADCP de las diferentes instituciones. Además, se graficaron las líneas de  $\pm 10\%$  respecto del caudal medio de todas las mediciones con ADCP.

La diferencia porcentual máxima entre el promedio de todos los caudales obtenidos con ADCP y cada una de las mediciones es 10 % que corresponde al caudal obtenido con RiverRay. Esto se debe a que el caudal medido es el 32 % del total, el resto del caudal es obtenido por extrapolación.

A continuación, se detallan los errores cometidos y como impactan los mismos en la medición realizada en la sección XS4 la cual fue aforada por todas las instituciones participantes. En lo que se refiere al equipo del CETA – UNC (SonTek S5) recibió una única sugerencia brindada por QRev advirtiéndole que la velocidad de cruce del bote fue

lenta (15 cm/s) lo cual puede generar problemas cuando se utiliza GPS como sistema de referencia. Se utilizó este sistema de referencia y no se observaron variaciones importantes de caudal entre transectas.

El equipo EVARSA (YSI/SonTek M9), utilizó transectas no recíprocas para reportar su valor de caudal (es decir utilizó 3 transectas en una dirección de cruce y 1 transecta en la otra, cuando debería haber sido la misma cantidad de cruces en cada dirección). No realizó la prueba de sistema, la duración de la medición fue menor a 720 segundos y en una transecta el campo magnético se excedió en 2º respecto al campo medido durante la calibración y hubo movimiento excesivo del bote en ambas márgenes. Hubo pérdida de datos con BT excediéndose en la cuarta transecta el 10% del caudal en muestras interpoladas. Como sistema de referencia se utilizó GPS, ya que se obtenía un valor de caudal medio con menor incertidumbre y desvío. Analizando la calidad del GPS, se observa que un cambio de altitud mayor a 3 metros en gran cantidad muestras (1 de 172 en la primera transecta, 87 de 155 en la segunda, 51 de 117 en la tercera y 131 de 190 en la cuarta). A pesar de que la altitud de los GPS que no poseen RTK no es adecuada, valores de cambios de altitud excesivos indican problemas en la referenciación con GPS lo cual hace que el caudal presente un desvío importante. Se seleccionó este sistema, a pesar de tener problemas, porque el valor medio de caudal presentaba un menor desvío, CV e incertidumbre.

El equipo IHLLA (RDI/ RiverRay) efectuó una medición con un tiempo de registro de datos menor a 720 segundos. La cantidad de muestras inválidas utilizando el sistema por referenciación por fondo (Bottom Track) fue importante, es por ello que se utilizó GPS. Al realizar la prueba de fondo móvil se observó que este instrumento fue el único que reportó que no había fondo móvil. Esto se debería a que el equipo al tener una frecuencia menor penetra más en el lecho donde el fondo ya no es móvil. Este equipo al ser de baja frecuencia tiene pocas celdas en la vertical (5 celdas en la zona más profunda y 2 en la zona menos profunda), lo cual hace que el caudal medido sea el 32% del caudal total. Debido a esto la extrapolación de las zonas no medidas cercanas al fondo y superficie es muy importante (68 % del caudal total). La diferencia que tiene con el resto

de las mediciones (este equipo fue con el que se obtuvo el caudal más alto) se le atribuye a la extrapolación de los datos medidos.

El equipo INA EZEIZA (YSI/SonTek M9) registró pérdidas leves en sistema de referenciación por fondo, Bottom Track (aproximadamente 20 muestras de un total de aproximadamente 250 por transecto). El sistema GPS prácticamente no tuvo pérdidas por lo que se seleccionó como sistema de referencia. Al igual que la medición del equipo CETA-UNC, QRev advierte que la velocidad de cruce del bote fue lenta (12 cm/s) lo cual puede generar problemas cuando se utiliza GPS como sistema de referencia

El equipo SRH-Santa Fe (YSI/SonTek M9) obtuvo las siguientes advertencias con el programa QRev: (a) Algunas transectos tuvieron un cabeceo que excedió los límites de calibración; (b) Algunas transectas el campo magnético se excedió en 2º respecto al campo medido durante la calibración; (c) El sistema de referenciación por fondo tuvo pérdidas de muestras del mismo orden que el equipo INA-EZEIZA; (d) El Sistema GPS no tuvo muestras inválidas por lo que se utilizó como sistema de referencia y (e) Se reportó movimiento excesivo del bote en las margen derecha.

Finalmente, el equipo CIEGRI – UNL no pudo realizar mediciones con su instrumento dado que, debido a las características técnicas del instrumento, el mismo registró pocas celdas a lo largo de la sección y por lo tanto el valor de caudal obtenido no era confiable.

De la evaluación de los equipos utilizados durante la regata se concluye que los ADCPs óptimos para realizar mediciones en el sistema fluvial de estudio en condiciones medias y bajas son los equipos que poseen alta frecuencia acústica (3 MHz para los instrumentos SonTek S5 y M9 presentes en la regata). La principal ventaja del SonTek M9 respecto al SonTek S5, es que el primero tiene un mejor desempeño que el segundo en condiciones de aguas altas ya que es un equipo multifrecuencia (3Mhz para aguas bajas y 1Mhz para aguas altas). Con respecto a la metodología experimental recomendada en el sistema fluvial de estudio se observó que si en la misma sección, la medición de caudal realizada con instrumentos similares posee una cantidad importante de muestras perdidas, el valor reportado de caudal tiene un coeficiente de variación mayor que se traduce en una mayor incertidumbre. Las pérdidas de muestras

observadas en la regata se debieron a los métodos experimentales utilizados (en particular a la velocidad de movimiento de la embarcación) ya que los tres equipos SonTek M9 presentes en la regata son el mismo modelo y midieron en el mismo sitio. Esto se vio reflejado en el tiempo de medición menor a 720 segundos realizado por el equipo N°2. Por lo cual se recomienda realizar las transectas de manera lenta y suave con una velocidad de movimiento del bote constante. Además, en la regata se hicieron pruebas midiendo en diferentes secciones observándose que la selección de una sección adecuada (es decir aquella con profundidades adecuadas para el tipo de instrumento, sin cambios bruscos, ni presencia de remolinos u obstáculos) es fundamental para reducir la incertidumbre de las mediciones de caudal en el sistema de estudio.

#### ADV

En la Tabla 20 se detallan los resultados obtenidos por los diferentes velocímetros acústicos doppler presentes en la regata. La comparación es muy satisfactoria ya que la diferencia porcentual máxima entre el promedio de caudales de todas las mediciones con Velocímetros Acústicos utilizados en el método por vadeo y cada medición es de 1%.

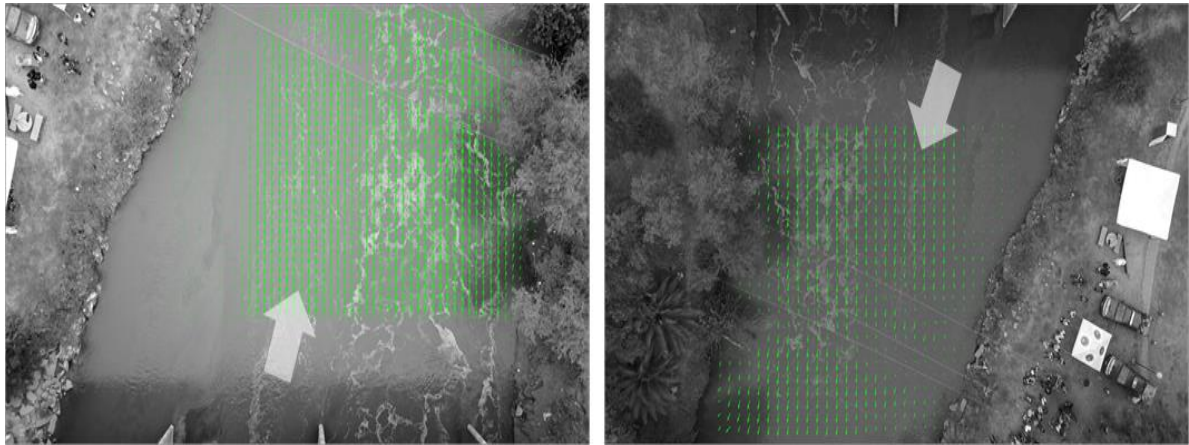
**Tabla 20.:** Resultado de las mediciones con velocímetros acústicos en la sección XS1

Institución	Número de Verticales	Caudal Total [m³/s]	Ancho [m]	Área [m²]	Profundidad Media [m]	Velocidad Media [m/s]
Ihlla	30	13,63	28,37	20,15	0,71	0,68
Ina Cirsa	30	13,62	30,30	19,78	0,65	0,69
Inta	32	13,25	30,20	20,02	0,66	0,66
CETA - UNC	27	13,86	30,30	20,21	0,67	0,69
<b>Promedio</b>	-	13,59	29,79	20,04	0,67	0,68
<b>CV</b>	-	1,6%	2,8%	0,8%	3,4%	1,8%

#### LSPIV

En la Figura 33 se muestran los campos superficiales obtenidos con LSPIV para los dos videos registrados a distintas alturas. La sección seleccionada para determinar el

caudal fue la XS1 debido a que se tenía la batimetría obtenida con ADV y además poseía un buen campo de velocidades debido a la densidad de partículas que tenía la sección. En la Tabla 21 se detallan las características de los videos utilizados para las técnicas de velocimetría por imágenes a gran escala (LSPIV), mientras que la Tabla 22 se detallan los resultados obtenidos.



**Figura 33.:** Campos promedio de velocidad superficial obtenidos por PIVLab para ambos videos.

**Tabla 21.:** Características de la extracción de imágenes.

Institución	Tiempo del video procesado	Frecuencia de muestreo utilizada	Resolución utilizada
INA-Cirsa	29 s	15 FPS	1920:1080
Ceta - UNC	90 s	15 FPS	2560:1440

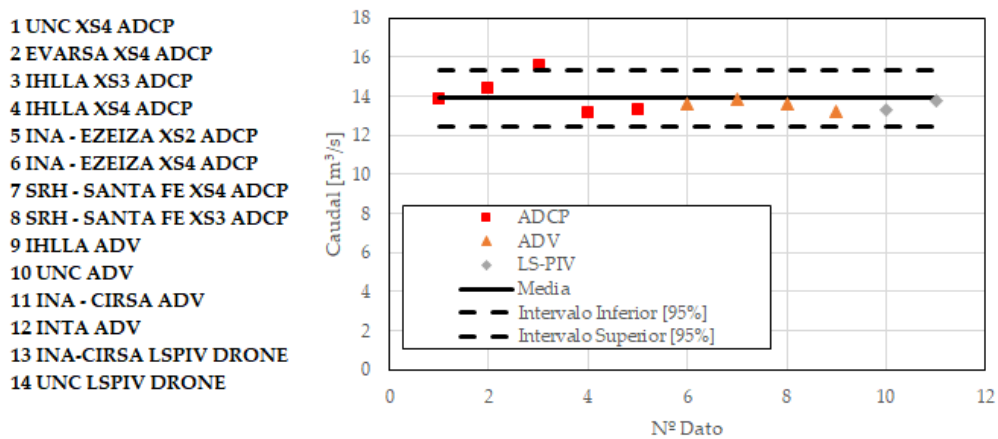
**Tabla 22.:** Resultado del caudal de flujo medido con LSPIV.

Institución	$\eta$ (U/Vs)	Caudal Total [m <sup>3</sup> /s]	Velocidad Media [m/s]
INA-Cirsa	0,85	13,29	0,66
Ceta - UNC	0,85	13,74	0,69
<b>Promedio</b>	-	13,51	0,67
<b>CV</b>	-	2,35%	3,17%

El caudal promedio de ambas mediciones de LS-PIV con dos drones diferentes difiere un 2% con el caudal obtenido en cada medición. El coeficiente de variación de la medición es del 2%.

### COMPARACIÓN ENTRE LAS DISTINTAS TÉCNICAS

En esta sección se reportan los resultados de 14 determinaciones de caudal con diferentes técnicas experimentales en las diferentes secciones de medición definidas para la realización de la regata. El promedio de todas las determinaciones es de 13,92 m<sup>3</sup>/s con un coeficiente de variación del 6%. En la Figura 34 se muestran los resultados obtenidos y se incluye además el intervalo de confianza del 95%.



**Figura 34.:** Comparación entre las diferentes determinaciones de caudal con diferentes técnicas de medición en diferentes secciones en el Puente Alberdi de Villa María.

Cabe destacar que utilizando la novedosa técnica LS-PIV se obtuvieron resultados muy similares a los obtenidos con otras técnicas con mayor desarrollo tecnológico (ADCP y ADV). La importancia de validar esta técnica en el sistema de estudio, es que la misma puede ser aplicada en situaciones donde no puedan utilizarse las técnicas hidroacústicas (ADCP y ADV) como por ejemplo en condiciones en las que la velocidad del flujo es alta y la medición presenta riesgo para los operarios e instrumentos





---

### **Capítulo III**

## **CUANTIFICACIÓN HIDROLÓGICA Y DESARROLLO DE HERRAMIENTAS PARA LA GESTIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EL SISTEMA FLUVIAL DE ESTUDIO**

---

Contenidos de este capítulo han sido incluidos en las siguientes publicaciones en revistas científicas:

**Díaz Lozada, J.M; García, C. M.; Herrero, H., Heredia Ligorria, A.I.; Lopez, F.; Castelló, E. y Brarda, J.P., (2016).** Caracterización Experimental y Numérica de Eventos de Crecida Extraordinarios en la Cuenca del Río Carcarañá, Argentina. Aqua-LAC - Vol. 8 - Nº 1 - Mar. 2015. pp. 10 – 20

**García, C.M; Herrero, H. S.; Díaz Lozada, J.M; Heredia Ligorria, A.; Vaschalde T.; López, F.; Castelló, E.; Brarda J.P y Cosavella, A., (2017).** Libro: Río Carcarañá. Resultados de la cuantificación del escurrimiento superficial en localizaciones de la Provincia de Córdoba. Período: 2012 – 2017. Ed. Galeón, Córdoba Argentina. ISBN en trámite.

### 3.1. Introducción

La gestión adecuada y sustentable de los recursos hídricos es fundamental poder satisfacer todas las necesidades hídricas preservando el recurso para las futuras generaciones. Para efectuar esta tarea, es necesario llevar a cabo la cuantificación hidrológica (caudales superficiales) en el sistema fluvial.

La cuenca del río Carcarañá es una cuenca pobremente aforada al igual que muchas cuencas de la República Argentina (Díaz Lozada et. al, 2014), con lo cual la información disponible es escasa y por lo tanto se dificultan las tareas de planificación y la realización de futuras investigaciones. La Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación posee 2 estaciones hidrométricas activas en todo el sistema fluvial: (A) La estación Ume Pay (Lat.32° 13' 00,00"; Long.64° 43' 60,00"), sobre el río Grande, aguas arriba de las instalaciones hidroeléctricas del complejo Río Grande y que debido a la regulación de caudales que se realiza aguas abajo para explotación hidroeléctrica no aporta datos significativos para evaluar la evolución temporal de caudales en el Río Carcarañá; (B) La estación hidrométrica Pueblo Andino (Lat.32° 40' 24,00"; Long.60° 51' 57,40") existente sobre el río Carcarañá y ubicada cerca de la desembocadura del mismo en el río Coronda. Estas 2 estaciones no logran satisfacer las necesidades de información hidrológica de caudales superficiales en la cuenca, es por ello que desde hace más de 5 años en un esfuerzo conjunto entre tres instituciones de las Provincias de Córdoba y Santa Fe (CETA Universidad Nacional de Córdoba, CIFASIS CCT Rosario y la Secretaría de Recursos Hídricos del Gobierno de la Provincia de Córdoba). Actualmente se han realizado más de 250 determinaciones experimentales de caudales en 50 localizaciones dentro de la provincia de Córdoba durante 59 campañas de medición en el sistema de estudio. El tesista ha participado activamente en la mayoría de estas campañas experimentales.

En el periodo analizado se observaron eventos hidrológicos máximos extremos en la cuenca por lo que los niveles de superficie libre de escurrimiento en la mayoría de los tributarios superaron su cota de inundación. Mediciones realizadas en estas condiciones extremas permitieron determinar curvas altura-caudal en diferentes secciones del sistema fluvial en todos los rangos esperados de nivel de superficie libre (incluyendo la cota de máxima capacidad de escurrimiento del cauce). Estas observaciones resultaron fundamentales para minimizar los errores esperados en la determinación de caudal por extrapolación de las curvas altura de superficie libre-caudal. Dado que es habitual en

nuestro país la extrapolación de estas relaciones, en este capítulo se analizan los errores porcentuales esperados de una extrapolación significativa de una curva altura de superficie libre - caudal ajustada sin datos de caudales extremos. Además, con la información relevada durante estos eventos extremos, se pudo determinar, como se ha mencionado, la capacidad máxima del cauce en diferentes secciones lo que ha permitido definir un caudal máximo a erogar por el sistema de embalses en el caso del río Tercero (Ctalamochita) para evitar inundaciones aguas abajo. Dicho valor, determinado en esta tesis, es actualmente utilizado para definir las líneas de ribera en la Provincia de Córdoba. Del análisis de capacidad del cauce de las diferentes secciones, puede decirse que la capacidad de escurrimiento determinada experimentalmente fue significativamente menor a la prevista con modelos numéricos. Para evaluar las razones de esta diferencia se ha analizado la influencia de las formas de fondo en la rugosidad del cauce y en su capacidad de escurrimiento, ya que las mismas no fueron tenidas en cuenta en las modelaciones numéricas previas. En primer lugar, se desarrolla una nueva ecuación con base física para determinar la rugosidad generada por formas de fondo partiendo de la hipótesis que la resistencia por forma de fondo es generada por el arrastre que producen las mismas al flujo. Además, se propone una nueva metodología para determinar en campo los efectos de la rugosidad de las formas de fondo sobre el flujo (para su óptima parametrización) en base a el análisis de perfiles de velocidad de flujo registrados con ADCP. Todos los desarrollos propuestos en esta sección han sido validados con datos registrados específicamente en el sistema fluvial de estudio.

En esta sección se evaluaron experimentalmente las curvas de descarga de los órganos de evacuación de los diques Piedras Moras y Embalse de Río Tercero. Esta evaluación experimental in situ es fundamental para la adecuada gestión de los embalses. Estudios previos del grupo de trabajo (Barchiesi et al., 2014 y 2015; Díaz Lozada et al. 2016) mostraron que los caudales erogados por esas estructuras pueden diferir de los previstos en el diseño debido al método constructivo empleado, al comportamiento tridimensional del flujo en la admisión y salida de cada estructura, a la deposición de sedimentos y otros materiales, problemas mecánicos, a la interacción con otros órganos de evacuación, etc. Debido a estas diferencias se propone realizar verificaciones periódicas de los órganos de evacuación.

Finalmente, a través de la información obtenida se generaron modelaciones hidrodinámicas de los tramos urbanos de Bell Ville y Villa María para gestionar el riesgo de inundación de esas localidades.

### **3.2. Cuantificación de caudales en la cuenca del Río Carcarañá**

#### **3.2.1. Localización de los sitios de medición**

Desde fines del año 2012 hasta la actualidad se realizaron diferentes campañas de aforo para cuantificar experimentalmente caudales superficiales en diferentes secciones transversales seleccionadas en los principales tributarios (ríos Tercero o Ctalamochita, Saladillo y Arroyo Tortugas) y en el río Carcarañá, en su escurrimiento tanto en la Provincia de Córdoba como en la Provincia de Santa Fe, hasta su desagüe en el río Coronda en las cercanías de la localidad de Puerto Gaboto (Figura 35).

En la subcuenca del Río Tercero (Ctalamochita), se realizaron aforos en su cuenca alta (aguas arriba del sistema de embalses del Río Tercero) y en la cuenca media y baja. En la cuenca alta se realizaron aforos en los principales tributarios: río Santa Rosa, río Grande, río Quillinzo y río de La Cruz. Los caudales erogados por el embalse Piedras Moras proveen la condición de borde superior para la cuenca media y baja. La primera sección aforada en la cuenca media y baja se encuentra en la ciudad de Río Tercero precisamente en el Balneario municipal de esa localidad ubicado a pocos kilómetros aguas abajo del embalse mencionado. Aguas abajo de esta sección se realizaron aforos sobre el mismo río en las localidades de Villa Ascasubi, Villa María, Cárcano, Bell Ville, San Marcos Sud y a unos pocos metros aguas arriba de la confluencia con el río Saladillo en las cercanías de Monte Buey, Córdoba.

En lo que respecta a la subcuenca del río Saladillo, la primera sección aforada se encuentra en la localidad de Río Cuarto (en el puente de la ruta 8), la segunda sección se encuentra en la localidad de La Carlota, la tercera se localiza en el cierre de esa subcuenca, más precisamente en el puente sobre Ruta Provincial 6 (en proximidades de la localidad de Saladillo), aproximadamente 2 km aguas arriba su confluencia con el río Tercero (Ctalamochita) y la última unos pocos metros aguas arriba de la confluencia con el Río Saladillo en las cercanías de Monte Buey, Córdoba.

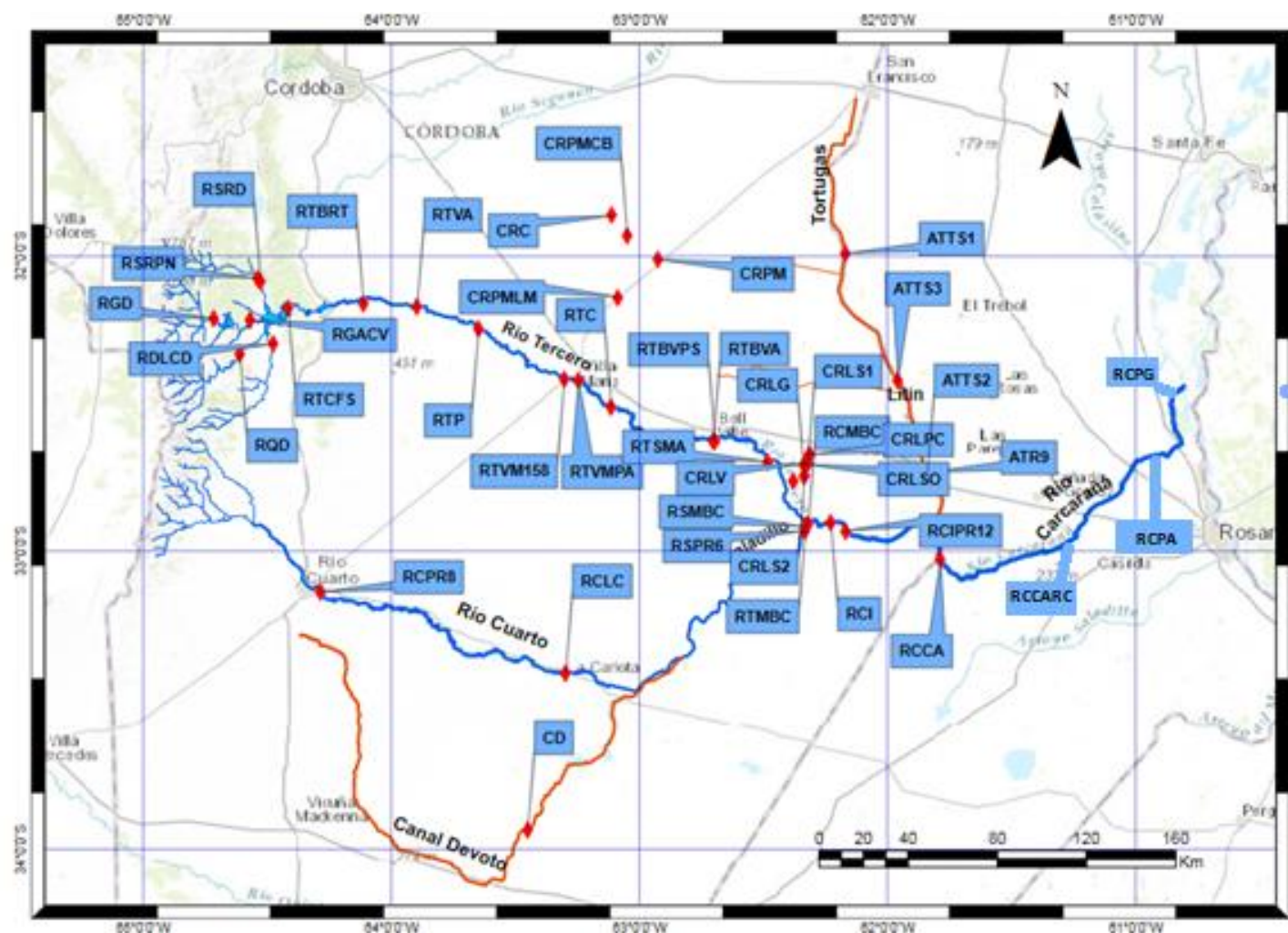
En la subcuenca del Canal San Antonio – Arroyo Tortugas, se aforaron las siguientes secciones: Canal Florentino, Canal Litín-Tortugas, y por último la sección ubicada sobre el puente de ingreso a localidad de Tortugas, sobre Ruta Nacional 9.

Las secciones aforadas sobre el Río Carcarañá fueron: Monte Buey, pocos metros aguas abajo de la confluencia de los ríos Tercero y Saladillo, Inrville, y Cruz Alta sobre el puente de la Ruta Provincial 15. Esta última sección de aforo acumula la totalidad de los aportes de las distintas subcuencas, siendo la condición de borde inferior para la Provincia de Córdoba, y condición de borde superior para la Provincia de Santa Fe.

En Santa Fe se midieron las secciones de Carcarañá, Pueblo Andino (aquí se ubica la estación de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación) y Puerto Gaboto (donde desemboca el río en el río Coronda). También se realizaron, durante periodos de inundaciones, monitoreos específicos en canales rurales que drenan hacia los tributarios del Río Carcarañá el exceso pluvial de escurrimiento en distintas áreas rurales de la provincia de Córdoba. En todas las determinaciones experimentales se implementaron los desarrollos científicos tecnológicos presentados en esta tesis.

### **3.2.2. Resultados obtenidos de la cuantificación de caudales**

En la Tabla 23 se sintetizan los resultados de 59 campañas de aforos realizadas hasta el momento en los principales tributarios del sistema fluvial de estudio, obteniéndose 240 determinaciones de caudal en las diferentes secciones. Las mediciones realizadas previamente al año 2015 (98 determinaciones de caudal) fueron reportadas por Díaz Lozada (2014) en su tesis de maestría. Las 59 campañas de aforo se realizaron en condiciones de aguas bajas, medias y también durante eventos hidrológicos extremos observados en la cuenca (campañas detalladas en la Tabla 23 con numeraciones 14, 15, 17, 30, 31, 32, 41, 51). Además, en la Tabla 24, se presentan los resultados de mediciones de caudales realizadas en canales rurales de drenaje pluvial (20 determinaciones en 7 campañas) que aportan al escurrimiento superficial de la cuenca del río Carcarañá en la provincia de Córdoba.



**Figura 35.:** Localización de las secciones de medición. **RTBRT:** Río Tercero (Ctalamochita), Balneario en Río Tercero. **RTVA:** Río Tercero (Ctalamochita), Villa Ascasubi. **RTVM158:** Río Tercero (Ctalamochita), Villa María - Puente Ruta 158. **RTVMPA:** Río Tercero (Ctalamochita), Villa María - Puente Alberdi. **RTC:** Río

Tercero (Ctalamochita), Cárcano - Puente Cárcano. **RTCFS**: Río Tercero (Ctalamochita), Central Fitz Simon. **RTBVPS**: Río Tercero (Ctalamochita), Bell Ville - Puente Sarmiento. **RTBVA**: Río Tercero (Ctalamochita), Bell Ville - azud. **RTSMA**: Río Tercero (Ctalamochita), San Marcos - azud. **RTMBC**: Río Tercero (Ctalamochita), Monte Buey - Confluencia. **RTP**: Río Tercero (Ctalamochita), Pampayasta. **RSPR6**: Río Saladillo, Puente Ruta 6. **RSMBC**: Río Saladillo, Monte Buey - Confluencia. **RCI**: Río Carcarañá, Inrville. **RCIPR12**: Río Carcarañá, Inrville - Puente Ruta 12. **RCMBC**: Río Carcarañá, Monte Buey - Confluencia. **RCCA**: Río Carcarañá, Cruz Alta. **ATR9**: Arroyo Tortugas - Ruta 9. **ATTS1**: Arroyo Tortugas, Sección 1. **ATTS2**: Arroyo Tortugas, Sección 2. **ATTS3**: Arroyo Tortugas, Sección 3. **RDLCD**: Río de La Cruz, Desembocadura. **RQD**: Río Quillinzo, Desembocadura. **RGD**: Río Grande, Desembocadura. **RGACV**: Río Grande, Arroyo Corto, Vertedero. **RSRD**: Río Santa Rosa, Desembocadura. **RSRPN**: Río Santa Rosa, Puente Negro. **RCPR8**: Río Cuarto, Puente Ruta 8. **RCLC**: Río Cuarto, La Carlota. **CRLPC**: Canal Rural, Leones - Planta de Cloacas. **CRLLB**: Canal Rural, Leones - Canal La Bicoca. **CRLSO**: Canal Rural, Leones - Sur Oeste. **CRLG**: Canal Rural, Leones - Gariglio. **CRLV**: Canal Rural, Leones - Vignati. **CRLS1**: Canal Rural, Leones - Sección 1. **CRLS2**: Canal Rural, Leones - Sección 2. **CRPMLM**: Canal Rural, Pozo del Molle - Los Manantiales. **CRPM**: Canal Rural, Pozo del Molle. **CRPMCB**: Pozo del Molle, Chocho Bustos. **CRC**: Canal Rural, Carrilobo. **CD**: Canal Devoto, **RCCAR**: Río Carcarañá, Carcarañá, **RPCA**: Río Carcarañá, Pueblo Andino, **RCPG**: Río Carcarañá, Puerto Gaboto.

**Tabla 23.:** Resultados de las campañas de aforos realizadas en la cuenca del río Carcarañá.

Campaña #	Sección de aforo	Fecha	Caudal aforado
			[m³/seg]
1	RTBRT	11/06/2012	17,2
2	RTBRT	10/09/2012	14,8
3	RTBRT	12/11/2012	18,5
4	RTMBC	17/12/2012	43,7
	RSMBC	17/12/2012	90,6
5	RTBRT	04/03/2013	23,4
6	RTMBC	14/05/2013	26,9
	RSMBC	14/05/2013	17,7
7	RTBRT	28/05/2013	17,9
8	RTVM158	11/06/2013	20,0
	RSPR6	11/06/2013	14,8
	RCI	11/06/2013	39,0
	RCCA	11/06/2013	49,8
9	RTMBC	13/08/2013	19,9
	RSMBC	13/08/2013	10,5
	RCMBC	13/08/2013	30,7
10	RTBRT	09/09/2013	16,5
	RSPR6	10/09/2013	9,2
	RCI	10/09/2013	27,7
11	RSPR6	30/09/2013	13,8
	RCI	30/09/2013	29,3
	RCCA	30/09/2013	33,5
	RCCARC	30/09/2013	32,32
	RCPA	01/10/2013	31,84
	RCPG	01/10/2013	34,48
12	RTVMPA	19/11/2013	9,6
	RSPR6	19/11/2013	14,8
	RCIPR12	19/11/2013	28,0
	RCCA	19/11/2013	65,0
	ATR9	20/11/2013	24,2
	RCCARC	30/09/2013	32,32
	RCPA	01/10/2013	31,84
	RCPG	01/10/2013	34,48
13	RTBVA	17/12/2013	10,1
	RTSMA	17/12/2013	13,6
14	RTVA	27/02/2014	482,7
	RTVMPA	27/02/2014	326,0
15	RTVMPA	05/03/2014	299,4



Campaña #	Sección de aforo	Fecha	Caudal aforado
			[m <sup>3</sup> /seg]
	RTC	05/03/2014	274,8
	RTBVPS	05/03/2014	256,7
	RTSMA	05/03/2014	232,8
	RTVA	06/03/2014	226,7
	RTVMPA	06/03/2014	288,0
	RTBVPS	06/03/2014	245,6
16	RDLCD	10/03/2014	18,4
	RQD	10/03/2014	46,6
	RGD	10/03/2014	22,6
	RGACV	10/03/2014	108,0
	RSRD	10/03/2014	28,0
17	RTVA	07/04/2014	126,1
	RTVMPA	08/04/2014	121,2
	RTBVPS	08/04/2014	112,9
	RSPR6	08/04/2014	89,8
	RCIPR12	08/04/2014	206,4
17	RCCA	08/04/2014	276,5
	ATR9	09/04/2014	55,6
	RCCARC	08/04/2014	323,2
	RCPA	09/04/2014	344,9
	RCPG	09/04/2014	379,9
18	RTVA	09/06/2014	26,2
	RTVMPA	10/06/2014	25,6
	RTBVPS	10/06/2014	29,1
	RSPR6	10/06/2014	38,5
	RCIPR12	10/06/2014	74,6
	RCCA	10/06/2014	87,6
	ATR9	10/06/2014	7,7
19	RDLCD	08/07/2014	1,3
	RQD	08/07/2014	1,7
	RGD	08/07/2014	1,6
	RSRD	08/07/2014	2,7
20	RCPR8	28/07/2014	2,4
	RCLC	28/07/2014	5,6
21	RTVA	08/09/2014	28,2
	RTVMPA	09/09/2014	22,8
	RTBVPS	09/09/2014	25,1
	RSPR6	09/09/2014	18,7
	RCIPR12	09/09/2014	45,7
	RCCA	09/09/2014	57,9

Campana #	Sección de aforo	Fecha	Caudal aforado
			[m <sup>3</sup> /seg]
	ATR9	10/09/2014	2,8
	RCCARC	10/09/2014	55,1
	RCPA	10/09/2014	64,9
	RCPG	10/09/2014	64,6
22	RCPR8	17/09/2014	1,0
	RCLC	17/09/2014	4,7
23	RTBVPS	16/10/2014	24,2
	RSPR6	16/10/2014	25,5
	RCIPR12	16/10/2014	54,6
	RCCA	16/10/2014	65,7
24	RTCFS	12/11/2014	23,0
25	RTVA	17/11/2014	17,0
	RTVMPA	18/11/2014	17,2
	RTBVPS	18/11/2014	20,0
	RSPR6	18/11/2014	12,8
	RCIPR12	18/11/2014	35,8
25	RCCA	18/11/2014	41,8
	RCCARC	18/11/2014	44,6
26	RTCFS	06/02/2015	39,8
27	RSRPN	11/02/2015	11,9
	RQD	11/02/2015	27,9
	RGD	11/02/2015	2,0
	RDLCD	11/02/2015	15,4
28	RSRPN	18/02/2015	29,0
	RQD	18/02/2015	47,2
	RGD	18/02/2015	46,8
	RDLCD	18/02/2015	17,8
	RTVA	18/02/2015	119,7
29	RTCFS	26/02/2015	37,8
	RSRPN	26/02/2015	37,8
30	RSRPN	04/03/2015	39,3
	RQD	04/03/2015	53,2
	RDLCD	04/03/2015	33,6
	RTVA	04/03/2015	334,6
	RTVMPA	04/03/2015	340,1
31	RTBVPS	09/03/2015	249,6
	RSPR6	09/03/2015	266,5
	RCIPR12	09/03/2015	629,4
	RCCA	09/03/2015	948,7
32	RTVA	27/04/2015	27,4

Campana #	Sección de aforo	Fecha	Caudal aforado
			[m³/seg]
	RTVMPA	28/04/2015	29,2
	RTBVPS	28/04/2015	34,3
	RSPR6	28/04/2015	120,1
	RCIPR12	28/04/2015	178,7
	RCCA	28/04/2015	231,5
	RCCARC	28/04/2015	244,5
	RCPA	29/04/2015	239,0
	RCPG	29/04/2015	261,0
	ATR9	29/04/2015	45,9
33	RTVA	08/06/2015	24,9
	RTVMPA	09/06/2015	24,4
	RTBVPS	09/06/2015	30,0
	RSPR6	09/06/2015	43,3
	RCIPR12	09/06/2015	80,5
	RCCA	09/06/2015	90,0
34	RTVA	07/09/2015	14,7
34	RTVMPA	08/09/2015	12,9
	RTBVPS	08/09/2015	15,4
	RSPR6	08/09/2015	22,6
	RCIPR12	08/09/2015	44,9
	RCCA	08/09/2015	64,9
	RCCARC	09/09/2015	72,8
	RCPA	09/09/2015	77,0
	RCPG	09/09/2015	85,2
	ATR9	09/09/2015	8,1
35	RTVMPA	23/10/2015	13,2
36	RTCFS	10/11/2015	71,0
37	RTVA	16/11/2015	56,2
	RTVMPA	17/11/2015	50,3
	RTBVPS	17/11/2015	58,9
	RSPR6	17/11/2015	51,7
	RCIPR12	17/11/2015	122,6
	RCCA	17/11/2015	185,4
	RCCARC	18/11/2015	300,6
	RCPA	18/11/2015	315,5
	RCPG	18/11/2015	260,0
	ATR9	18/11/2015	8,4
38	RTVMPA	22/12/2015	78,1
39	RTCFS	22/01/2016	90,0
40	RTVMPA	11/02/2016	85,1

Campana #	Sección de aforo	Fecha	Caudal aforado
			[m <sup>3</sup> /seg]
41	RTVA	07/03/2016	81,4
	RTVMPA	08/03/2016	91,9
	RTBVPS	08/03/2016	89,5
	RSPR6	08/03/2016	224,4
	RCIPR12	08/03/2016	346,7
	RCCA	08/03/2016	470,9
	RCCARC	08/03/2016	418,2
	RCPA	09/03/2016	553,6
	RCPG	09/03/2016	524,4
	ATR9	09/03/2016	101,7
42	RTVMPA	16/03/2016	113,9
43	RTVMPA	08/04/2016	65,8
44	RTVA	18/04/2016	76,0
	RTP	18/04/2016	85,0
	RTVMPA	18/04/2016	98,7
45	RTVA	06/06/2016	24,3
45	RTVMPA	07/06/2016	29,2
	RTBVPS	07/06/2016	24,6
	RSPR6	07/06/2016	68,2
	RCIPR12	07/06/2016	113,9
	RCCA	07/06/2016	178,9
	ATR9	07/06/2016	51,3
46	RSPR6	01/08/2016	69,0
	RCIPR12	01/08/2016	115,3
	RCCA	01/08/2016	157,4
	ATR9	01/08/2016	27,2
47	RTVMPA	05/09/2016	24,9
	RTBVPS	06/09/2016	28,2
	RSPR6	06/09/2016	37,6
	RCIPR12	06/09/2016	72,1
	RCCA	06/09/2016	85,7
	ATR9	06/09/2016	7,1
48	RTVMPA	07/11/2016	18,9
	RTBVPS	08/11/2016	19,9
	RSPR6	08/11/2016	115,1
	RCIPR12	08/11/2016	146,4
	RCCA	08/11/2016	151,1
49	RSPR6	23/11/2016	62,7
	RCIPR12	23/11/2016	81,0
	RCCA	23/11/2016	89,0

Campana #	Sección de aforo	Fecha	Caudal aforado
			[m <sup>3</sup> /seg]
	RCCARC	23/11/2016	93,3
	RCPA	24/11/2016	104,5
	RCPG	24/11/2016	101,7
50	ATTS1	29/12/2016	13,7
	ATTS2	29/12/2016	117,8
	ATTS3	29/12/2016	43,2
51	RSPR6	20/01/2017	60,7
	RCIPR12	20/01/2017	91,6
	RCCA	20/01/2017	238,5
	ATR9	20/01/2017	105,8
52	RTVA	13/03/2017	17,3
	RTVMPA	14/03/2017	17,9
	RTBVPS	14/03/2017	26,1
	RSPR6	14/03/2017	29,5
	RCIPR12	14/03/2017	59,4
	RCCA	14/03/2017	73,6
52	ATPR9	14/03/2017	6,3
53	RTVMPA	13/06/2017	14,0
53	RTBVPS	13/06/2017	18,6
	RSPR6	13/06/2017	61,6
	RCIPR12	13/06/2017	86,0
	RCCA	13/06/2017	116,8
	ATPR9	13/06/2017	12,7
54	RTCFS	19/07/2017	13,0
55	RTVMPA	26/07/2017	12,9
56	RTVMPA	12/09/2017	13,9
	RTBVPS	12/09/2017	17,9
	RSPR6	12/09/2017	40,2
	RCIPR12	12/09/2017	65,0
	RCCA	12/09/2017	99,1
	ATPR9	12/09/2017	13,5
57	RTVMPA	27/11/2017	12,3
	RSPR6	28/11/2017	16,2
	RCIPR12	28/11/2017	30,7
	RCCA	28/11/2017	36,0
	ATPR9	28/11/2017	2,2
58	RTVMPA	05/12/2017	13,9
59	RTVMPA	13/03/2018	22,6
	RTBVPS	13/03/2018	21,6
	RSPR6	13/03/2018	7,4

Campana #	Sección de aforo	Fecha	Caudal aforado
			[m <sup>3</sup> /seg]
	RCIPR12	13/03/2018	29,5
	RCCA	13/03/2018	31,9

**Tabla 24.:** Resultados de las campañas de aforos realizadas en canales rurales que se encuentran dentro de la cuenca del río Carcarañá.

Campana #	Sección de aforo	Fecha	Caudal aforado [m <sup>3</sup> /seg]
A	CD	29/05/2014	7,1
B	CD	14/11/2014	5,6
C	CRLPC	22/12/2015	0,1
	CRLLV	22/12/2015	0,1
	CRLSO	22/12/2015	0,1
	CRLG	22/12/2015	0,2
	CRLV	22/12/2015	0,9
D	CRPMLM	18/04/2016	6,2
	CRPM	18/04/2016	3,6
E	CRLPC	26/04/2016	0,2
	CRLS1	26/04/2016	0,4
E	CRLLV	26/04/2016	0,5
	CRLSO	26/04/2016	1,4
	CRLS2	26/04/2016	2,5
	CRLG	26/04/2016	1,0
	CRLV	26/04/2016	3,7
	CRPM	26/04/2016	2,7
F	CRPM	07/07/2016	1,2
	CRPMCB	07/07/2016	1,2
	CRC	07/07/2016	1,1

### 3.2.3. Verificación de evacuación de estructuras de descarga de las presas del sistema

Para evitar erogar caudales que produzcan inundaciones, desde el año 2014 se realizaron mejoras en la operación del sistema de embalses y se realizaron importantes inversiones para incrementar la capacidad de descarga de los órganos de evacuación del embalse de Río Tercero Fitz Simon, (coordenadas 32°10'51.75"S-64°24'46.53"O) para de ese modo tener una mayor capacidad de regulación. Las mejoras realizadas son: la adición de 3 válvulas chorro Howell-Bunger (17 m<sup>3</sup>/s c/u), colocación de un nuevo generador eléctrico (10 m<sup>3</sup>/s), y reparación del descargador de fondo (20 m<sup>3</sup>/s). Con dicho reacondicionamiento del embalse se ha incrementado en más de un 100% la capacidad

de erogación, lo cual permite realizar operaciones para una mejor atenuación de crecidas. Antes y después de la realización de las mejoras se realizaron mediciones de caudal en el canal de fuga de la presa (Figura 36) para cuantificar los caudales erogados por los diferentes órganos de descarga y compararlos con los reportados con las curvas teóricas. Esta actividad es novedosa en el ámbito de la gestión de los recursos hídricos en la Provincia de Córdoba. En la Tabla 25 se reportan los resultados obtenidos.

Díaz Lozada (2014) realizó lo mismo para el Embalse Piedras Moras ( $32^{\circ}10'0.72''S$  -  $64^{\circ}14'39.19''O$ ), el cual es el último embalse del sistema de Río Tercero. En este caso se observó que el caudal superficial que escurre en el Río Tercero (Ctalamochita) en las cercanías de las localidades de Río Tercero y Villa Ascasubi, está fuertemente determinado por las erogaciones del Dique Piedras Moras, ya sea por la central hidroeléctrica o por las estructuras de evacuación de excedencias. En la Figura 37, se muestra el contraste de los caudales reportados y estimados por el Dique Piedras Moras y los caudales medidos en las secciones ubicadas en el Balneario de la ciudad de Río Tercero y en Villa Ascasubi (ambas localidades ubicadas aguas debajo de la presa). Se observa una buena correspondencia entre ambos caudales lo que implica que, en casos donde no se disponga de datos de aforos en las secciones ubicadas en el Balneario de la ciudad de Río Tercero y Villa Ascasubi, se pueden utilizar los datos de erogación reportados por Piedras Moras.

**Tabla 25.:** Capacidad de evacuación de los órganos de descarga de la presa de río Tercero.

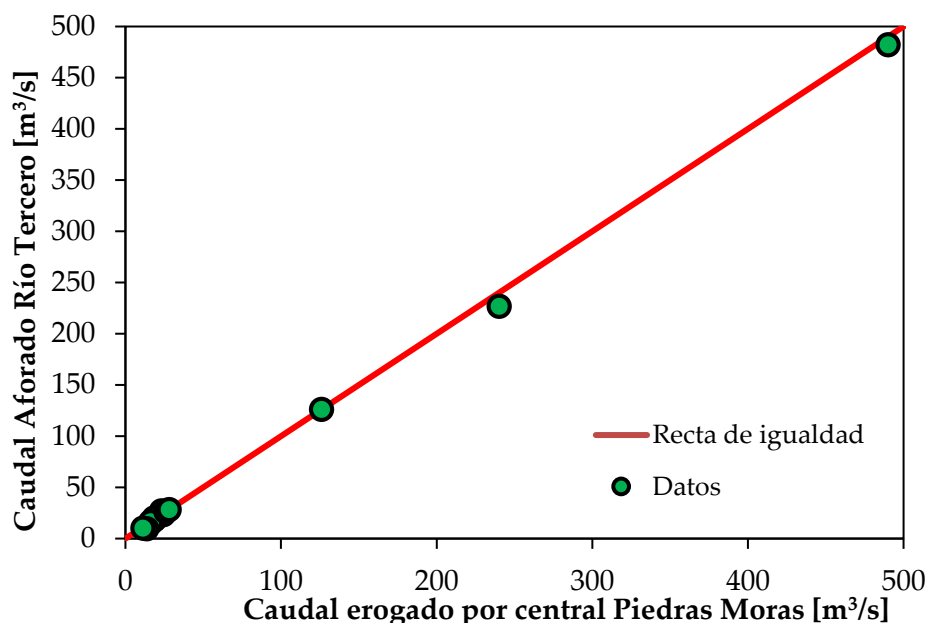
Fecha	Condición	Caudal estimado [m <sup>3</sup> /s]	Caudal aforado [m <sup>3</sup> /s]	Diferencia medido – estimado [%]	Observaciones
12/11/14	2 generadores (10m <sup>3</sup> /s c/u) y descargador de fondo cerrado con perdidas	20	23,0	13	
06/02/15	2 generadores (10m <sup>3</sup> /s c/u) y descargador de fondo máxima apertura	40	39,8	1	Máxima capacidad de erogación que tenía el embalse antes de mejoras
26/02/15	2 generadores (10m <sup>3</sup> /s c/u), bypass	43	37, 8	14	

	efectuado en la tercera turbina (fuera de servicio en ese momento) y descargador de fondo máxima apertura				
22/01/16	3 generadores (10m <sup>3</sup> /s c/u), 3 válvulas chorro Howell-Bunger (17m <sup>3</sup> /s c/u) y descargador de fondo máxima apertura	100	96,2	4	Máxima capacidad de erogación actual
19/07/17	Descargador de fondo cerrado con perdidas	-	3,7		
19/07/2017	Descargador de fondo cerrado (con pérdidas) y una válvula chorro Howell-Bunger (17m <sup>3</sup> /s c/u)	21 (teniendo en cuenta 4 m <sup>3</sup> /s de perdidas, medido anteriormente)	20,9	0	
19/07/2017	Descargador de fondo cerrado (con pérdidas) y un generador funcionando	14	14,6	4	



**Figura 36.:** Canal de fuga de la central Fitz Simon donde se realizaron los aforos mostrados en la Tabla 25. La foto corresponde a las mediciones efectuadas el día 26/02/2015





**Figura 37.:** Contraste entre los caudales estimados mediante datos de potencia generada por la central Piedras Moras y los caudales medidos en el Río Tercero (Ctalamochita) en las secciones emplazadas el Balneario de la ciudad de Río Tercero y en Villa Ascasubi.

En las campañas realizadas en periodos en los cuales no se registraron precipitaciones significativas en la cuenca media y baja no se han detectado aportes importantes en la cuenca del Río Tercero (Ctalamochita) en el tramo desde el Dique Piedras Moras hasta la confluencia con el río Saladillo, por lo cual se puede concluir que el escurrimiento superficial del Río Tercero (Ctalamochita) en esos periodos está regulado por las evacuaciones del Embalse Piedras Moras.

### 3.2.4. Determinación de la capacidad del cauce en diferentes secciones del sistema fluvial

Mediante el uso de la información relevada durante los periodos de crecida con ADCP (Perfilador de Corriente Acústico Doppler), se determinó la capacidad hidráulica del cauce en diferentes secciones de medición, ya que durante las campañas de aforo se midieron caudales que alcanzaban los niveles de desborde (Tabla 26 y Figura 38).





**Tabla 26.:** Capacidad del cauce en las diferentes secciones de medición.

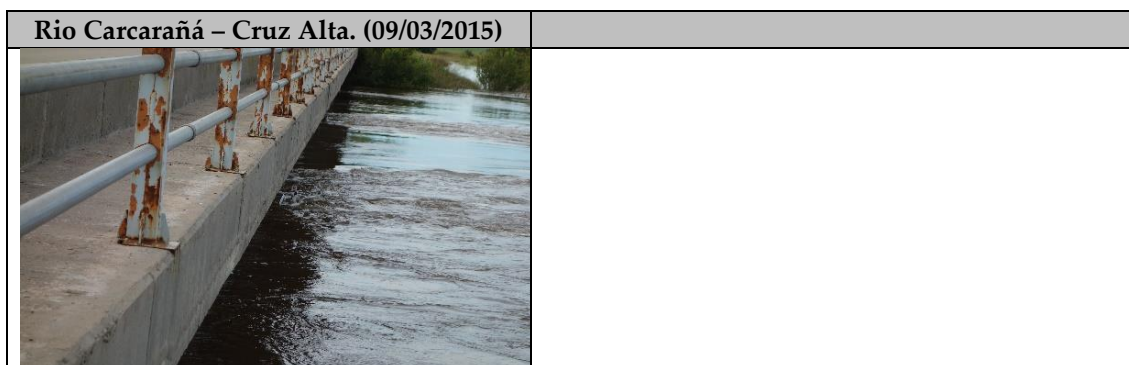
Río	Fecha	Sección	Capacidad del cauce ( $m^3/s$ )
Tercero (Ctalamochita)	27/02/2014 – 04/03/2015	Villa María – Pte. Alberdi	~ 350
Tercero (Ctalamochita)	05/03/2014 – 03/09/2015	Bell Ville – Puente Sarmiento	~ 250
Saladillo	03/09/2015	Saladillo – Ruta 6	~ 260

Carcarañá	03/09/2015	Inrville – Ruta 12	~ 650
Carcarañá	03/09/2015	Cruz Alta – Ruta 15	~ 950

Con base a esta información y las mejoras en los órganos de evacuación de la presa de río Tercero (principal órgano de regulación), que se mencionan en el apartado previo, se fijó que el caudal erogado por el Dique Piedras Moras no supere los 200 m<sup>3</sup>/s, para así evitar inundaciones aguas abajo en el río Tercero (Ctalamochita).

A modo ilustrativo, en la se muestran fotografías de los ríos a su máxima capacidad del cauce observadas durante las campañas de medición se efectuadas en el mes de marzo de 2015. En estos trabajos de campo se encontró la particularidad de que todos los principales tributarios del río Carcarañá presentaban importantes caudales con niveles de superficie libre que alcanzaban los tableros de los puentes (con lo que se podría estimar el caudal de diseño de esos puentes). El máximo caudal medido en el río Carcarañá con ADCP por el CETA-UNC fue de 950 m<sup>3</sup>/s en la localidad de Cruz Alta (con este valor la provincia de Córdoba emitió una alerta a la provincia de Santa Fe) para gestionar el riesgo de inundación aguas abajo en las dos provincias.

Río Tercero (Ctalamochita) - Villa María (27/02/2014)	Río Tercero (Ctalamochita) - Bell Ville (05/03/2014)
	
Río Saladillo – Puente Ruta 6 (09/03/2015)	Río Carcarañá – Inrville (09/03/2015)
	



**Figura 38.:** Condiciones de flujo de los ríos al momento de determinar la capacidad de los cauces.

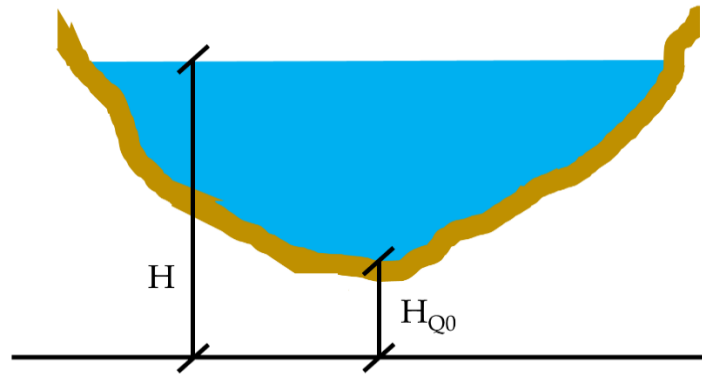
### 3.2.5. Generación de Curvas Altura-Caudal en diferentes secciones del sistema fluvial del Río Carcarañá

A partir de la información de caudal obtenida mediante el uso del ADCP, se elaboraron las curvas de Altura-Caudal (H-Q) que relacionan los valores de caudales superficiales escurridos en el sistema fluvial con la lectura de superficie libre obtenida a través de una escala. Los valores extremos de caudal medidos marcan el límite de capacidad de la sección (eventos año 2014 y 2015), de este modo se evita la extrapolación de la curva altura caudal, que puede generar importantes errores al momento de estimar el caudal en situaciones extremas. Tomkins (2014) indica que se considera admisible un error del 10% en la estimación de caudales utilizando estas curvas. La metodología utilizada para construir las curvas consistió en desarrollar interpoladores mediante el ajuste estadístico de los valores observados utilizando la ecuación matemática (con fundamento hidráulico) presentada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos – USGS- (Kennedy, 1984). Los interpoladores generados son del tipo:

Ec. 5

$$Q = \varphi(H - H_{Q0})^\varepsilon = \varphi\Delta H^\varepsilon$$

Donde  $\varphi$  y  $\varepsilon$  son constantes de calibración, H es el nivel o altura de superficie libre respecto a un nivel de referencia y  $H_{Q0}$  es un parámetro que representa la altura de superficie libre cuando no hay escurrimiento, caudal nulo (Figura 39). El parámetro  $H_{Q0}$  es hipotético y no puede ser medido in situ en cursos fluviales (donde la batimetría del lecho es irregular), pero si puede ser relevado en estructuras de control como vertederos. Este valor indica el nivel en el cual el caudal es nulo según el nivel de referencia seleccionado.



**Figura 39.:** Esquema de un cauce donde se representa el nivel de superficie libre registrado respecto a un nivel de referencia arbitrario (H) y el nivel caudal nulo ( $H_{Q0}$ ).

Si se compara la Ec. 5 con la ecuación de Manning (Manning, 1891), puede hacerse el siguiente análisis del sentido físico de cada uno de los coeficientes de la Ec. 5 considerando que, al ser la sección muy ancha respecto a la altura, el radio hidráulico es similar al tirante (Y)

Ec. 6

$$Q = \frac{1}{n} B S^{1/2} Y^{5/3}$$

Donde  $n$  es el coeficiente de Manning,  $B$  el ancho de la sección,  $S$  la pendiente de energía e  $Y$  el tirante medio de la sección.

Puede observarse en la Ec. 6 que el valor  $\phi$  es igual a  $\frac{1}{n} B S^{1/2}$ . El valor de  $Y$  es igual ( $H - H_{Q0}$ ), y no igual a  $H$  ya que no necesariamente el nivel de la escala coincide con el valor de nivel que corresponde al caudal nulo. El valor de  $\varepsilon = 5/3$  no proviene del ajuste, sino que ha sido fijado de acuerdo a lo propuesto por la ecuación de Manning para canales y ríos. Fenton (2018) propone que el exponente  $\varepsilon$  debe ser ajustado ya que la ecuación de Manning es una simplificación de los procesos hidráulicos que realmente ocurren en el cauce. Debido a ello en esta tesis se ajustan las curvas altura caudal utilizando la Ec. 5 fijando el valor del exponente  $\varepsilon = 5/3$  y también se realiza el ajuste de la misma ecuación, pero ajustando también el valor de  $\varepsilon$ .

Para el caso de vertederos se debe hacer el mismo análisis, pero en este caso comparar la Ec. 5 con la ecuación de vertedero rectangular (Sotelo Ávila, 1991), la cual se detalla a continuación.

Ec. 7

$$Q = C_D B Y^{3/2}$$

Donde  $C_D$  es el coeficiente de vertedero,  $B$  el ancho de vertedero e  $Y$  el tirante sobre la cresta.

En este caso  $\phi$  es igual al producto de  $C_D$  por  $B$  mientras que el valor de  $Y$ , al igual que el caso anterior, es igual  $(H-H_{Q0})$ , y no igual a  $H$  ya que no necesariamente el nivel de la escala coincide con el valor de nivel que corresponde al caudal nulo. El valor de  $\varepsilon$  corresponde a un valor 1,5 para el caso de vertederos acorde con la Ec. 7.

Es importante destacar que en el evento de crecida del año 2014 se aforaron caudales en un amplio rango incluyendo, en la mayoría de las secciones, el caudal máximo que puede escurrir por el cauce (luego se producen desbordes). Dichos aforos generaron información de valores extremos los cuales son muy importantes a la hora de ajustar una relación altura caudal. Con dichos datos Díaz Lozada (2014) realizó un primer ajuste de curvas que relacionan los valores de altura de superficie libre – caudal en distintas secciones del sistema fluvial. Posteriormente con las nuevas mediciones realizadas desde el año 2015 se validaron dichas curvas y se mejoraron los ajustes estadísticos realizados. Estas herramientas (curvas alturas de superficie libre – caudal) permiten a los organismos de gestión del riesgo y de los recursos hídricos tener una estimación rápida y confiable de caudal a través de la lectura de una variable sencilla como es el nivel de una escala.

*Curva Altura-Caudal del Río Tercero (Ctalamochita) en el puente de ingreso a la localidad de Villa Ascasubi*

En la Figura 40 se muestra la curva altura-caudal ajustada para el Río Tercero (Ctalamochita) en el puente de ingreso a la localidad de Villa Ascasubi, la batimetría de la sección y la escala existente en dicho puente (los valores intermedios de altura se interpolan digitalmente) sobre la cual se tomaron las lecturas de nivel. Las importantes variaciones del nivel del lecho observadas en la sección generan incertidumbres significativas en la relación ajustada, principalmente para caudales pequeños.

La ecuación ajustada considerando el exponente igual 1,67 en esta sección posee un valor  $H_{Q0}$  de -0,31m y  $r^2$  de 0,97.

Ec. 8

$$Q = 41,98.(H-H_{Q0})^{1,67}$$

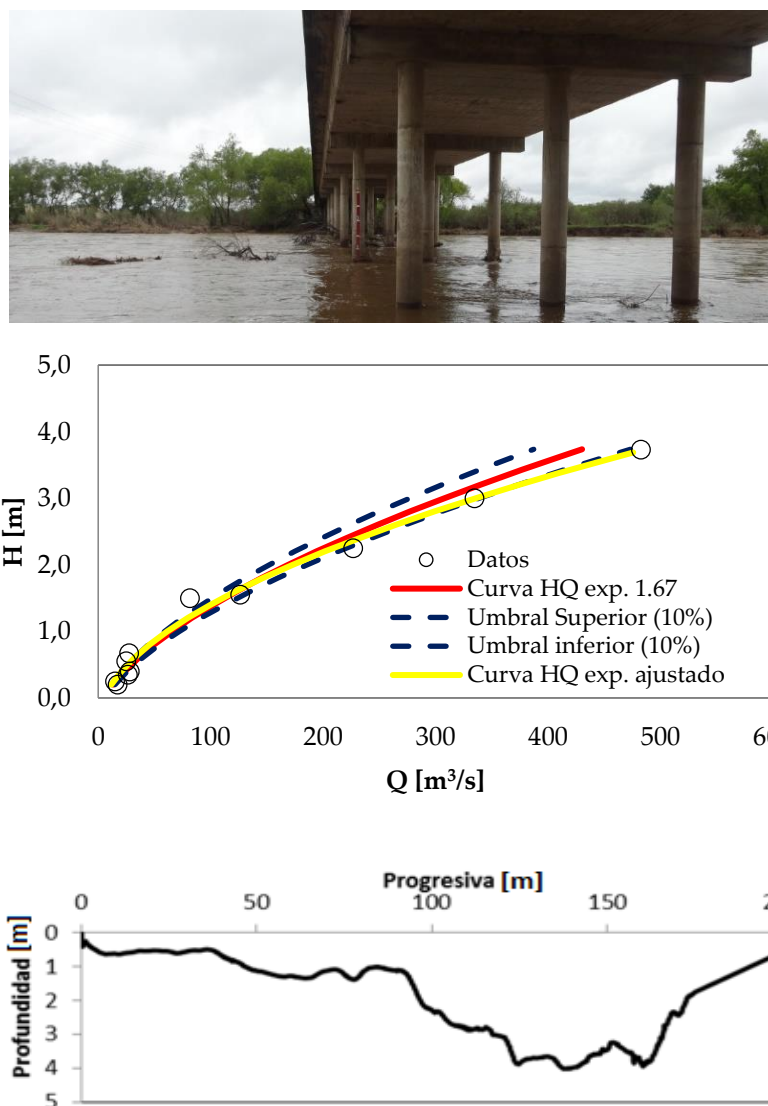
con H expresado en [m] y Q en [m³/s].

De la misma manera se realizó el ajuste de la Ec. 5 pero esta vez se ajusto también el valor del exponente. La ecuacion obtenida posee un  $H_{Q0}$  de -0,35 m y  $r^2$  de 0,99.

Ec. 9

$$Q = 34,8.(H-H_{Q0})^{1,87}$$

con H expresado en [m] y Q en [m³/s].



**Figura 40.:** Curvas altura-caudal para el Río Tercero (Ctalamochita) en el puente de ingreso a la localidad de Villa Ascasubi. Los niveles de superficie libre están referenciados a la escala existente en una de las pilas del puente.

Curva Altura-Caudal del Río Tercero (Ctalamochita) en el puente Alberdi de la localidad de Villa María.



La sección de aforo donde se ajustó la curva altura-caudal se encuentra en el área central de Villa María y la escala representada en una de las pilas del puente es utilizada por los bomberos y organismos municipales y provinciales para monitorear la evolución del nivel del Río Tercero (Ctalamochita). Durante los eventos de crecida registrados en 2014 y 2015, los niveles del río reportados por los medios de comunicación y utilizados por los organismos de defensa civil corresponden a esta sección. En la Figura 41 se muestra la curva ajustada, la batimetría de sección y la escala existente. Las importantes variaciones del nivel del lecho observadas en la sección generan incertidumbres significativas en la relación ajustada, principalmente para caudales pequeños.

La ecuación ajustada en esta sección presenta un valor  $H_{Q0}$  de -1,05m y  $r^2$  de 0,90.

Ec. 10

$$Q=26,56.(H-H_{Q0})^{1,67}$$

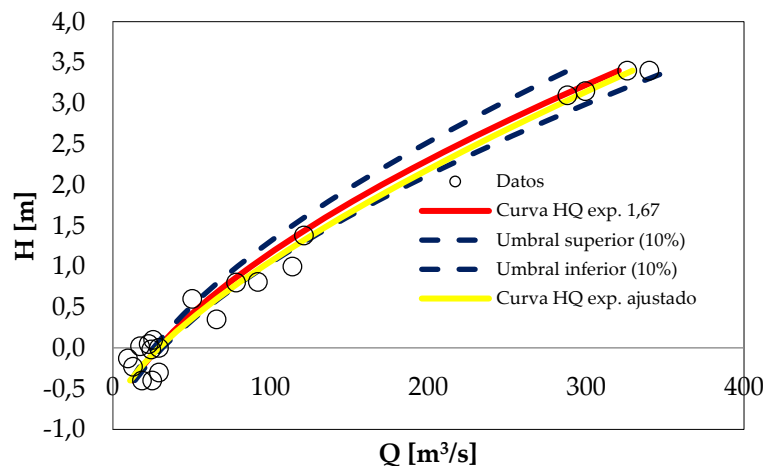
con H expresado en [m] y Q en [m<sup>3</sup>/s].

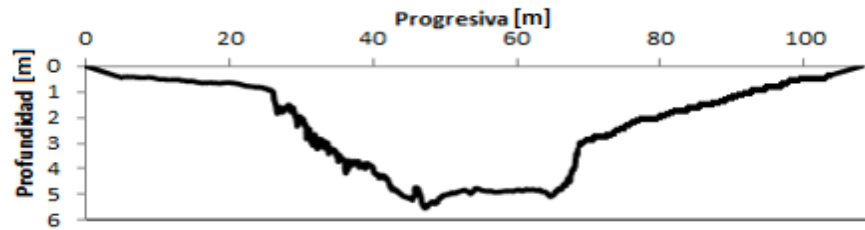
De la misma manera se realizó el ajuste de la Ec. 5 pero esta vez se ajusto también el valor del exponente. La ecuacion obtenida posee un  $H_{Q0}$  de -0,82 m y  $r^2$  de 0,99.

Ec. 11

$$Q = 39,2.(H-H_{Q0})^{1,48}$$

con H expresado en [m] y Q en [m<sup>3</sup>/s].





**Figura 41.:** Curvas altura-caudal del Río Tercero (Ctalamochita) en el Puente Alberdi de Villa María. Los niveles de superficie libre están referenciados a la escala existente en una de las pilas del puente.

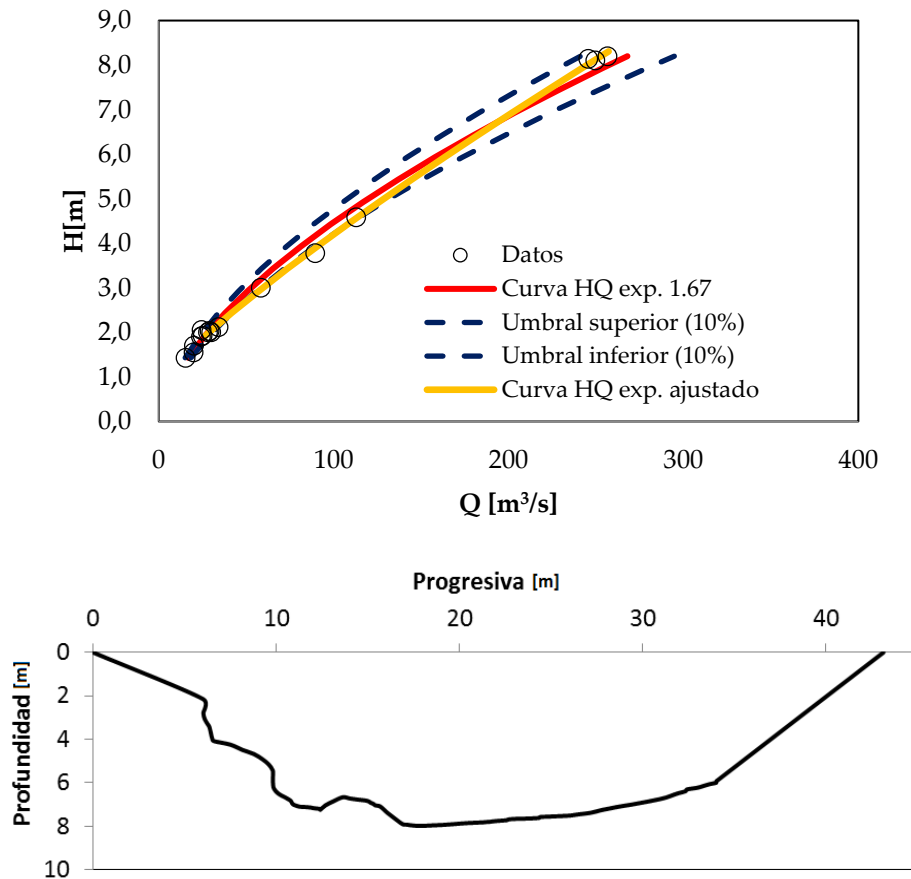
Los valores de caudales máximos utilizados para el ajuste de la curva altura de superficie libre-caudal en esta sección fueron registrados en condiciones de flujo con desborde del río, invadiendo la Av. Costanera y sectores aledaños. Aún en estas condiciones se pudo monitorear la totalidad de la sección mojada ya que el aforo de estos caudales se realizó en la sección del puente Alberdi.

#### Curva Altura-Caudal del Río Tercero (Ctalamochita) en el puente Sarmiento Bell Ville

El puente Sarmiento se encuentra ubicado en el área central de la localidad de Bell Ville. Este puente cuenta con una escala, la cual en épocas de crecida queda bajo el agua y no es posible tomar lectura. Para subsanar este problema y poder ajustar la curva altura-caudal se referenció los niveles respecto al tablero del puente y luego se determinó el nivel de superficie libre con respecto a la escala existente. En la Figura 42 se muestra la curva ajustada, la batimetría de sección y la escala existente.







**Figura 42.:** Curvas altura-caudal para el Río Tercero (Ctalamochita) en el puente Sarmiento de la localidad de Bell Ville. Los niveles de superficie libre están referenciados a la escala existente en una de las pilas del puente.

La ecuación ajustada en esta sección presenta un valor  $H_{Q0}$  de -0,16 y  $r^2$  de 0,99.

Ec. 12

$$Q=7,73. (H-H_{Q0})^{1,67}$$

con H expresado en [m] y Q en [m³/s].

De la misma manera se realizó el ajuste de la Ec. 5 pero esta vez se ajustó también el valor del exponente. La ecuación obtenida posee un  $H_{Q0}$  de 0,81 m y  $r^2$  de 0,99.

Ec. 13

$$Q = 23,34.(H-H_{Q0})^{1,19}$$

con H expresado en [m] y Q en [m³/s].

#### Curva Altura-Caudal del Río Tercero (Ctalamochita) en el puente Sturla Bell Ville

El puente Sturla es el último puente dentro del tramo urbano del Río Tercero (Ctalamochita) en la ciudad de Bell Ville y posee una escala que es utilizada por las

autoridades municipales y provinciales para monitorear la evolución del nivel del Río Tercero (Ctalamochita). Durante los eventos de crecida de los años 2014 y 2015, los niveles reportados por los medios periodísticos corresponden a esta escala. Dado la importancia que tiene esta sección y debido a la existencia de registro de niveles, se procedió a ajustar la curva altura-caudal (Figura 43). La ecuación ajustada en esta sección presenta un valor  $H_{Q0}$  de 1,08m y  $r^2$  de 0,99.

Ec. 14

$$Q=7,18(H-H_{Q0})^{1,67}$$

con H expresado en [m] y Q en [ $m^3/s$ ].

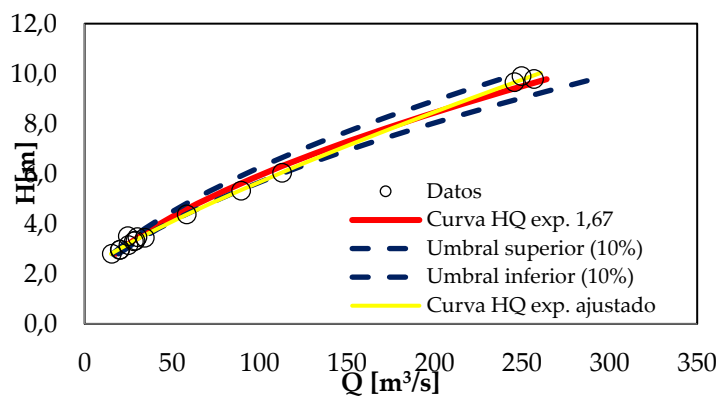
De la misma manera se realizó el ajuste de la Ec. 5 pero esta vez se ajusto también el valor del exponente. La ecuacion obtenida posee un  $H_{Q0}$  de 2,03 m y  $r^2$  de 0,99.

Ec. 15

$$Q = 20,7.(H-H_{Q0})^{1,22}$$

con H expresado en [m] y Q en [ $m^3/s$ ].

La sección transversal en este sitio de medición no se muestra en la Figura 43 debido a que las mediciones de caudal se efectuaron aguas arriba en el puente Sarmiento de la localidad de Bell Ville.



**Figura 43.:** Curvas altura-caudal del Río Tercero (Ctalamochita) en el puente Sturla de la localidad de Bell Ville. Los niveles de superficie libre están referenciados a la escala existente en una de las pilas del puente.

Curva Altura-Caudal del Río Tercero (Ctalamochita) en el Azud San Marcos

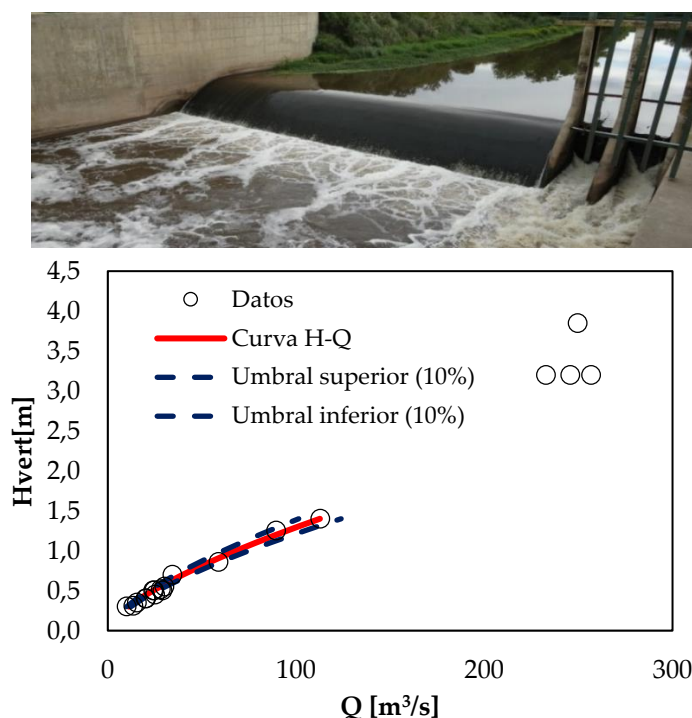
El azud San Marcos al igual que el azud Bell Ville se utilizan para elevar el nivel de superficie libre necesario para la toma de agua que abastece a todo el sudeste provincial. Al igual que en el azud Bell Ville la cooperativa del Sudeste tiene previsto utilizar la curva altura-caudal para publicar valores de caudal en tiempo real (se ha instalado recientemente una estación automática de nivel). En la Figura 44 se muestra el azud y la curva ajustada.

La ecuación ajustada en esta sección posee un  $r^2$  de 0,98 y es la que se presenta a continuación:

Ec. 16

$$Q = 68,03.H^{1,50}$$

con H expresado en [m] y Q en [ $m^3/s$ ]. La ecuación se ajusta solo hasta caudales escurridos del orden de  $120 m^3/s$  ya que para valores superiores cambia significativamente el comportamiento hidrodinámico del flujo sobre el azud y un mayor número de condiciones intermedias deben ser monitoreadas. La sección transversal en este sitio de medición, no se muestra en la Figura 44 debido a que las mediciones de caudal se efectuaron en una sección cercana aguas abajo en el puente rural de la localidad de San Marcos Sud, por cuestiones de accesibilidad y seguridad.



**Figura 44.:** Curva altura-caudal del Río Tercero (Ctalamochita) en el Azud San Marcos. Los niveles de superficie libre están referenciados a la escala existente en el azud.

Curva Altura-Caudal del Río Carcarañá en la sección ubicada en Inrville en el puente Ruta 12

La sección del Río Carcarañá ubicada en el puente de la ruta provincial 12 en Inrville tiene la particularidad de ubicarse pocos kilómetros aguas abajo de la confluencia de los ríos Tercero (Ctalamochita) y Saladillo antes del aporte producido por el Arroyo Tortugas. A través de esta curva se puede obtener por diferencia con el caudal relevado en el puente de Ruta 15 en Cruz Alta, el aporte al sistema producido por el Arroyo Tortugas y arroyos aledaños a la zona. En la Figura 45 se muestra la batimetría de la sección y la curva altura-caudal.

La ecuación ajustada en esta sección presenta un valor  $H_{Q0}$  de -0,85 y un  $r^2$  de 0,98. El nivel de referencia de superficie libre de esta sección (nivel cero) se encuentra ubicado a 5,50 m debajo del nivel inferior de viga del tablero del puente.

Ec. 17

$$Q=32,93(H-H_{Q0})^{1,67}$$

con H expresado en [m] y Q en [m<sup>3</sup>/s].

De la misma manera se realizó el ajuste de la Ec. 5 pero esta vez se ajusto también el valor del exponente. La ecuación obtenida posee un  $H_{Q0}$  de -0,06 m y  $r^2$  de 0,99.

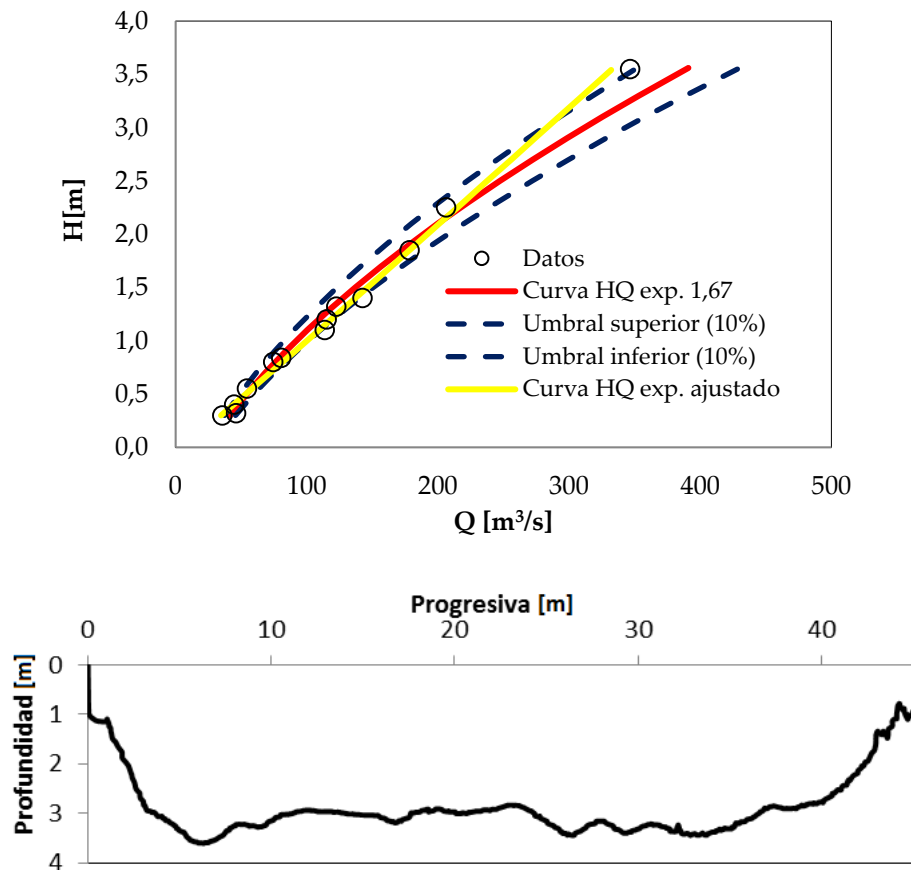
Ec. 18

$$Q = 94,63(H-H_{Q0})^{0,98}$$

con H expresado en [m] y Q en [m<sup>3</sup>/s].

Se observa en la Figura 45 que la Ec. 9 ajusta mas adecuadamente para valores altos de caudal, pero dicho valor se encuentra en el limite del intervalo de confianza de la Ec. 13.

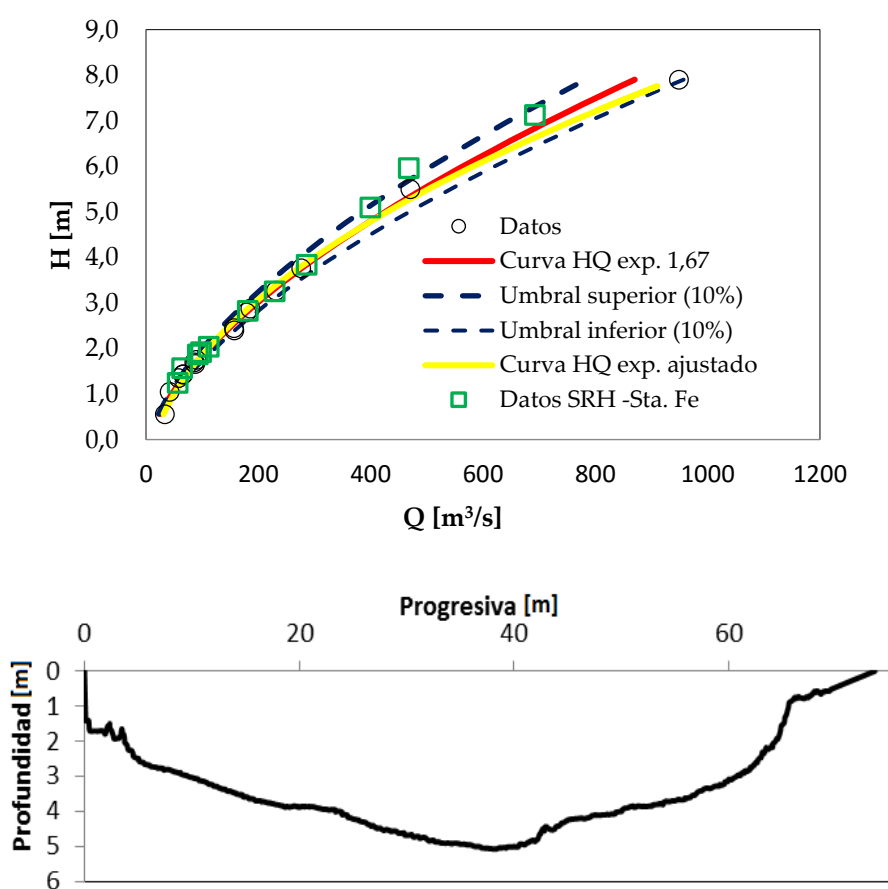




**Figura 45.:** Curvas altura-caudal del Río Carcarañá en el puente Ruta 12 en las cercanías de Inriville. Los niveles de superficie libre se encuentran referenciados a un nivel de 5,5 m por debajo del nivel inferior de viga.

Curva Altura-Caudal del Río Carcarañá en la sección de la localidad de Cruz Alta ubicada en el puente Ruta 15

La sección del Río Carcarañá ubicada en el puente de la ruta 15, se encuentra en el límite de las provincias de Córdoba y Santa Fe. La importancia de ajustar una curva altura-caudal en esta sección radica en conocer los caudales superficiales que entrega la provincia de Córdoba a su provincia vecina por el sistema fluvial del Río Carcarañá. Desde el año 2015, la sección cuenta con una estación remota automática para el registro de niveles, los cuales pueden ser convertidos en un procesamiento sencillo en caudales a través de las curvas mostradas en la Figura 46. En esta figura se han incorporado los valores de caudal medidos por la Secretaria de Recursos Hidricos de Santa Fe con un molinete mecanico. Además, en la misma se ha graficado la batimetría de sección.



**Figura 46.:** Curvas altura-caudal del río Carcarañá en el puente Ruta 15 en las cercanías de Cruz Alta.

La ecuación ajustada en esta sección presenta un valor  $H_{Q0}$  de -0,43m y un  $r^2$  de 0,99.  
Ec. 19

$$Q=25,41.(H-H_{Q0})^{1,67}$$

con  $H$  expresado en [m] y  $Q$  en [m³/s].

De la misma manera se realizó el ajuste de la Ec. 5 pero esta vez se ajustó también el valor del exponente. La ecuación obtenida posee un  $H_{Q0}$  de -1,10 m y  $r^2$  de 0,99.

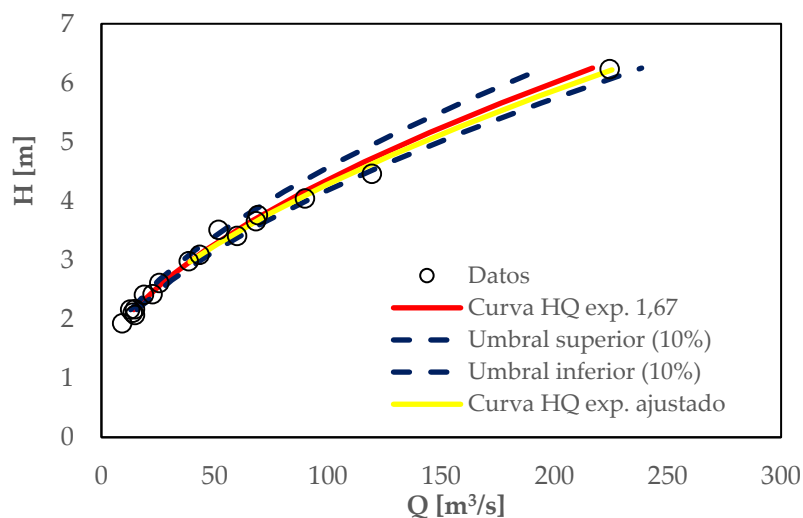
Ec. 20

$$Q = 11,22 \cdot (H - H_{Q0})^{2,01}$$

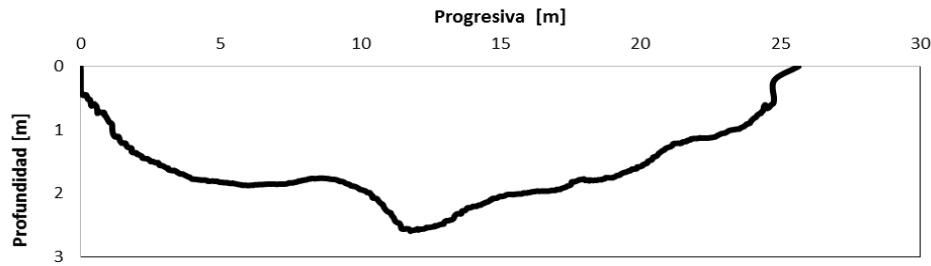
con H expresado en [m] y Q en [m³/s].

Curva Altura-Caudal del Río Saladillo en la sección del puente de Ruta 6

La sección del río Saladillo ubicada en el puente de la ruta 6, se encuentra ubicada en la localidad de Saladillo a pocos kilómetros aguas arriba de la confluencia. La importancia de este sitio de medición es que esta sección es el cierre de la cuenca del Río Cuarto-Saladillo. En la Figura 47 se muestra la curva altura-caudal ajustada. La ecuación se ajusta solo hasta caudales escurridos del orden de 225 m³/s ya que para valores superiores el puente produce que la sección trabaje como orificio.







**Figura 47.:** Curva altura-caudal del río Saladillo en la localidad homónima.

La ecuación ajustada en esta sección presenta un valor  $H_{Q0}$  de 1,16m y un  $r^2$  de 0,99.

Ec. 21

$$Q=14,3.(H-H_{Q0})^{1,67}$$

con H expresado en [m] y Q en [m<sup>3</sup>/s].

De la misma manera se realizó el ajuste de la Ec. 5 pero esta vez se ajustó también el valor del exponente. La ecuación obtenida posee un  $H_{Q0}$  de 1,27 m y  $r^2$  de 0,99.

Ec. 22

$$Q = 16,41.(H-H_{Q0})^{1,64}$$

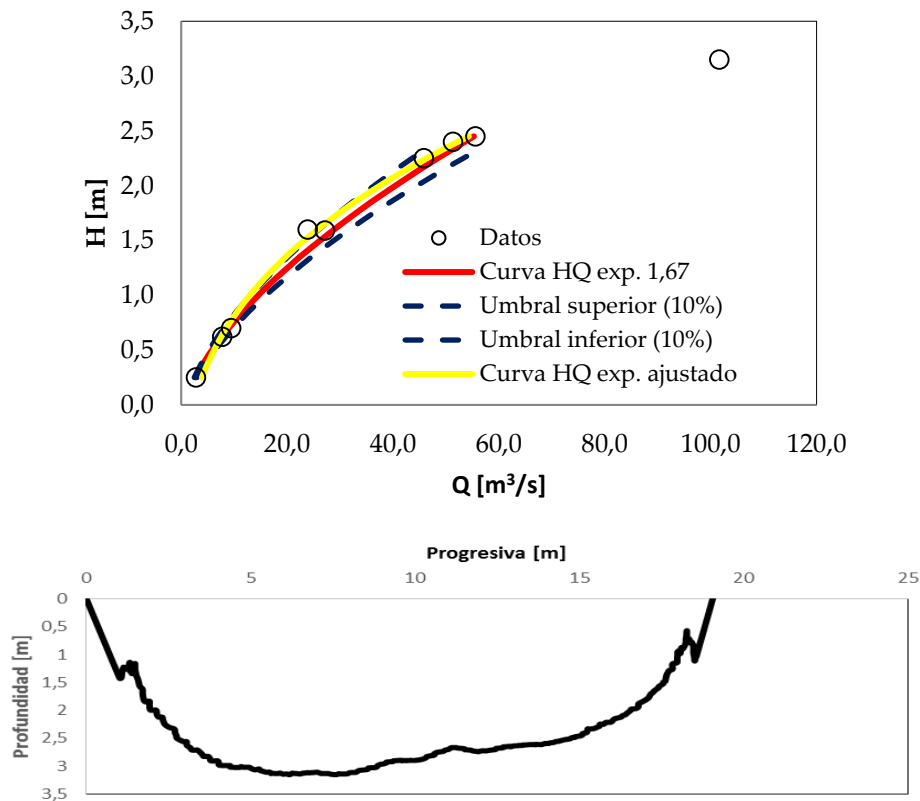
con H expresado en [m] y Q en [m<sup>3</sup>/s].

#### Curva Altura-Caudal del Arroyo Tortugas en la localidad homónima

La sección de medición del Arroyo Tortugas se localiza en el puente de ingreso a la localidad homónima. En dicha sección el arroyo se divide en tres canalizaciones de las cuales el canal central es donde generalmente se dan los mayores escurrimientos. En esta publicación se presenta la curva altura-caudal solo válida para el escurrimiento del canal central. En la Figura 48 se muestra la curva altura-caudal ajustada, el valor más alto de caudal no fue contemplado para el ajuste de la curva H-Q debido a que para ese caudal había desbordes hacia otro canal.







**Figura 48.:** Curva altura-caudal Arroyo Tortugas canal central.

La ecuación ajustada en esta sección presenta un valor  $H_{Q0}$  de -0,18m y un  $r^2$  de 0,99.

Ec. 23

$$Q=11,0.(H-H_{Q0})^{1,67}$$

con H expresado en [m] y Q en [m³/s].

De la misma manera se realizó el ajuste de la Ec. 5 pero esta vez se ajusto también el valor del exponente. La ecuacion obtenida posee un  $H_{Q0}$  de -1,12 m y  $r^2$  de 0,99.

Ec. 24

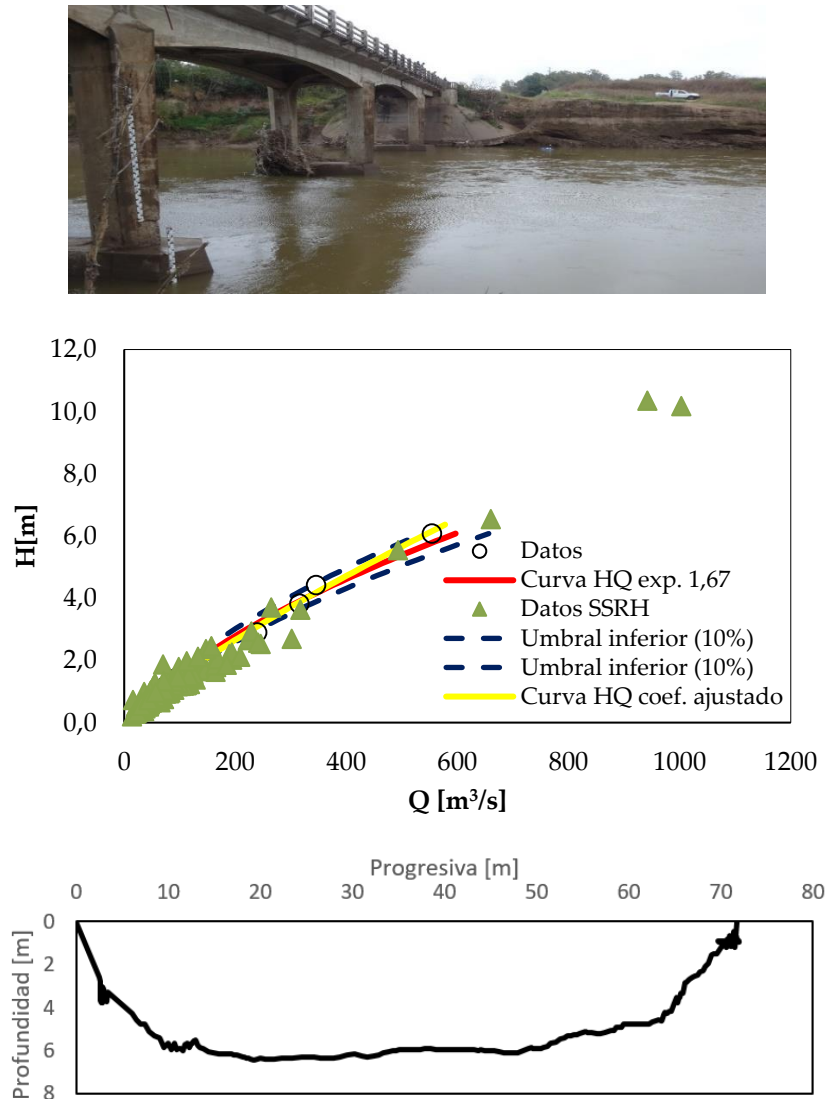
$$Q = 1,63.(H-H_{Q0})^{2,75}$$

con H expresado en [m] y Q en [m³/s].

#### Curva Altura-Caudal de Pueblo Andino

La sección del río Carcarañá ubicada en la localidad de Pueblo Andino, se encuentra ubicada en el puente de acceso a la localidad. La importancia de este sitio de medición es que esta sección es el cierre del sistema del río Carcarañá y en la misma la Subsecretaria de Recursos Hídricos de la Nación (SSRH) realiza mediciones periódicas durante más de 30 años. En la Figura 49 se muestra la curva altura-caudal ajustada junto a los valores medidos por el CETA-UNC y los reportados por la SSRH. Cabe destacarse

que se ha aforado el cuarto valor más alto de la serie histórica. La ecuación se ajusta solo hasta caudales escurridos del orden de 550 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 49.:** Curva altura-caudal Pueblo Andino.

La ecuación ajustada en esta sección presenta un valor  $H_{Q0}$  de -0,77m y un  $r^2$  de 0,99.

Ec. 25

$$Q=24,2(H-H_{Q0})^{1,67}$$

con H expresado en [m] y Q en [m<sup>3</sup>/s].

De la misma manera se realizó el ajuste de la Ec. 5 pero esta vez se ajusto también el valor del exponente. La ecuacion obtenida posee un  $H_{Q0}$  de -0,13 m y  $r^2$  de 0,99.

Ec. 26

$$Q = 55,14.(H-H_{Q0})^{1,25}$$

con H expresado en [m] y Q en [m<sup>3</sup>/s].

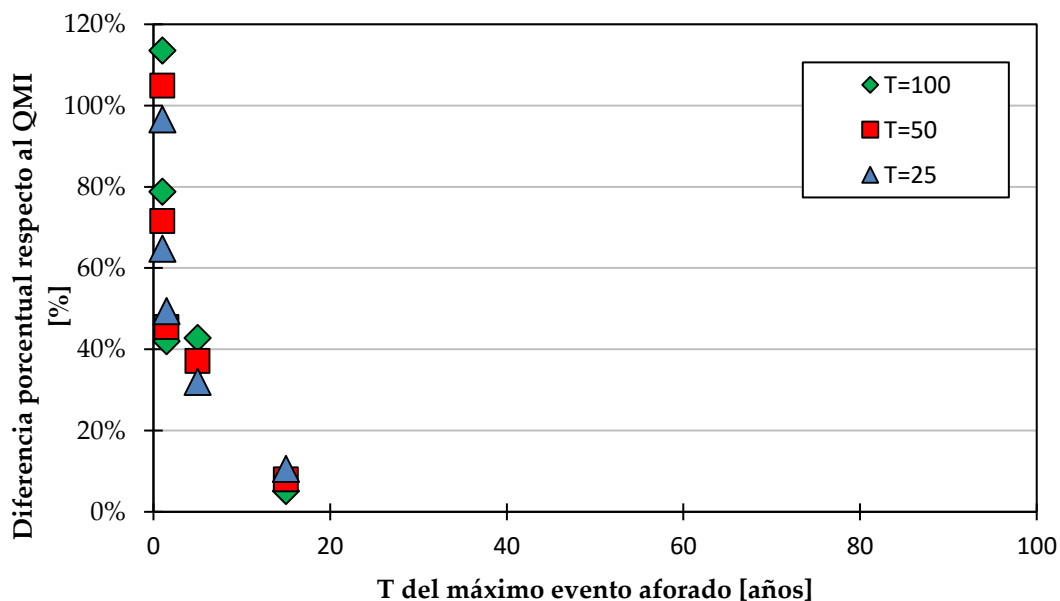
### **3.3. Importancia de medir valores altos de caudal para la construcción de curvas Altura – Caudal**

Cuando se selecciona una sección de río para realizar una curva altura caudal (H-Q), debe tenerse en cuenta que la sección sea constante, no se erosione o sedimente y no esté afectada por efecto de remanso. Una vez seleccionada la sección, se realizan aforos en la misma para relacionarlos con un valor de nivel de superficie libre, de ese modo al cabo de varias mediciones para diferentes condiciones, se puede realizar un ajuste de curva altura-caudal con la Ec. 5, lo que permite estimar el caudal a través del registro de una variable más sencilla como lo es el nivel de superficie libre. El problema está en que en general estos aforos suelen realizarse en condiciones de caudales bajos donde se garantiza seguridad a los operarios que realizan esta tarea (teniendo en cuenta que gran parte se realizan por vadeo). Esto genera que, ante situaciones de crecida, los caudales se obtengan extrapolando la curva altura caudal a niveles más altos a la que fue ajustada, pueden presentar diferencias importantes con respecto al caudal real.

En primer lugar, se realizó un estudio con los registros de la estación Pueblo Andino del río Carcarañá en donde se estima la incertidumbre debida a la extrapolación de curvas HQ y relacionar dicha incertidumbre con la recurrencia del máximo caudal aforado en un determinado curso fluvial. Para ello, se desarrolló un programa de interfaz amigable, fácil aplicación y sencilla visualización y análisis de resultados, para la realización de análisis de frecuencia de máximos de series hidrológicas (denominado FACETA); el cual permite relacionar una serie de máximos de una variable hidrológica dada (por ejemplo, caudales medios diarios, días lluviosos al año, etc.) con diferentes recurrencias. El tesista participo activamente en este desarrollo y es uno de los coautores de este código.

Para la serie de aforos de Pueblo Andino, se efectuaron distintos ajustes para poder analizar la incertidumbre relacionada a la extrapolación de las curvas H-Q: además del ajuste de la serie completa de aforos, también se ajustaron curvas a partir de series truncas para diferentes umbrales de superficie libre de nivel predefinidos. Para ello, se realizó el ajuste de curvas HQ para recurrencias de nivel de superficie libre menores a 15 (correspondiente al nivel de 10 m que es el máximo medido), 5, 1,5 y 1,01 años. Luego mediante el uso de las curvas HQ ajustadas para los niveles umbrales de 10, 8, 6 y 4 m respectivamente (cada uno con recurrencias asociadas de 15, 5, 1,5 y 1,01 años) se

obtuvieron los caudales correspondientes para toda la serie de niveles medidos y se efectuó un nuevo análisis de frecuencia a cada nueva serie de caudal obtenida. De esta manera se obtuvieron cuatro nuevas series de caudal asociadas a un tiempo de retorno. Posteriormente se determinaron los caudales asociados a un período de retorno de 100, 50 y 25 años obtenidos mediante la serie de caudales máximos instantáneos. Finalmente se compararon los caudales determinados para los tiempos de retorno de 100, 50 y 25 años obtenidos mediante la serie de caudales máximos instantáneos con los caudales asociados a los mismos tiempos de retorno obtenidos de las curvas H-Q. Para el caso de 100 años de tiempo de retorno las diferencias de caudales observadas son del orden 40, 45 y 80% para las curvas HQ ajustadas con datos menores a 5, 1,5 y 1,01 años de tiempo de retorno. En la Figura 50 se muestran los valores obtenidos para las recurrencias de caudales de 25 y 50 años. A partir de este análisis se concluye que, si se afora un evento de recurrencia de al menos 10 años, los caudales de diseño estimados con la curva H-Q presentan errores de entre 5 y 15% (Figura 50).



**Figura 50.:** Diferencia porcentual entre los caudales respecto al valor estimado para el mismo tiempo de retorno a partir de la serie de Caudales Máximos instantáneos (QMI) en relación al tiempo de retorno del máximo evento aforado en la H-Q.

En el caso de las curvas altura-caudal realizadas en esta tesis, como se ha demostrado en el apartado anterior, las mismas se efectuaron en condiciones extremas máximas utilizando datos de caudal en condiciones donde el caudal del río fue suficiente para alcanzar la capacidad del cauce. En este caso no se pudo realizar el mismo análisis

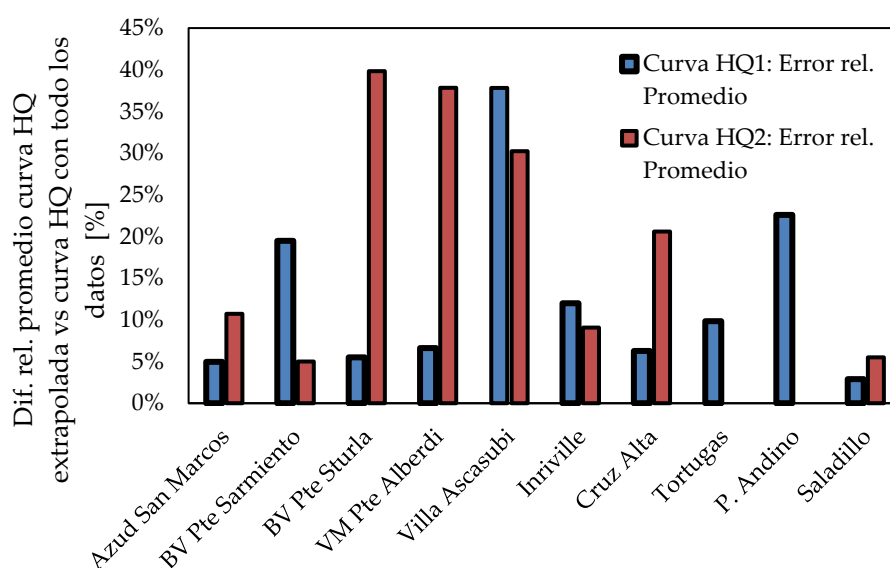
comparando con la recurrencia del evento máximo aforado realizado para la estación de Pueblo Andino, ya que la serie de datos registrada por el autor de esta tesis en distintas secciones tiene 5 años de longitud y los aforos son estacionales. Debido a ello, se optó por hacer un análisis de la incertidumbre en la estimación de caudales utilizando curvas altura caudal ajustadas con datos menores a un determinado nivel de superficie libre (el nivel umbral fue seleccionado en función de la cantidad de datos disponibles y los niveles aforados). Este análisis muestra cuales serían las incertidumbres esperadas sino se contarán con mediciones de campo durante eventos extremos. Esta incertidumbre se cuantifica comparando los valores obtenidos por extrapolación de estas curvas (curvas  $H_{Q1}$  y  $H_{Q2}$  de la Tabla 27) a condiciones extremas con los obtenidos por la curva altura caudal ajustada con todos los datos (es decir con las curvas determinadas en la sección 3.2.5 basadas en la ecuación de Manning). Puede observarse en la Tabla 27 y Figura 51 que, en todos los casos, con excepción de Bell Ville (Puente Sarmiento), Villa Ascasubi (aunque la diferencia sigue siendo importante) e Inriville, la diferencia relativa promedio entre el caudal obtenido utilizando la HQ ajustada con valores extremos (HQ ajustada con todos los datos) y la HQ ajustada hasta cierto nivel ( $H_{Q1}$  y  $H_{Q2}$ ) crece a medida que los caudales máximos aforados son más bajos. Se observa también que, en el caso de utilizarse solo caudales bajos para el ajuste (alrededor de  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  que en muchos casos podrá determinarse por vadeo sin ADCP) la diferencia relativa promedio puede ser de un 40% como es el caso de Bell Ville (Puente Sturla). En otras secciones no se pudo utilizar caudales más bajos para realizar el ajuste por falta de numero de datos para realizar el ajuste (Va. María, Inriville y Cruz Alta). En la sección de Villa Ascasubi se encuentran las máximas diferencias ya que la geometría de la sección es bastante irregular. Las secciones de Tortugas y P. Andino no contaban con suficientes datos para hacer un análisis más detallado.

**Tabla 27.:** Error relativo respecto a la HQ ajustada con todos los datos (incluyendo valores extremos) y la HQ ajustada utilizando datos hasta determinado nivel (Curvas  $H_{Q1}$  y  $H_{Q2}$ ).

Sección HQ	Curva ajustada con todos los datos		Curva $H_{Q1}$		
	Altura máx aforada [m]	$Q_{\max}$ (HQ) [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]	Alt. Max utilizada en el ajuste [m]	$Q_{\max}$ [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]	Dif. Rel. Promedio con HQ ajustada con todos los datos [%]
Azud San Marcos	1,4	113	0,7	34	5%

BV Pte Sarmiento	8,2	257	4	89	19%
BV Pte Sturla	9,9	250	4	58	6%
VM Pte Alberdi	3,4	340	1	114	7%
Villa Ascasubi	3,73	483	1,5	81	38%
Inrville	3,55	347	2	179	12%
Cruz Alta	7,9	949	2,5	157	6%
Tortugas	2,45	56	1,5	24	10%
P. Andino	6,08	554	1,5	96	23%
Saladillo	5,27	224	3	69	3%

Sección HQ	Curva HQ <sub>2</sub>		
	Alt. Max utilizada en el ajuste [m]	Q <sub>max</sub> [m <sup>3</sup> /s]	Dif. Rel. Promedio con HQ ajustada con todos los datos [%]
Azud San Marcos	0,5	24	11%
BV Pte Sarmiento	2	28	5%
BV Pte Sturla	3	25	40%
VM Pte Alberdi	0,6	50	38%
Villa Ascasubi	0,4	28	30%
Inrville	1	91	9%
Cruz Alta	1,5	87	21%
Tortugas	-	-	-
P. Andino	-	-	-
Saladillo	2	38	6%

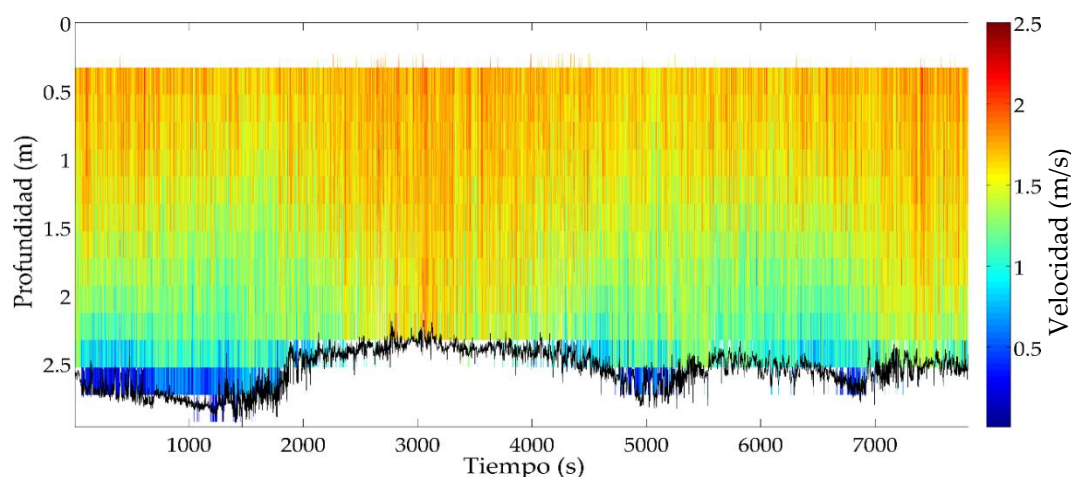


**Figura 51.:** Error relativo respecto a la HQ ajustada con todos los datos (incluyendo valores extremos) y la HQ ajustada utilizando datos hasta determinado nivel (Curvas HQ<sub>1</sub> y HQ<sub>2</sub>)..

### 3.4. Rugosidad inducida por la presencia de formas de fondo

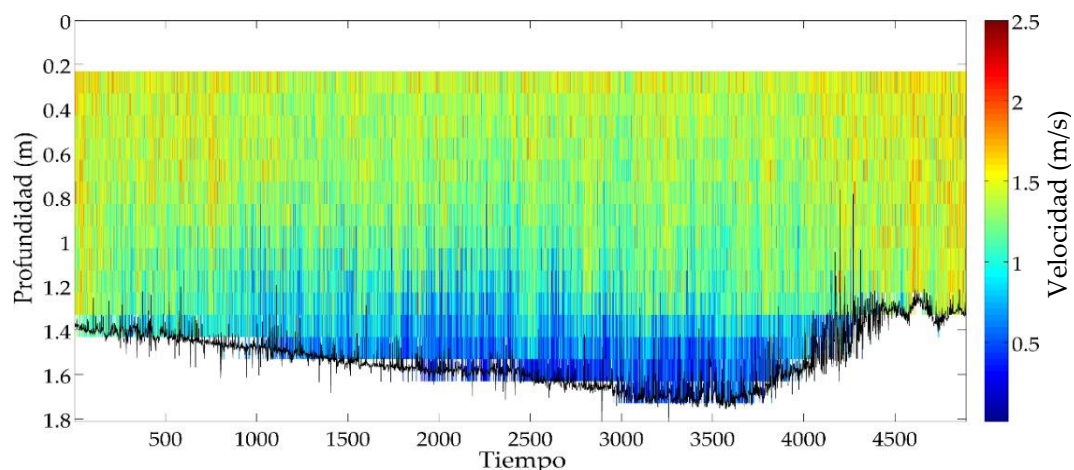
#### 3.4.1. Introducción

En el apartado 3.2.4 se determinó la capacidad del cauce en diferentes secciones del sistema fluvial de estudio. Esta capacidad del cauce cuantificada experimentalmente es menor a la predicha por las modelaciones realizadas para definir líneas de ribera (Expedientes del APRHI N° 0416-03723-1994, 0416-038787-2004, ,0416-042324-2005, 0416-057516-2009, 0416-060854-2010), La hipótesis expresada aquí es que esta diferencia puede ser explicada en parte por la presencia de formas de fondo, proceso que no fue contemplado en los estudios previos. Se plantea, entonces, como hipótesis que las formas de fondo generan un arrastre extra que produce una reducción de la capacidad de escurrimiento del cauce. Es por ello que en este capítulo se cuantificará el arrastre generado por formas de fondo. En las Figuras 52, 53, 54 y 55 se muestran las formas de fondo medidas en río Ctlamochita en la localidad de Villa María para diferentes condiciones de flujo, mientras que en la Tabla 28 se muestran las condiciones de flujo y las características de las dunas medidas. La metodología para medir las dunas consistió en dejar estacionario el ADCP en un punto el tiempo suficiente para que pase una duna completa (aproximadamente entre 3 y 4 horas). Así se pudo caracterizar el campo de velocidades en cada sector de la duna y como varia el mismo a lo largo de la misma.

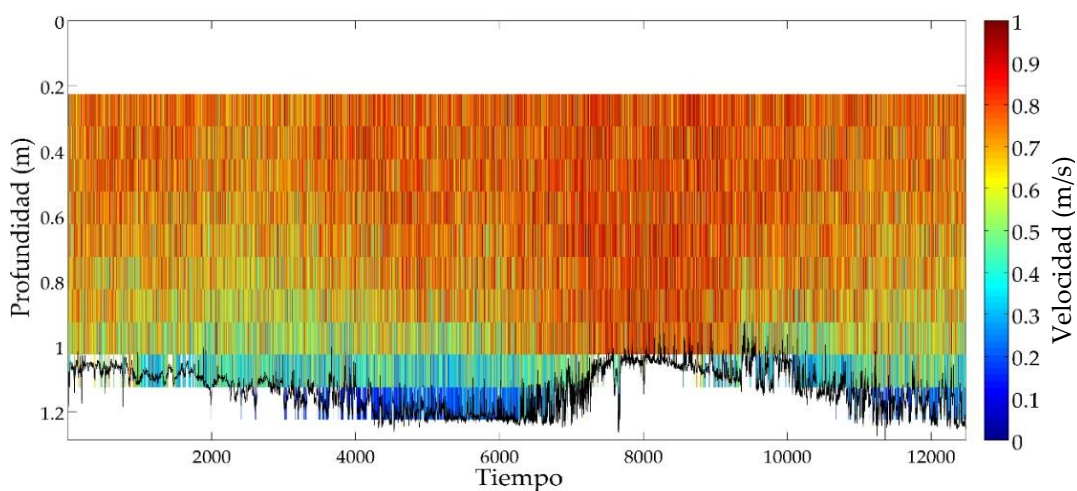


**Figura 52.:** Campo de velocidades para la condición N°1 Q: 113 m<sup>3</sup>/s. Velocidades en m/s

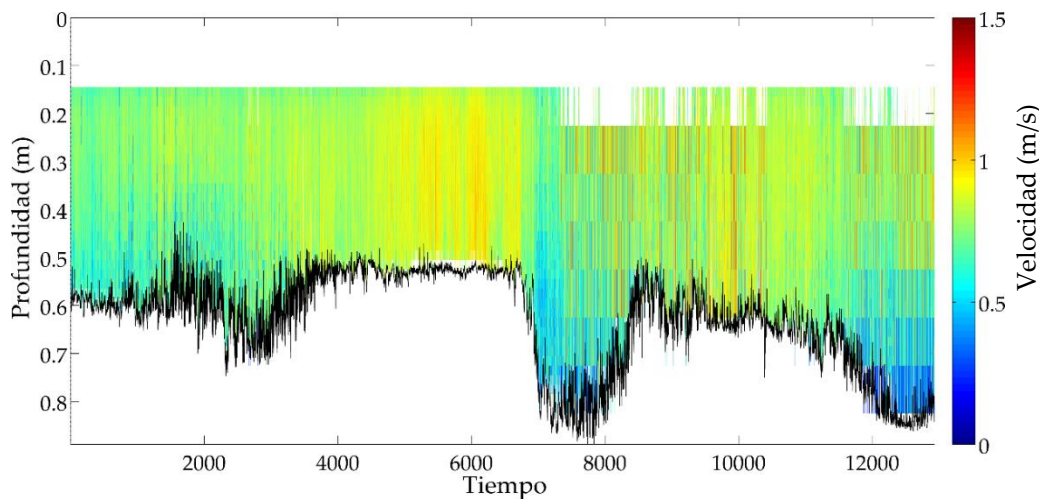




**Figura 53.:** Campo de velocidades para la condición N°2 Q: 65 m<sup>3</sup>/s. Velocidades en m/s



**Figura 54.:** Campo de velocidades para la condición N°3 Q: 25 m<sup>3</sup>/s (modulo del río). Velocidades en m/s



**Figura 55.:** Campo de velocidades para la condición N°4 Q: 18 m<sup>3</sup>/s. Velocidades en m/s



**Tabla 28.:** Condiciones analizadas en el río Tercero (Ctalamochita)

Condición	Caudal [m³/s]	Vel. Media [m/s]	Prof. Media [m]	$\Delta$ [m]	$\lambda$ [m]
1	113,85	1,23	1,97	0,40	4,49
2	65,84	1,15	1,43	0,48	5,63
3	24,90	0,80	0,80	0,16	1,85
4	18,89	0,73	0,74	0,24	2,07

### 3.4.2. Expresiones para el cálculo de la rugosidad equivalente

A continuación, con la caracterización experimental realizada, se evalúa la hipótesis planteada sobre que las formas de fondo observadas generan un arrastre que se puede explicar como una rugosidad equivalente. Van Rijn (1982) propone un método para calcular la rugosidad equivalente de las formas de fondo. En su trabajo se asume que la rugosidad hidráulica del lecho está compuesta por la rugosidad de grano  $k_s$  grano y la rugosidad de forma  $k_s$  forma (producida por el arrastre de las formas de fondo). La rugosidad del grano se determina a partir de la siguiente ecuación:

Ec. 27

$$k_{s \text{ grano}} = 3 D_{90}$$

Donde,  $k_s$  grano: rugosidad hidráulica del grano y  $D_{90}$ : tamaño del sedimento para el cual el 90% del material del lecho es más fino. Esta rugosidad del grano como se verá más adelante es despreciable frente al efecto de arrastre que generan las dunas.

Para el arrastre generado por la forma de fondo, basado en datos de laboratorio, Van Rijn (1982) determinó una expresión del  $k_s$  forma (rugosidad equivalente por el arrastre generado de la forma) en función de  $\psi$ .

Ec. 28

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

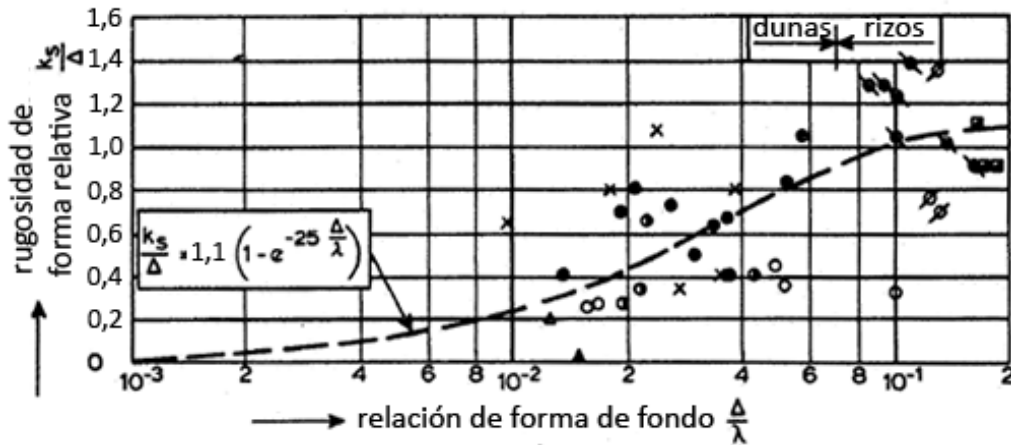
Donde,  $k_s$  forma: rugosidad equivalente generada por el arrastre de forma,  $\psi = \Delta/\lambda$  donde  $\Delta$ : altura de la forma de fondo y  $\lambda$ : longitud de forma de fondo

La Ec. 28. proviene de un ajuste de los datos obtenidos en los experimentos, ya que no hay justificación de la expresión en artículo de Van Rijn (1982) donde se presenta la misma. La resolución obtenida con la Ec. 28 así como las mediciones de laboratorio de

Van Rijn (1982) se muestran en la Figura 56. Teniendo en cuenta tanto la rugosidad de grano como la de piel, propuso el cálculo de una rugosidad efectiva  $k_s$  de un fondo móvil con formas de fondo mediante la ecuación que detallada a continuación:

Ec. 29

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



**Figura 56.:** Ecuación de rugosidad equivalente generada por arrastre de dunas reportada Van Rijn (1982).

A continuación, se propone otra metodología para obtener la rugosidad equivalente generada por el arrastre de las formas de fondo. El desarrollo analítico parte de la ecuación para determinar la fuerza de arrastre (Streeter et al, 1988).

Ec. 30

$$F = \rho \frac{C_d}{2} \Delta \cdot b \cdot u_{p(\Delta)}^2$$

Donde  $\rho$  es la densidad del agua,  $C_d$  el coeficiente de arrastre,  $\Delta$  es la altura de duna,  $b$  es el ancho de duna y  $u_{p(\Delta)}$  es la velocidad característica que genera el arrastre que se supone proporcional a la velocidad en la cresta. En esta tesis, se adoptará ad hoc este factor de proporcionalidad igual a 1.

De la hidráulica fluvial, García (2008) reporta que la velocidad de corte ( $u_*$ ) es igual a:

Ec. 31

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$$

Donde  $u_*$  es la velocidad de corte,  $\tau$  es el esfuerzo cortante sobre la duna. Ahora si se reemplaza  $\tau$  por la expresión de fuerza de arrastre por unidad de área,  $F/b\lambda$  la Ec. 31 queda:

Ec. 32

$$u_*^2 = \frac{F}{\rho b \lambda} = \frac{c_d \Delta}{2 \lambda} u_{p(\Delta)}^2$$

El perfil logarítmico de velocidad puede ser aproximada, para el caso completamente rugoso, por una ecuación potencial. Dicha ecuación potencial se conoce como la ecuación de Manning Strickler.

Ec. 33

$$\frac{u_{p(z)}}{u_*} = C_1 \left( \frac{z}{k_{sforma}} \right)^{1/6}$$

Donde  $u_{p(z)}$  es la velocidad a una distancia  $z$  desde el cero del sistema de referencia,  $C_1$  es una constante, según Manning-Strickler dicha constante vale 9,34 y  $k_s$  es la rugosidad de Nikuradse.

Si se define  $d$  como distancia arbitraria desde el fondo del cauce hasta el eje de referencia, entonces  $z$  para la cresta de la duna es igual  $\Delta - d$ . Donde  $\Delta$  es la distancia medida desde el fondo de la duna. Reemplazando este valor en la Ec. 33 se obtiene:

Ec. 34

$$\frac{u_{p(\Delta-d)}}{u_*} = C_1 \left( \frac{\Delta - d}{k_{sforma}} \right)^{1/6}$$

Es importante aclarar que los valores por debajo de “ $d$ ” se descartan.

Ahora reemplazando la Ec. 34 en la Ec. 32 queda:

Ec. 35

$$\frac{c_d \Delta}{2 \lambda} C_1^2 \left( \frac{\Delta - d}{k_{sforma}} \right)^{1/3} u_*^2 = u_*^2$$

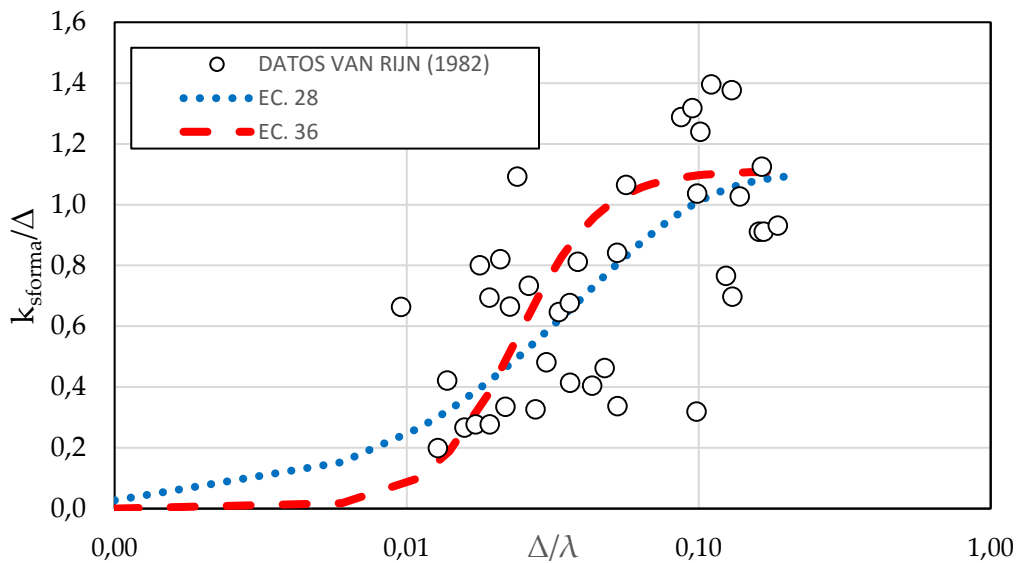
Despejando  $k_{sforma}/\Delta$  de la Ec. 35 se obtiene:

Ec. 36

$$\frac{k_{sforma}}{\Delta} = \frac{1}{\frac{d}{k_{sforma}} + \frac{1}{\left( \frac{c_d \Delta}{2 \lambda} C_1^2 \right)^3}}$$

El valor de  $d/k_{s\text{forma}}$  se asume constante e igual a 0,9;  $C_1$  es 9,34 acorde a Manning-Strickler (García, 2006) y  $C_d$  es 1 según Morris (1963).

Analizando la Ec. 36 se observa que cuando  $\Delta/\lambda \rightarrow \infty$ ,  $k_s/\Delta$  tiende a  $k_s/d$  con un valor que tiende asintóticamente a 1,1. Ahora cuando  $\Delta/\lambda \rightarrow 0$   $k_s/\Delta$  tiende a  $\left(\frac{c_d \Delta}{2 \lambda} C_1^2\right)^3$ . Dicho término también tiende a cero como una parábola cúbica visto que  $\Delta/\lambda$  tiende a cero. En la Figura 57 se grafican los valores experimentales reportados por Van Rijn (1982) junto a las Ec. 28 y Ec. 36.



**Figura 57.:** Ecuaciones de rugosidad equivalente generada por arrastre de dunas. En línea de puntos la Ec. 18 (Van Rijn, 1982) y con línea de guiones la ecuación presentada en esta tesis (Ec. 26).

Finalmente, para obtener el coeficiente de Manning (sobre los valores de  $k_s$  estimados) muy utilizado en ingeniería para caracterizar la resistencia del cauce se aplicó la relación comúnmente llamada de Manning Strickler (Brownlie, 1983).

Ec. 37

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

### 3.4.3. Método de cálculo de la rugosidad equivalente utilizando perfiles de velocidad

A través de las mediciones estacionarias realizadas con ADCP se obtuvieron perfiles de velocidad a lo largo de toda la duna. Si se promedian de todos los perfiles velocidad medidos, se obtiene el perfil promedio de toda la medición estacionaria. Es importante

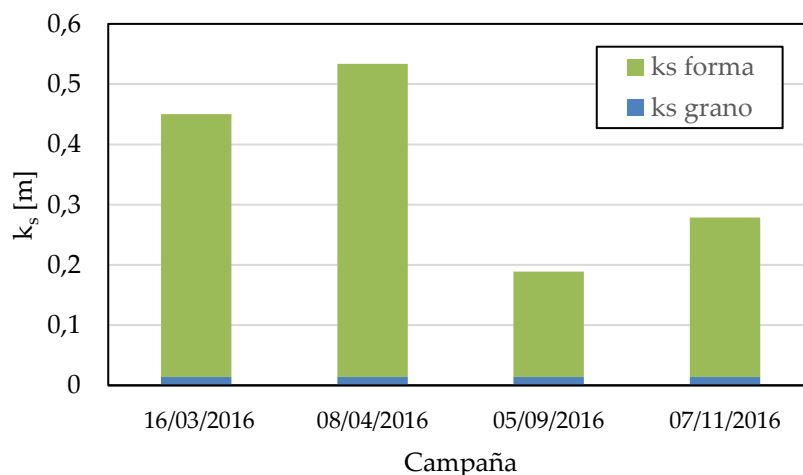
resaltar que dicha promediación se realiza sobre todas las celdas ubicadas a la misma profundidad. Una vez obtenido el perfil promedio se ajusta un perfil potencial dado por la Ec. 24 considerando un valor de  $d/k_{s\text{forma}}$  igual a 0,9. A partir del ajuste se obtiene por iteración el valor de  $d$ , la velocidad de corte ( $u_*$ ) y  $k_s$ . Se dice que el proceso es iterativo ya que se realiza el ajuste por primera vez, se obtiene un valor de  $d$  se descartan los valores por debajo del mismo y se vuelve a realizar el ajuste hasta converger en los valores de  $d$ ,  $k_s$ , y  $u_*$ . Finalizado este proceso, a través del valor de  $k_s$  se puede obtener el valor de  $n$  de Manning necesario para realizar las modelaciones hidráulicas.

#### 3.4.4. Resultados de la rugosidad equivalente obtenidos con la Ec. 36 y Ec. 28

Aplicando la Ec. 36 se obtiene las rugosidades equivalentes generadas únicamente por forma de fondo para cada una de las condiciones analizadas. Bajo estas condiciones se puede despreciar el  $k_s$  del grano ya que es muy pequeño frente al  $k_s$  equivalente generado por el arrastre de las dunas. A continuación, se ilustra esta afirmación. Sabiendo que  $D_{90}$  del río Ctalamochita es 4,55mm (Heredia, 2018),  $k_s$  del grano es 0,014 m, puede verse que dicho valor es despreciable frente a los valores de  $k_s$  de forma obtenidos para el mismo río bajo diferentes condiciones de flujo (Tabla 29 y Figura 58). Díaz Lozada et al. (2015) obtuvo un valor de coeficiente de rugosidad de Manning de 0,025 para una condición de flujo de 9 m<sup>3</sup>/s despejando dicho valor de la ecuación de Manning utilizando una pendiente media de superficie libre igual a la pendiente del cauce utilizando datos SRTM. Incluyendo la rugosidad provocada por las formas de fondo,  $n$  alcanza un valor promedio de 0,033, es decir se incrementa en un 40%. Además, se puede ver que los valores del  $n$  de Manning están dentro del rango para este tipo de río, entre 0,02 y 0,04, recomendados por la bibliografía (Chow, 1994).

**Tabla 29.:** Resultados del cálculo de la rugosidad equivalente con formas de fondo utilizando la Ec. 36.

Condición	Q	$k_{s\text{forma}}/\Delta$	$k_{s\text{ forma}}$	$n_{\text{forma}}$
	[m <sup>3</sup> /s]			
1	113,85	1,09	0,436	0,034
2	65,84	1,08	0,520	0,035
3	24,9	1,09	0,175	0,029
4	18,89	1,10	0,265	0,032



**Figura 58.:** ks generado por el arrastre de las formas de fondo vs ks generado por la rugosidad del grano.

Si se utiliza la Ec. 28 de van Rijn (1982) se obtienen los valores de ks reportados en la Tabla 30 (Heredia, 2018), los cuales no difieren notablemente de los obtenidos con la Ec. 36. La diferencia entre las dos ecuaciones radica en que la Ec. 36 se ha desarrollado con ecuaciones que modelan la física del problema, mientras que la ecuación de Van Rijn (1982) se obtiene por ajuste estadístico de los valores medidos”.

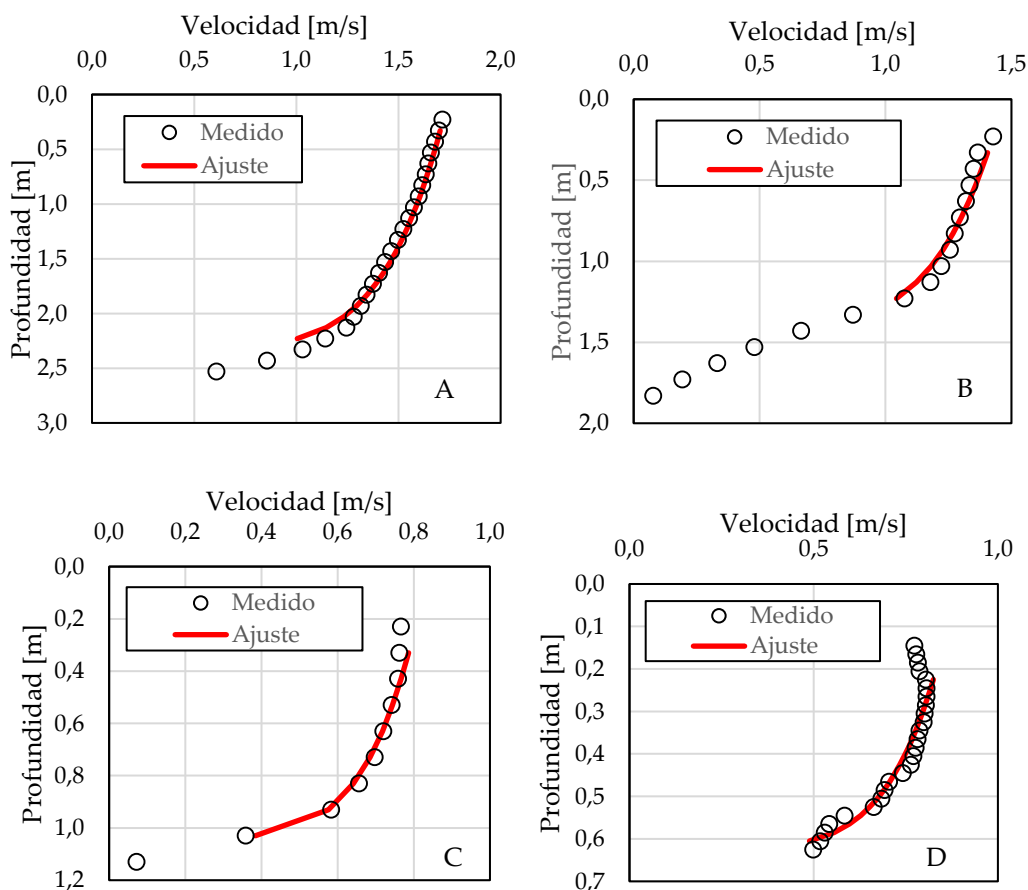
**Tabla 30.:** Resultados del cálculo de la rugosidad equivalente por formas de fondo utilizando la ecuación de Van Rijn (Ec. 28); Heredia, 2018

Condición	ks forma	nforma
1	0,394	0,034
2	0,462	0,035
3	0,157	0,029
4	0,252	0,031

Cabe desatacar que Ochoa (2018) utilizando los datos de campañas relevados en esta tesis, realizo una simulación numérica del transporte de sedimentos del tramo analizado en esta tesis con el modelo SSIIM. A través de la modelación realizada el autor obtuvo las características geométricas de las formas de fondo para otras condiciones hidrológicas medidas con ADCP, pero en las que no se caracterizó formas de fondo. Posteriormente aplico la ecuación Ec. 28 para la obtención de los valores de rugosidad del río generada por formas de fondo.

### 3.4.5. Resultado de la rugosidad equivalente mediante mediciones de perfiles de velocidad

A través de la promediación se obtuvieron los siguientes perfiles de velocidad (Figura 59). Es importante destacar que los valores de velocidad por debajo de “d” fueron descartados del ajuste. También se han descartado, en todas las condiciones, las celdas cercanas a la superficie, ya que las mismas presentan valores de velocidad perturbados debido a la intrusión del instrumento en el agua. Para las condiciones 1, 2 y 4, puede observarse que el perfil de velocidades medido sufre un quiebre producido por la presencia de la duna (Figura 59). En el perfil 3 no se ha observado este quiebre, probablemente debido a que el tamaño de las celdas (10 cm para esta condición) y el bajo tirante sumado al suavizado en los perfiles que produce el promediado no puede verse este efecto.



**Figura 59.:** Ajustes realizados para cada uno de los perfiles promedios obtenidos de las mediciones estacionarias. A: Condición 1; B: Condición 2; C: condición 3 D: Condición 4.

Realizado el ajuste de los perfiles se obtuvieron los valores de  $d$ ,  $u_*$ ,  $k_s$  y  $k_s/\Delta$ . Dichos valores se muestran en la Tabla 31. Es importante destacar que los valores de  $d$  obtenidos son proximos al valor de altura de duna. Ahora, se procede a determinar la relacion entre la velocidad media y la de corte, con el objeto de analizar si los valores de velocidad de corte obtenidos son razonables. De Manning se sabe que:

Ec. 38

$$U = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

Donde  $U$  es la velocidad media,  $R$  el radio hidraulico y  $S$  la pendiente de energia.

Y sabiendo que la velocidad de corte es (García, 2006):

Ec. 39

$$u^* = \sqrt{gRS}$$

Donde  $g$  es la aceleracion debida a la gravedad.

Si se divide miembro a miembro las Ec. 38 y Ec. 39, se obtiene que:

Ec. 40

$$\frac{U}{u^*} = \frac{R^{1/6}}{n \sqrt{g}}$$

Si se considera que el radio hidraulico ( $R$ ) es similar a la profundidad media ( $H$ ) la Ec. 40 se convierte en:

Ec. 41

$$\frac{U}{u^*} = \frac{H_{med}^{1/6}}{n \sqrt{g}}$$

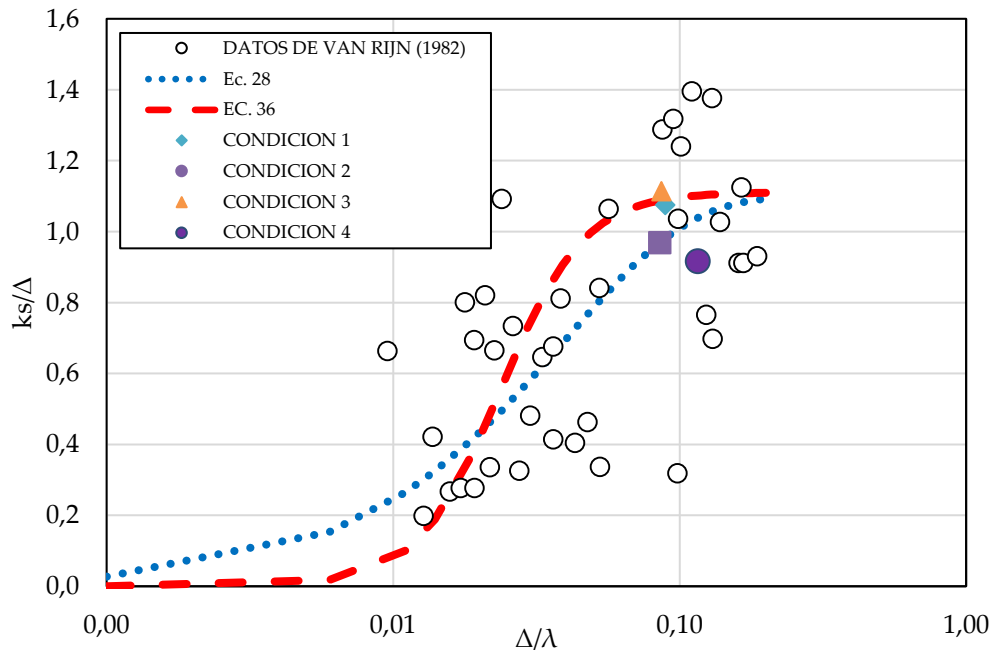
En la Tabla 31 se muestra que para todos los casos analizados, los valores de  $U/u_*$  determinados mediante la Ec. 41 del desarrollo teorico rondan alrededor 10 acorde a lo que indican los desarrollos teóricos.

**Tabla 31.:** Valores de  $d$ ,  $u_*$ ,  $k_s$  y  $n$  obtenidos del ajuste de perfiles potenciales de velocidad obtenidos de mediciones estacionarias realizadas con ADCP

Condición	$d$ [m]	$U/u_*$ obs.	$U/u_*$ Ec. 41	$k_s$ forma [m]	$k_{s\text{forma}}/\Delta$	$\Delta/\lambda$	$d/k_{s\text{forma}}$	$n_{\text{forma}}$
1	0,39	8,7	10,4	0,43	1,07	0,09	0,90	0,034
2	0,42	8,8	9,8	0,47	0,97	0,09	0,90	0,035
3	0,16	11,9	10,4	0,18	1,11	0,09	0,90	0,030
4	0,20	9,1	9,9	0,22	0,92	0,12	0,90	0,031



Si se grafican los valores de la Tabla 31, puede observarse que los valores  $k_s/\Delta$  vs  $\Delta/\lambda$  obtenidos concuerdan con otros valores reportados por Van Rijn (1982), y ajustan correctamente con la curva de la Ec. 36 (Figura 60). Además si se comparan los valores de  $k_s$  y  $n$  de Manning obtenidos por los 3 métodos (Tabla 29, 30 y 31), los mismos no difieren notablemente y arrojan resultados razonables. Los valores de  $k_{s\text{forma}}$  están en el orden de la altura de la duna.



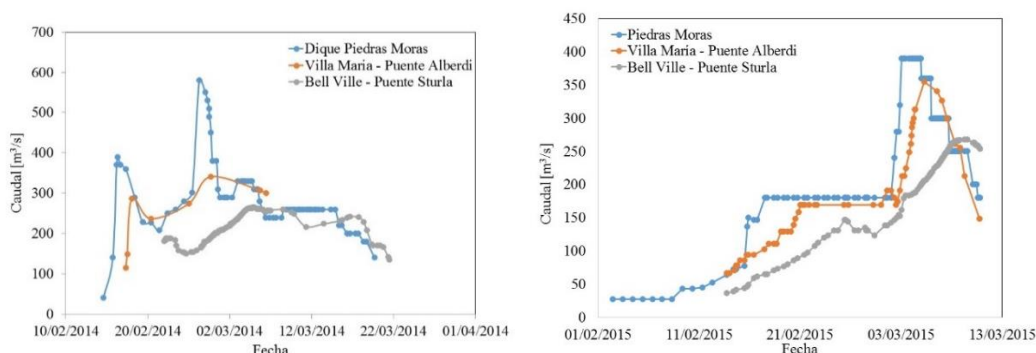
**Figura 60.:** Valores de  $k_{s\text{forma}}/\Delta$  vs  $\Delta/\lambda$  graficados junto a los valores de Van Rijn (1982)

### 3.5. Herramientas para la gestión del recurso hídrico en la cuenca de estudio

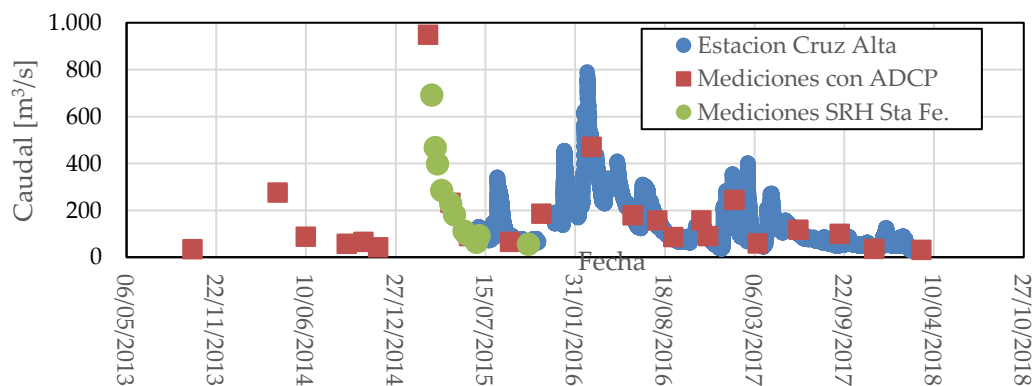
#### 3.5.1. Determinación de hidrogramas en diferentes secciones del sistema fluvial de estudio

Haciendo uso de las curvas altura de superficie libre caudal desarrolladas en esta tesis y mediante lecturas efectuadas por los bomberos de las distintas localidades en las diferentes secciones de medición, se obtuvieron los hidrogramas de crecidas de los eventos máximos de los años 2014 y 2015 (Figura 61). Puede observarse como en el año 2015 se realizó una operación de embalse en el dique Piedras Moras en el cual se mantuvo un caudal constante de  $180 \text{ m}^3/\text{s}$  por casi un mes, lo que permitió que el evento del año 2015 en el río Tercero tuviera menos efecto sobre la población. Actualmente se cuenta con 10 estaciones automáticas de nivel en las secciones de Saladillo (Río Saladillo), Azud San Marcos (Río Tercero), Cruz Alta (Río Carcarañá), Inrville (Río

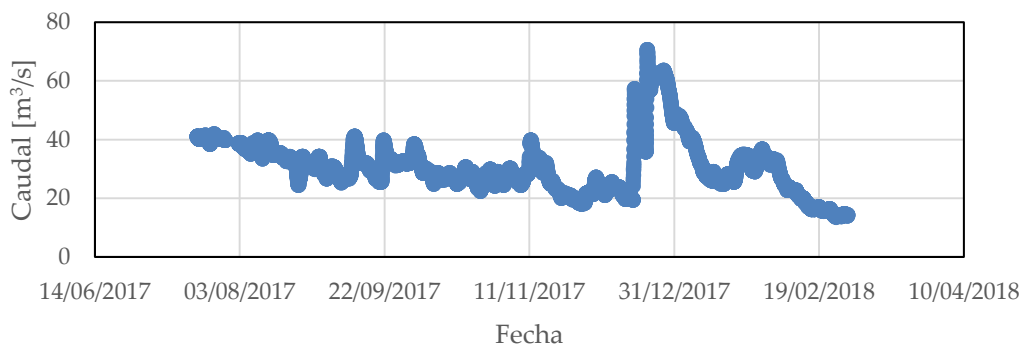
Carcarañá), Tortugas (Arroyo homónimo), Santa Rosa de Calamuchita (Río Santa Rosa), Villa Quillazo (Río Quillinzo), La Cruz (Río La Cruz), Las Albahacas (Río Piedra Blanca), y Alpa Corral (Río Barrancas) que registran continuamente el nivel de los ríos. En la Figura 62 se muestran el hidrograma de la sección de Cruz Alta generado con la curva Altura-Caudal junto a datos de mediciones de la Secretaría de Recursos Hídricos de Santa Fe y los datos medidos por el CETA – UNC. En la Figura 63 se muestra el hidrograma del río Saladillo en el puente de ruta 6 obtenido mediante la conversión de los datos de nivel en caudal.



**Figura 61.:** Hidrograma de crecida registrado en las secciones de Bell Ville (P. Sturla), Villa María y Piedras Moras durante los eventos de los años 2014 y 2015.



**Figura 62.:** Hidrograma de Cruz Alta determinado mediante la curva altura caudal. Se adjuntan también puntos medidos por la Secretaria de Recursos Hídricos de Santa Fe y CETA – UNC.



**Figura 63.:** Hidrograma del río Saladillo generada con la curva Altura-Caudal.

Campañas posteriores a junio de 2015 se observó que, en algunas secciones, como por ej. las ubicadas en Villa Ascasubi y Villa María, la geometría de la sección transversal sufrió modificaciones debido a los procesos erosivos y de sedimentación producidos por el río. Esto produjo que la ley altura-caudal presente discrepancia entre los resultados medidos y los estimados mediante su uso. Actualmente se está buscando nuevos sitios cercanos a los 2 sitios mencionados con secciones más estables para generar una nueva relación altura – caudal.

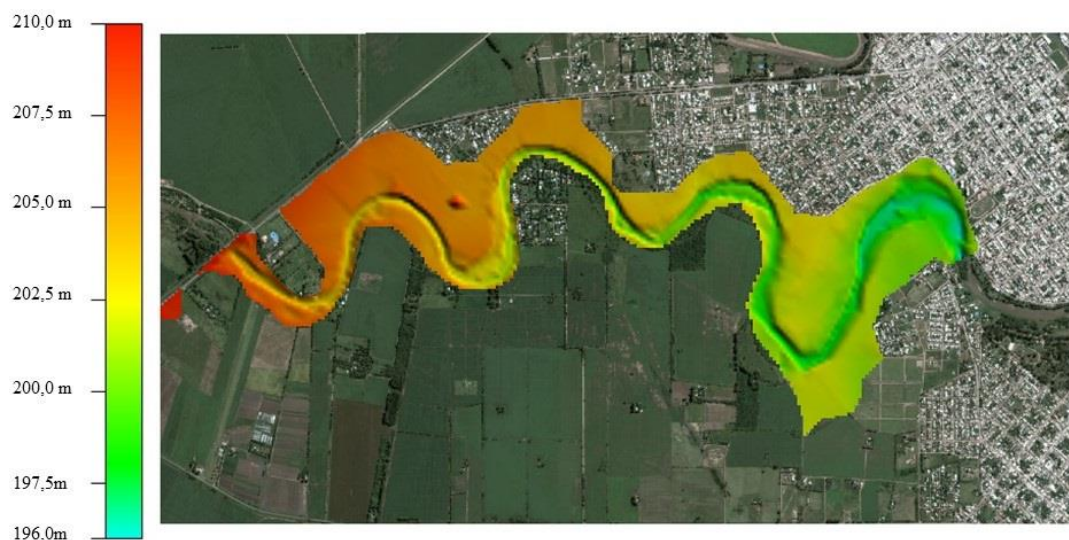
### **3.5.2. Modelación hidráulica de los tramos urbanos de las ciudades de Villa María y Bell Ville.**

Se desarrollaron dos modelos hidráulicos mediante el programa HEC-Ras desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (US. Army Corps. por sus siglas en ingles). El primer modelo corresponde al río Tercero en su tramo urbano por la ciudad de Villa María (modelo 2D) y el segundo modelo corresponde también al mismo río, pero en el tramo urbano de Bell Ville (modelo unidimensional). Para la construcción del modelo de Villa María se utilizó la rugosidad producida por formas de fondo obtenida en esta tesis y para el modelo de Bell Ville se utilizó la curva HQ del puente Sturla. Ambos modelos fueron calibrados mediante la información experimental relevada en esta tesis, visitas a campo y narraciones de los vecinos y autoridades. Para la ejecución del modelo hidráulico de Villa María, se realizó un relevamiento topográfico de aproximadamente ocho kilómetros de longitud en el cauce del río desde el azud de dicha localidad hasta el puente de la ruta nacional 158. Posteriormente se generó un modelo digital del terreno mediante el uso del programa de sistema de información geográfica (GIS, por sus siglas en inglés) ArcGis® (Figura 64). El modelo digital de terreno (MDT) creado fue exportado al software HEC-Ras a través de la utilización del programa HEC-GeoRas.

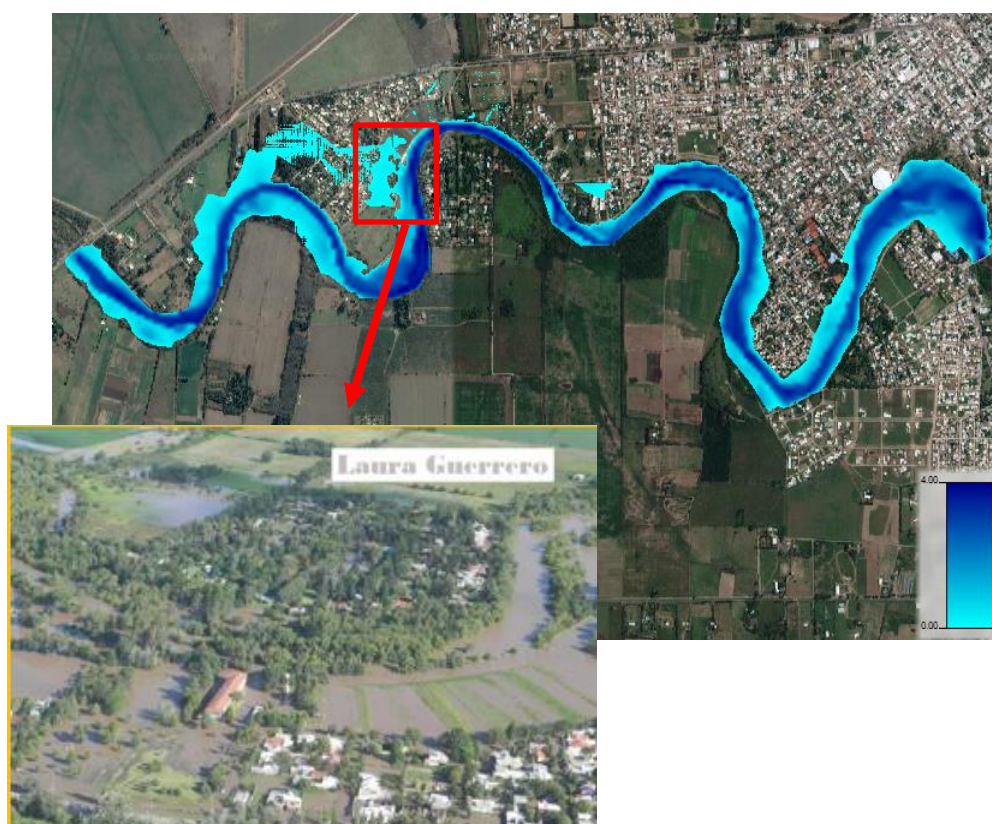
En lo que respecta al coeficiente de rugosidad utilizado para simular la resistencia al flujo del fondo, el mismo fue de 0,034 obtenido para la condición de 113,85 m<sup>3</sup>/s. Se selecciono este coeficiente dado que se simularon condiciones de aguas altas.

En las Figuras 65 y 66 se muestran los resultados de la modelación bidimensional del río Tercero en su tramo urbano por Villa María. En base a los valores de nivel y áreas

inundadas se estableció que el caudal que reproducía lo observado en campo era de 375 m<sup>3</sup>/s, dicho valor es cercano al valor aforado de 325 m<sup>3</sup>/s horas antes del arribo del pico a la localidad (el pico arribo la noche del 27/02/2014).

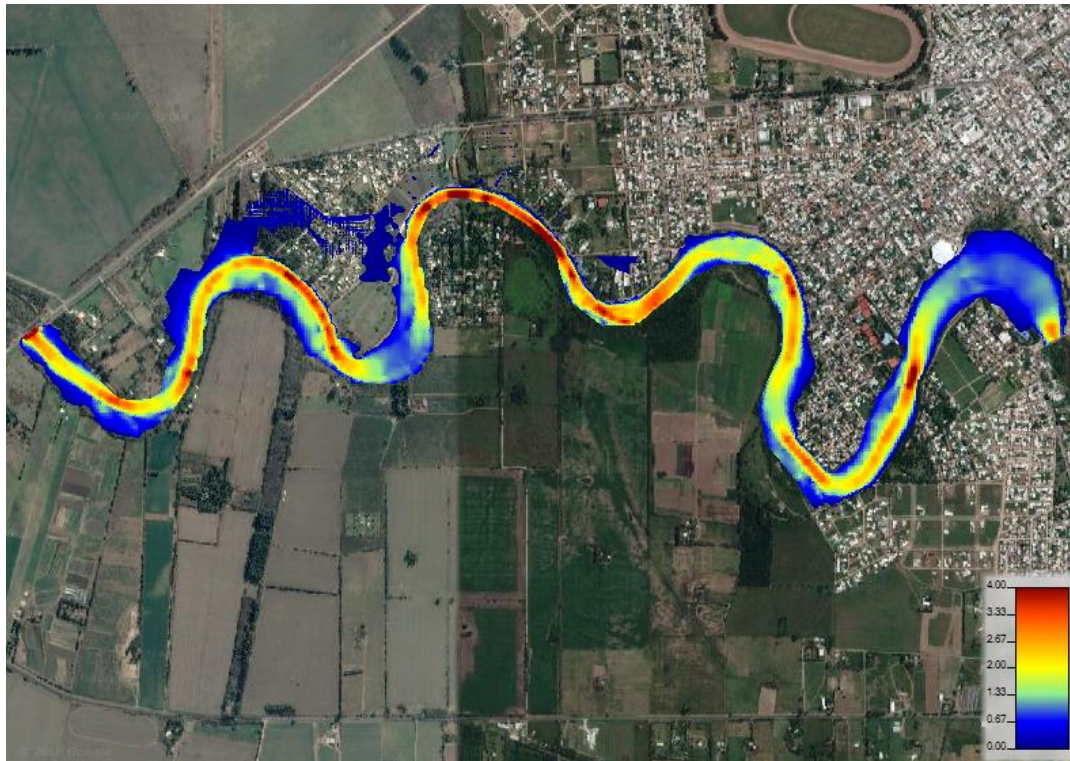


**Figura 64:** Modelo digital de elevación del terreno del tramo aguas arriba del azud de la Ciudad de Villa María hasta el puente de la ruta Nacional 158.



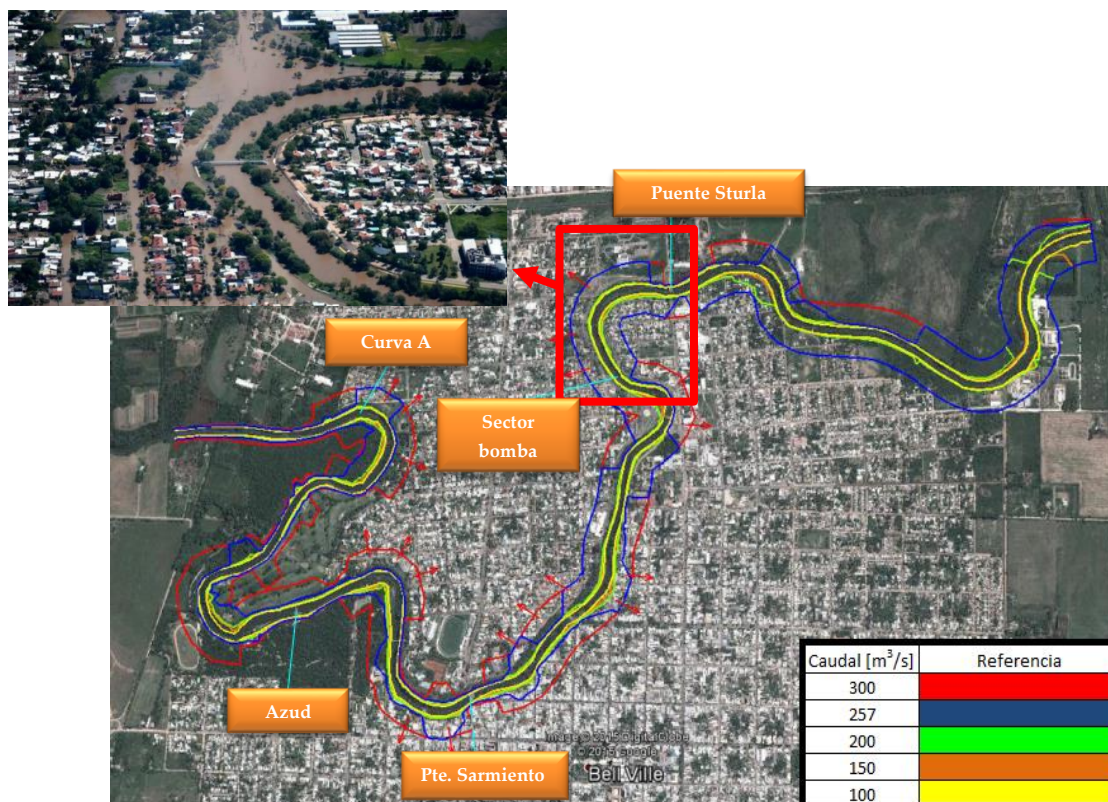
**Figura 65:** Campo de profundidades a lo largo del tramo Villa María para el caudal de 375 m<sup>3</sup>/s - HEC RAS 2D. En la figura también se muestra una imagen área del Barrio Vista Verde, seriamente afectada por la inundación de febrero de 2014.





**Figura 66:** Campo de velocidades a lo largo del tramo Villa María para el caudal de  $375 \text{ m}^3/\text{s}$  - HEC RAS 2D (Con escala de velocidades en  $\text{m/s}$ ).

Para el caso del modelo hidráulico de la localidad de Bell Ville, el Gobierno de la provincia de Córdoba proveyó un modelo HEC-Ras ya construido con secciones relevadas cada 50 metros, el cual fue corregido y mejorado para representar adecuadamente las condiciones que se observaron en campo. Entre dichas correcciones se incluyeron: (a) Colocación de pilas en los puentes, (b) modificación de la condición de borde (la misma consistió en determinar, para un caudal definido, el nivel de superficie libre que generaba en la sección donde se encontraba la curva altura-caudal, ubicada en el Puente Sturla, el nivel correspondiente al caudal definido) y (c) Definición del  $n$  de Manning, adoptándose un valor de 0,031 cercano al valor de 0,029 determinado por Herrero et al. (2014) en la confluencia de los ríos Tercero y Saladillo ubicado varios kilómetros aguas abajo. En la Figura 67 se muestran el mapa de inundación de la ciudad de Bell Ville para diferentes condiciones de caudal junto a una imagen de los sectores inundados durante el paso del pico de crecida en el mes de marzo de 2014 aproximadamente  $260 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Figura 67:** Área de inundación de la ciudad de Bell Ville, modelado con Hec-Ras 1D. Puede observarse una imagen durante el paso del pico por Bell Ville (marzo de 2014) que muestra una muy buena correspondencia del área inundada observada y la simulada.

---

**Capítulo IV**  
**CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DE FLUJOS**  
**COMPLEJOS EN EL SISTEMA FLUVIAL DEL RÍO**  
**CARCARAÑÁ PARA CUANTIFICAR LOS PROCESOS DE**  
**MEZCLA**

---

Contenidos de este capítulo han sido incluidos en las siguientes publicaciones en revistas científicas:

**Díaz Lozada, J. M., García, C. M., Herrero, H., Romagnoli, M., Cossavella, A. (2015).** Estimación del coeficiente de dispersión longitudinal en ríos de la región central de Argentina utilizando ADCP. Ribagua, 2(1), 26-37. Ed. Elsevier

**Herrero, H. S., Díaz Lozada, J. M., García, C. M., Szupiany, R. N., Best, J., Pagot, M. (2018).** The influence of tributary flow density differences on the hydrodynamic behavior of a confluent meander bend and implications for flow mixing. Geomorphology, 304, 99-112. Ed. Elsevier.

#### **4.1. Introducción**

En los últimos años se han estado desarrollando diversas metodologías para caracterizar y cuantificar los procesos de mezcla en diferentes cuerpos de agua. Esta línea de investigación se ve motivada por la creciente concientización y preocupación de la sociedad sobre la calidad de las aguas superficiales. Es por ello que actualmente, hay un cambio de paradigma en donde ya no solo importa la cantidad de agua si no también la calidad de la misma. En ese marco existen nichos de investigación importantes en el área.

En el presente capítulo se detallarán las contribuciones realizadas por esta tesis a la temática de calidad de agua. En un primer momento se mostrará la metodología desarrollada y los resultados obtenidos en la determinación del coeficiente de dispersión longitudinal en diferentes ríos de la cuenca de estudio. Este coeficiente es uno de los parámetros fundamentales al momento de realizar modelaciones numéricas de calidad de agua en el sistema fluvial y permite determinar la capacidad de dilución que tiene el río. Posteriormente se analizan y detallan los procesos de mezcla y la hidrodinámica de la confluencia fluvial en curva de los ríos Tercero (Ctalamochita) y Saladillo, en donde ambos ríos poseen diferencia de densidad. Las características hidrodinámicas de esta confluencia son poco común y por lo tanto poco reportada en la literatura científica.

#### **4.2. Determinación del Coeficiente de Dispersión Longitudinal con ADCP.**

##### **4.2.1. Introducción**

Al momento de realizar estudios de calidad de agua en ríos, los mismos suelen complementarse con modelaciones numéricas que requieren la definición de ciertos parámetros, de los cuales uno de los más importantes es el coeficiente de dispersión longitudinal ( $D$ ) (Rigo, 1992). La determinación de este coeficiente  $D$  mediante técnicas convencionales, como por ejemplo los ensayos de trazadores, requiere una gran inversión en planificación, personal y análisis posterior (Carr y Rehmann, 2007; Fischer et al.; 1979), y los resultados son únicamente válidos para ese sitio y para las condiciones de flujo presentes al momento de realizar la medición. Los ríos de la zona central de Argentina presentan una gran variabilidad estacional de caudales (valores máximos uno o dos órdenes de magnitud mayores que los valores medios), por lo que se hace muy costosa la determinación de este coeficiente mediante ensayo de trazadores, ya que se debería determinar experimentalmente  $D$  para un amplio rango de condiciones de flujo.



Así, los profesionales que se dedican a modelar calidad de agua en los ríos de esta zona utilizan fórmulas empíricas, ajustadas por diversos autores a valores estimados de mediciones de campo en otros lugares del mundo y laboratorio, que permiten determinar el coeficiente de dispersión longitudinal en base a los parámetros hidráulicos globales disponibles más frecuentemente (profundidad y velocidad media del flujo, ancho del río, etc.). Sin embargo, estas expresiones presentan gran variabilidad en sus resultados y sólo funcionan adecuadamente en ríos con características similares a los que fueron ajustadas.

En esta tesis se presenta una metodología alternativa que permite estimar el coeficiente de dispersión longitudinal (D) teniendo en cuenta las características particulares del flujo en distintas secciones del sistema fluvial de estudio, como la distribución transversal de las velocidades del flujo, la batimetría del cauce, etc. Para ello se utiliza la ecuación integral presentada por Fischer et al. (1979) para estimar el coeficiente de dispersión longitudinal la que requiere una caracterización hidrodinámica detallada.

Ec. 42

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

Dónde A es el área de la sección transversal,  $u'(y)$  es la diferencia entre la velocidad longitudinal media en la vertical  $u(y)$  en la progresiva transversal  $[u(y) = \int_0^{h(y)} u(y, z) dz]$ , y la velocidad media global en la sección, U [así  $u'(y) = u(y) - U$ ];  $h(y)$  profundidad en la progresiva y;  $\varepsilon_t(y)$  es el coeficiente de dispersión transversal en la progresiva y.

La Ec. 42 asume un flujo uniforme y unidimensional (Fischer et al.; 1979), considerando que el contaminante debe estar completamente mezclado en la dirección vertical y transversal (Carr y Rehmann, 2007). Debido a esta limitación, esta ecuación únicamente puede utilizarse en tramos de ríos donde no existan fuertes recirculaciones o corrientes secundarias. Además, esta ecuación asume que el mecanismo de dispersión por corte predomina sobre los demás mecanismos de mezcla (el gradiente de velocidad en la transversal debe ser grande para que la dispersión por corte predomine sobre los demás mecanismos) y que la dispersión por corte transversal es quien gobierna el proceso de mezcla y no la dispersión por corte vertical (Carr y Rehmann, 2007). Por lo

tanto, tan sólo puede ser aplicada a ríos donde el ancho (B) sea mucho mayor que la profundidad media ( $H_{med}$ ). Fischer et al. (1979) recomiendan una relación  $B/H_{med}$  mayor a 6. Con respecto a los resultados obtenidos por la Ec. 42, Seo y Baek (2004) afirman en sus estudios que la misma permite estimar el coeficiente de dispersión longitudinal con errores menores al 30% en condiciones de flujo uniforme y dentro de un factor de 4 en flujos no uniformes, mientras que Carr y Rehmann (2007) obtuvieron que el 85% de los valores calculados se encuentran dentro de un factor de 3 respecto al medido con ensayo de trazadores.

En la actualidad, el desarrollo de la tecnología acústica Doppler para efectuar aforos en sistemas fluviales (normalmente con profundidades mayores a 0,30 m) permite obtener la información requerida con gran detalle para aplicar la Ec. 42 en cada sección de un curso fluvial. La hipótesis propuesta en este capítulo es que la información registrada con ADCP en el sistema fluvial de estudio en las campañas de medición realizadas en el sistema fluvial de estudio pueden ser utilizadas para estimar el coeficiente D.

#### 4.2.2. Metodología

Para la determinación del coeficiente de dispersión longitudinal (D), se seleccionaron específicamente para este trabajo cuatro secciones de medición en los principales tributarios del sistema fluvial del río Carcarañá (Tabla 32), las cuales se monitorearon periódicamente (mínimo 4 veces al año). Estas secciones se encuentran en tramos de río suficientemente rectos para evitar la presencia de corrientes secundarias y además cumplen con la condición de aguas poco profundas (relación ancho (B)/profundidad media ( $H_{med}$ ) del río  $B/H_{med} > 6$ ) ambas condiciones requeridas para aplicar la Ec. 42. Además, en esas secciones no existen interferencias significativas en el flujo producidas por obstáculos como pilas y estribos de puente, etc.

**Tabla 32.:** Secciones transversales de medición seleccionadas para este estudio.

Sección N.º	Curso fluvial	Localización
1	Río Tercero	Puente Sarmiento – Bell Ville (32°37'42,78"S, 62°41'38,48"O)
2	Río Saladillo	Puente Ruta 6 – Saladillo (32°55'54,43"S, 62°19'55,28"O)

Sección N.º	Curso fluvial	Localización
3	Río Carcarañá	Puente Ruta 12 – Inrville (32°55'51,86"S, 62°10'3,79"O)
4	Arroyo Tortugas	Puente Ruta 9 (32°44'46,86"S, 61°49'47,46"O)

En cada una de las secciones transversales de medición seleccionadas se realizaron caracterizaciones hidrodinámicas detalladas con un Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP). Las mediciones se efectuaron desde una plataforma móvil utilizando un ADCP YSI/SonTek Riversurveyor S5 cuyas características técnicas se detallan en la sección 1.4.

A partir de la información obtenida de las mediciones con ADCP en las diferentes secciones (utilizando la metodología detallada en la Tabla 17) se utilizó el programa Velocity Mapping Toolbox (VMT) desarrollado por el USGS (Parson et al, 2013) para promediar los campos de flujos medidos en las distintas transectas, para las mismas condiciones experimentales, con el fin de determinar el campo de flujo medio de la sección. Posteriormente, se aproximó la distribución transversal de velocidades de flujo medio en la vertical en la dirección principal del flujo y profundidades mediante funciones continuas. Esta aproximación se realiza porque: (a) las fluctuaciones generadas por la turbulencia del flujo y el ruido presente generan que los perfiles de velocidades no sean suaves (Shen et al.; 2010) y (b) los perfiles de velocidades medias en la vertical obtenidos con ADCP muchas veces presentan sectores en donde no se ha podido registrar datos, por ejemplo, en las zonas cercanas a las márgenes (Bogle, 1997). En un primer momento se adoptó la función teórica de distribución de velocidades medias en la vertical desarrollada por Seo y Baek (2004), que genera un perfil transversal de velocidades medias con una distribución equivalente a la función de densidad de probabilidad de la distribución Beta:

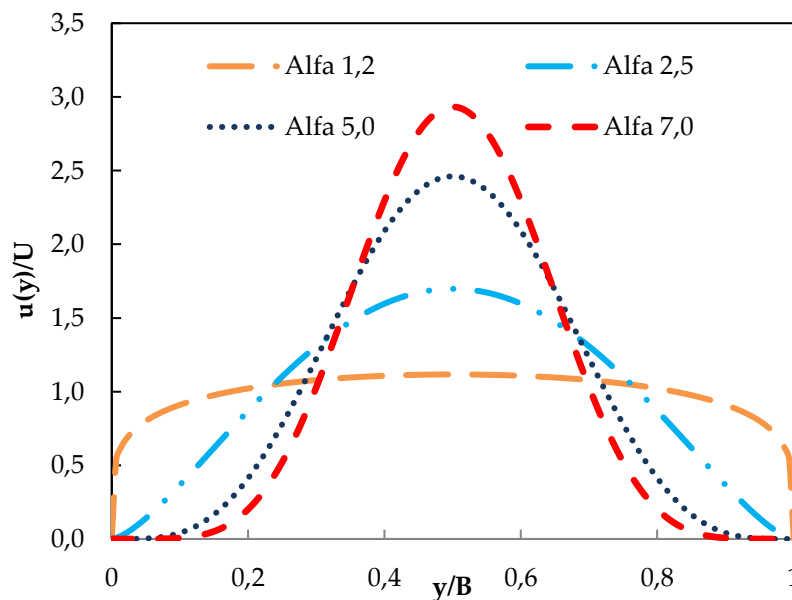
Ec. 43

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

Dónde  $u(y)$  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 función de distribución y  $\Gamma$  es la función 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  $\alpha = \beta = 1$ , el valor de la velocidad en la dirección transversal es constante, y a medida que  $\alpha$  y  $\beta$  crecen, el perfil de distribución de velocidades concentra los mayores valores de velocidad longitudinal en una zona cada vez más estrecha cuya ubicación dependerá de los valores  $\alpha$  y  $\beta$ . En el caso que  $\alpha = \beta$  las mayores velocidades se ubican en el centro del canal, disminuyendo hacia las márgenes (Figura 68). Para seleccionar el mejor ajuste en el perfil de la Ec. 43, se utilizaron criterios basados en el coeficiente de determinación  $r^2$  y el mínimo error cuadrático medio (ECM).



**Figura 68.:** Perfiles transversales de velocidades medias en la vertical obtenidos variando los valores de los coeficientes  $\alpha = \beta$  en la Ec. 34.

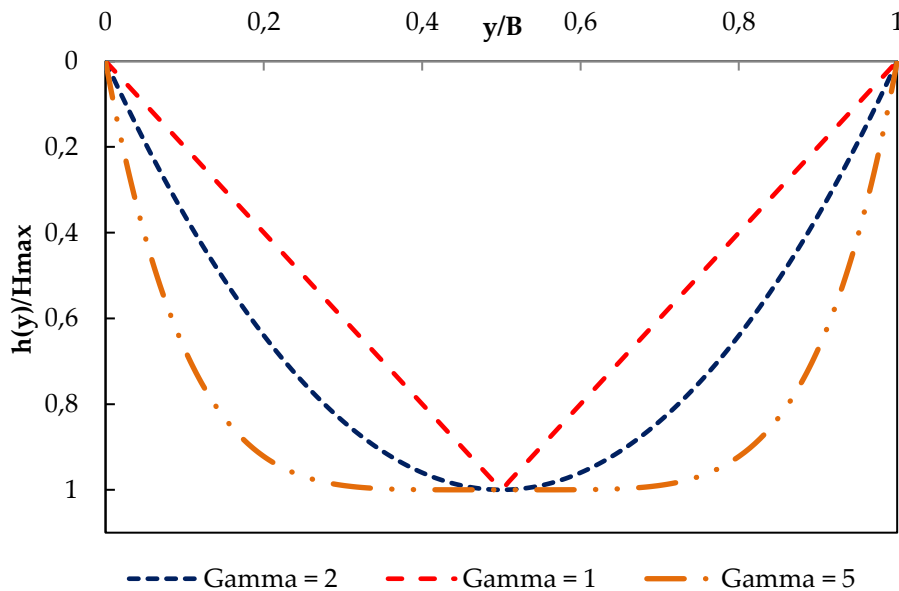
En los casos en que la distribución de velocidades no pudo ser aproximada eficientemente mediante la distribución mencionada (Ec. 43), se realizó una aproximación a través de una función polinómica, la cual permite un mejor ajuste de los datos ya que incrementa el número de coeficientes a ajustar, pero en contrapartida el método y los parámetros de ajuste pierden su generalidad.

La función utilizada en esta tesis para representar la distribución transversal de profundidades (batimetría de la sección transversal) fue la definida por Deng et al. (2001):

Ec. 44

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

Dónde  $h(y)$  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 parámetro gamma ( $\gamma$ ) se obtienen diferentes distribuciones de la profundidad para una sección transversal (Figura 69). 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. Para seleccionar el mejor ajuste, al igual que en el caso de las velocidades, se utilizaron criterios basados en el coeficiente de determinación  $r^2$  y el mínimo error cuadrático medio (ECM).



**Figura 69.:** Distribuciones transversales de profundidades obtenidas utilizando distintos valores del parámetro  $\gamma$  la Ec. 35.

Al igual que en el caso de la aproximación de velocidades, en aquellas secciones donde el ajuste del perfil del fondo mediante la distribución propuesta no era correcta, se utilizó una función polinómica la cual, como ya se mencionó, le quita generalidad al método.

Una vez aproximados los perfiles de velocidad y fondo se procedió a estimar el coeficiente de dispersión transversal ( $\epsilon_t(y)$ ) en cada progresiva mediante la ecuación

empírica desarrollada por Smeithlov (1990) y utilizada por Deng (2001), Carr y Rehmann (2007), Perucca (2009) y Shen (2010).

Ec. 45

$$\varepsilon_t(y) = \theta u_* h(y)$$

Donde

Ec. 46

$$\theta = \left[ 0,145 + \frac{1}{3520} \left( \frac{U}{u_*} \right) \left( \frac{B}{H_{med}} \right)^{1,38} \right]$$

Ec. 47

$$u_* = \frac{1}{B} \int_0^B u_*(y) dy$$

Ec. 48

$$H_{med} = \frac{1}{B} \int_0^B h(y) dy$$

Además,  $h(y)$  es la profundidad en la progresiva  $y$ ,  $u_*(y)$  es la velocidad de corte en la progresiva  $y$  y  $u_*$  es la velocidad de corte promedio de la sección, que puede ser estimada mediante la Ec. 39 u Ec. 47.

El valor  $\theta$  se encuentra, generalmente, entre 0,15 y 0,30 para tramos de ríos rectos, entre 0,30 y 0,90 para tramos con ligeras curvaturas y entre 1 y 3 para tramos en curvas (Rutherford, 1994). Si se poseen mediciones estacionarias de velocidad en diferentes puntos de la sección transversal podría obtenerse  $u_*(y)$  en dichos puntos mediante el ajuste de un perfil logarítmico (ec. 7.43 en Pope, 2000). Conociendo  $u_*(y)$  en diferentes puntos y aplicando la ecuación 6 puede obtenerse la velocidad de corte promedio en la sección. También, es importante aclarar que a través del conocimiento de la velocidad de corte en diferentes puntos  $u_*(y)$  se puede tener noción de la variación del coeficiente de dispersión transversal ( $\varepsilon_t(y)$ ) a lo largo de la sección, ya que el mismo es proporcional a la velocidad de corte. En este trabajo al no poseerse mediciones estacionarias de velocidad se calculó la velocidad corte media de la sección mediante la Ec. 30 reportada por García (2008):

$$u_* = \sqrt{gRS}$$

Dónde  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $R$  el radio hidráulico y  $S$  es la pendiente de la línea de energía. Finalmente se resuelve la Ec. 42 mediante algún método de integración numérica; en este trabajo se utilizó el método de los trapecios.

Los valores de coeficientes de dispersión longitudinal estimados con la ecuación integral de Fischer et al. (1979) (Ec. 42) utilizando información experimental proveniente de una caracterización hidrodinámica detallada realizada con ADCP se comparan, en primera instancia, con los valores de  $D$  obtenidos a través de las fórmulas empíricas ajustadas por diversos autores a valores estimados de mediciones de campo y laboratorio. Seo y Baek (2004) en su trabajo publican la forma general que poseen las ecuaciones empíricas disponibles en la actualidad para estimar el coeficiente de dispersión longitudinal, mientras que en la Tabla 33 se muestran los valores de los parámetros  $a$ ,  $b$  y  $c$  ajustados por los diferentes autores y los rangos de los parámetros utilizados para el ajuste.

Ec. 49

$$\frac{D}{H_{med} u_*} = a \left( \frac{U}{u_*} \right)^b \left( \frac{B}{H_{med}} \right)^c$$

Los datos requeridos para implementar estas ecuaciones son parámetros hidráulicos globales de cada una de las secciones transversales estudiadas. Tales parámetros son: (a) velocidad media global en la sección ( $U$ ); (b) profundidad media del flujo ( $H_{med}$ ); (c) ancho total ( $B$ ); (d) velocidad de corte media en la sección ( $u_*$ ).

**Tabla 33.:** Valores de los parámetros  $a$ ,  $b$  y  $c$  de la Ec. 49 calibrados por diferentes autores

Formula	a	b	c	Fuente de información	Rango de B/Hmed	Rango de Pendiente	Rango de Fr	Adecuado para
Fischer (1979)	0,011	2	2	Instalaciones de laboratorio y corrientes naturales (tabla 5.3 Fischer, 1979)		-	-	-
Liu (1977)	0,18	0,5	2	14 ríos	10-85	5,9E-06 -1,3E-03	0,03- 0,31	Ríos de baja pendiente, y profundos
Iwasa y Aya (1991)	2	0	1,5	62 instalaciones	1-200	-	-	Puede ser aplicada en ríos anchos

Lozada

				de laboratorio y 79 ríos				(B/H <sub>med</sub> < 200)
Seo y Cheong (1998)	5,92	1,43	0,62	26 ríos	16-157	1,0E-05 – 3,5E-03	0,04-0,42	Puede ser aplicada en ríos anchos (B/H <sub>med</sub> <157)
Koussis y Rodríguez-Mirasol (1998)	0,6	0	2	16 ríos	15-62	-	0,08-0,27	Ríos profundos
*Los datos de fuente de información, rango de B/H <sub>med</sub> , rango de pendiente y rango de Fr fueron tomados de la tesis doctoral de M.L.Carr (2007).								

Las ecuaciones empíricas permiten una estimación rápida del coeficiente de dispersión longitudinal dentro de un determinado orden de magnitud (Rutherford, 1994), pero deben usarse en ríos de similares características a las que fueron calibradas.

Las ecuaciones de Iwasa y Aya (1991) y Seo y Cheong (1998) contemplan en su ajuste relaciones B/H<sub>med</sub> altas, lo cual las hace aptas para estimar el coeficiente de dispersión en cauces fluviales anchos. Las ecuaciones de Liu (1977) y Koussis y Rodríguez Mirasol (1998) abarcan números de Froude bajos, lo cual indica que pueden ser aplicados en flujos profundos. Por último, la ecuación de Liu (1977) contempla en su calibración bajos valores de pendiente, lo cual indica que puede ser aplicada en flujos de baja pendiente como por ejemplo algunos ríos de llanura.

#### 4.2.3. Resultados

Las secciones relevadas en este estudio presentan relaciones de ancho-profundidad entre 8 y 39 (de acuerdo a lo recomendado por Fischer et al.; 1979). De un total 21 secciones de medición, sólo 3 presentan valores menores a 10, que corresponden a las secciones de Bell Ville y arroyo Tortugas cuando estos se encuentran escurriendo altos caudales en épocas de crecida, debido a que la sección transversal de dichos sitios es muy estrecha. Con respecto a las pendientes el rango medido se encuentra entre 3,50E-04 y 1,62E-04, que está dentro del rango contemplado por Liu (1977) y Seo y Cheong (1998). Finalmente, con respecto a los números de Froude, el rango de las mediciones varía entre 0,09 y 0,30, lo cual también se encuentra dentro del rango contemplado por Liu (1977) y Seo y Cheong (1998), mientras que se excede el límite superior de este parámetro en el caso de la fórmula de Koussis y Rodríguez Mirasol (1998).



Además, en este trabajo se comparan los resultados estimados con la Ec. 47 del coeficiente de dispersión con los valores reportados por Rutherford (1994), Deng (2001), Carr y Rehmann (2007) y Shen (2010) para diferentes ríos del mundo.

La Tabla 34 muestra los parámetros hidráulicos globales obtenidos de cada una de las mediciones realizadas en los distintos sitios de estudio. Se incluye además los parámetros representativos de la pendiente de cada tramo y de la granulometría del sedimento del lecho (D50). Es importante destacar que los cauces de las secciones analizadas presentan bajas pendientes (del orden 0,01%) con lecho de arena limosa (clasificación SM del Servicio de Conservación del Suelo de los Estados Unidos – USCS; Barchiesi, 2013). Además, se destaca que los cauces del río Saladillo y del arroyo Tortugas presentan fuertes alteraciones antrópicas debido a las obras realizadas para mejorar la capacidad del cauce. En la Tabla 35 se muestran los valores estimados con la Ec. 42 del coeficiente de dispersión longitudinal (D) utilizando una caracterización hidrodinámica detallada obtenida de las mediciones realizadas con ADCP en las cuatro secciones del sistema fluvial mencionadas en el apartado anterior para diferentes condiciones hidrológicas. El sistema fluvial presenta un régimen hidrológico con mayores escurrimientos en el periodo noviembre – abril. La Tabla 35 además incluye los parámetros de las Ec. 43 y Ec. 44 obtenidos del ajuste estadístico realizado a la distribución de velocidades y batimetría de cada sección transversal. Se incluyen además en esa tabla el parámetro  $r^2$  que representa el coeficiente de determinación del ajuste realizado y ECM representa el error cuadrático medio de la estimación (en  $m^2/s^2$  y  $m^2$  para la Ec. 43 y Ec. 44, respectivamente). La Tabla 35 muestra que no existe una gran variabilidad de los valores de los parámetros de las Ec. 43 y Ec. 44. En los casos en que estas ecuaciones no presentan un buen ajuste a los datos observados, se realizaron ajustes con polinomios. Los ajustes realizados con las ecuaciones 43 y 44 han funcionado adecuadamente en secciones con cambios suaves en su perfil de velocidad y/o batimetría, situación que ocurre en secciones con intervenciones antrópicas como por ej. canalizaciones”.

**Tabla 34.:** Parámetros hidráulicos globales obtenidos de mediciones con ADCP. Se incluye además los parámetros representativos de la pendiente de cada tramo y de la granulometría del sedimento del lecho (D50).

Sección	B [m]	H <sub>med</sub> [m]	A [m <sup>2</sup> ]	U [m/s]	u <sub>*</sub> [m/s]	Pend [m/m]	θ	Q [m <sup>3</sup> ]	D <sub>50</sub> [mm]
Arroyo Las Tortugas – RN9	19,07	2,36	45,09	0,95	0,08	0,0003	0,20	43,01	0,10
Arroyo Las Tortugas – RN9	16,42	2,10	34,40	0,70	0,08	0,0003	0,19	24,22	0,10
Arroyo Las Tortugas – RN9	15,76	0,66	10,32	0,66	0,04	0,0003	0,49	6,77	0,10
Arroyo Las Tortugas – RN9	14,02	0,79	11,02	0,25	0,05	0,0003	0,23	2,80	0,10
Río Tercero – Bell Ville	43,14	5,31	229,20	1,07	0,09	0,0002	0,20	245,62	-
Río Tercero – Bell Ville	33,74	3,07	103,62	1,09	0,08	0,0002	0,24	112,85	-
Río Tercero – Bell Ville	25,10	1,22	30,72	0,95	0,05	0,0002	0,48	29,11	-
Río Tercero – Bell Ville	24,81	1,15	28,65	0,87	0,05	0,0002	0,48	25,06	-
Río Tercero – Bell Ville	24,31	1,13	27,43	0,88	0,05	0,0002	0,48	24,15	-
Río Carcarañá – Inrville	47,53	2,77	131,53	1,57	0,10	0,0004	0,38	206,39	0,15
Río Carcarañá – Inrville	41,69	1,60	66,67	1,12	0,07	0,0004	0,53	74,62	0,15
Río Carcarañá – Inrville	42,04	1,38	58,06	0,94	0,07	0,0004	0,58	54,63	0,15
Río Carcarañá – Inrville	40,38	1,27	51,26	0,89	0,07	0,0004	0,60	45,66	0,15
Río Carcarañá – Inrville	36,42	0,93	33,94	0,83	0,06	0,0004	0,80	28,12	0,15
Río Saladillo – Ruta 6	27,53	2,70	74,32	1,21	0,07	0,0002	0,27	89,81	0,10
Río Saladillo – Ruta 6	25,65	1,63	41,92	0,92	0,05	0,0002	0,36	38,48	0,10
Río Saladillo – Ruta 6	23,67	1,46	34,57	0,74	0,05	0,0002	0,34	25,53	0,10
Río Saladillo – Ruta 6	23,01	0,98	22,61	0,66	0,04	0,0002	0,49	14,84	0,10
Río Saladillo – Ruta 6	22,77	1,04	23,76	0,62	0,04	0,0002	0,43	14,75	0,10
Río Saladillo – Ruta 6	22,70	0,94	21,30	0,65	0,04	0,0002	0,51	13,75	0,10
Río Saladillo – Ruta 6	21,71	0,86	18,67	0,49	0,04	0,0002	0,45	9,16	0,10

**Tabla 35.:** Coeficientes de dispersión longitudinal estimados con la ecuación integral de Fischer (1979) –Ec. 42- utilizando información experimental proveniente de una caracterización hidrodinámica detallada realizada con ADCP.

Sección	Parámetros Ec. 33				Parámetro Ec. 34			Q [m <sup>3</sup> /s]	D [m <sup>2</sup> /s]
	α	β	r <sup>2</sup>	ECM	γ	r <sup>2</sup>	ECM		
Arroyo Las Tortugas – Ruta 9	1,53	1,59	0,95	0,004	Pol. 4º	0,98	0,011	43,01	33,8
Arroyo Las Tortugas – Ruta 9	1,44	1,88	0,88	0,009	5,06	0,93	0,021	24,22	21,0
Arroyo Las Tortugas – Ruta 9	2,84	2,79	0,93	0,011	3,89	0,92	0,003	6,77	76,2
Arroyo Las Tortugas – Ruta 9	Pol. 5º	Pol. 5º	0,93	0,004	2,80	0,90	0,004	2,80	55,0
Río Tercero – Bell Ville	2,97	2,05	0,96	0,015	2,15	0,90	0,248	245,62	98,9
Río Tercero – Bell Ville	Pol. 3º	Pol. 3º	0,94	0,014	3,12	0,91	0,075	112,85	60,3
Río Tercero – Bell Ville	1,66	1,76	0,85	0,016	Pol. 6º	0,96	0,005	29,11	67,2
Río Tercero – Bell Ville	Pol. 5º	Pol. 5º	0,91	0,006	Pol. 6º	0,96	0,005	25,06	38,3
Río Tercero – Bell Ville	Pol. 5º	Pol. 5º	0,82	0,018	Pol. 6º	0,93	0,006	24,15	31,7
Río Carcarañá - Inrville	Pol. 5º	Pol. 5º	0,96	0,022	Pol. 4º	0,91	0,041	206,39	258,2
Río Carcarañá - Inrville	1,96	1,64	0,88	0,021	Pol. 4º	0,88	0,010	74,62	214,0
Río Carcarañá - Inrville	2,28	1,87	0,82	0,044	Pol. 6º	0,85	0,018	54,63	256,6
Río Carcarañá - Inrville	2,07	1,57	0,81	0,032	Pol. 6º	0,72	0,023	45,66	230,3

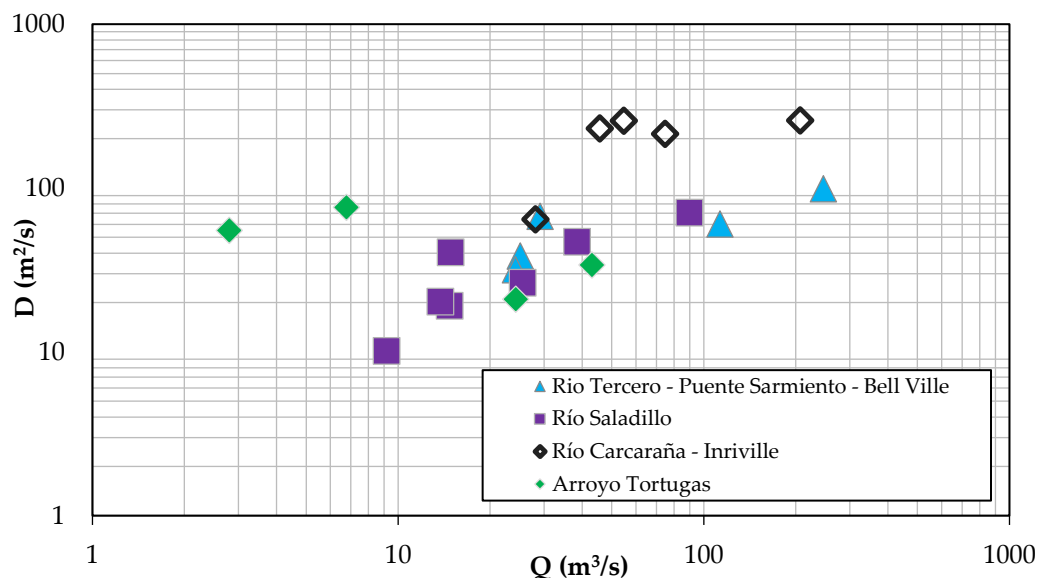
Lozada

Río Carcarañá - Inrville	Pol. 6º	Pol. 6º	0,93	0,006	Pol. 6º	0,75	0,013	28,12	64,1
Río Saladillo – Ruta 6	1,45	1,68	0,93	0,013	Pol. 6º	0,97	0,025	89,81	70,4
Río Saladillo – Ruta 6	Pol. 3º	Pol. 3º	0,94	0,005	Pol. 6º	0,96	0,012	38,48	46,7
Río Saladillo – Ruta 6	1,31	1,62	0,95	0,003	Pol. 5º	0,95	0,012	25,53	26,3
Río Saladillo – Ruta 6	1,29	1,45	0,82	0,005	Pol. 6º	0,88	0,018	14,84	40,3
Río Saladillo – Ruta 6	1,26	1,52	0,83	0,004	Pol. 6º	0,91	0,011	14,75	19,0
Río Saladillo – Ruta 6	1,32	1,43	0,77	0,004	Pol. 6º	0,89	0,013	13,75	20,2
Río Saladillo – Ruta 6	1,27	1,33	0,64	0,003	Pol. 6º	0,88	0,013	9,16	10,1
<b>Nota:</b> Los parámetros de las Ec. 43 y Ec. 44 representan el ajuste realizado a la distribución de velocidades y batimetría de cada sección transversal. En los casos en que estas ecuaciones no presentaban un buen ajuste se realizaron ajustes con polinomios. El parámetro $r^2$ representa el coeficiente de determinación del ajuste realizado y ECM representa el error cuadrático medio de la estimación (en $m^2/s^2$ y $m^2$ para la Ec. 33 y Ec. 34, respectivamente).									

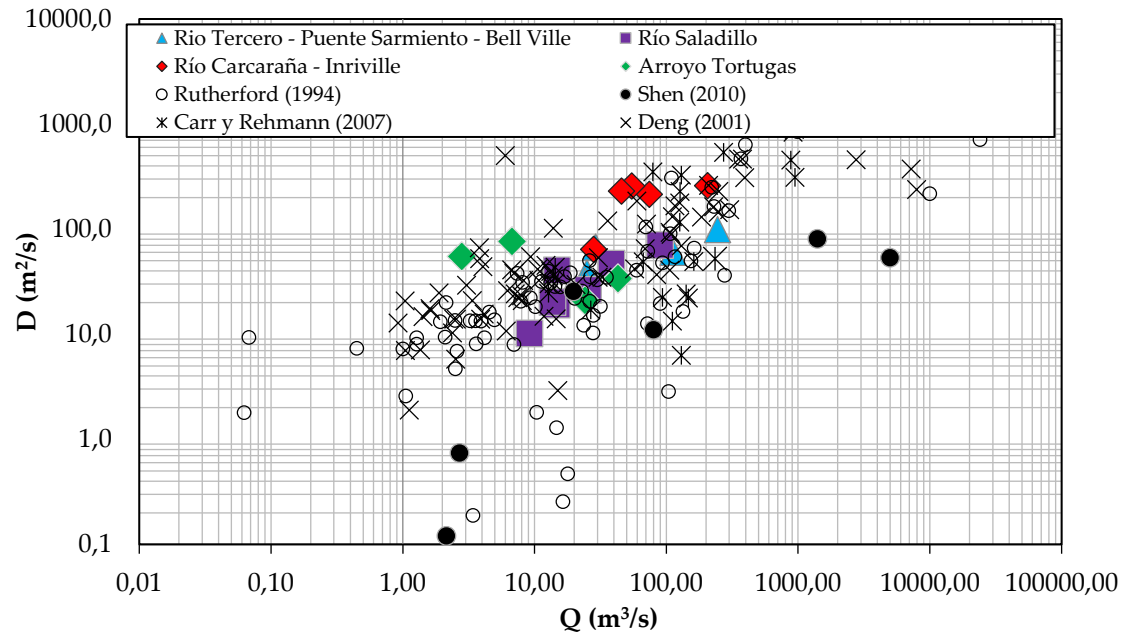
En la Figura 70 se analiza la evolución del coeficiente de dispersión longitudinal, obtenidas con la metodología propuesta en esta tesis, en función del caudal escurrido de cada una de las secciones del sistema de estudio, mientras que en la Figura 71 e grafican estos valores con otros resultados obtenidos por otros investigadores. En el caso del río Saladillo, en el que la sección de estudio está en las cercanías del puente de la ruta provincial nº 6, se observa que el coeficiente de dispersión longitudinal crece a medida que aumenta el caudal. En la sección del río Carcarañá, en la localidad de Inrville, se observa que el coeficiente dispersión longitudinal (D) crece hasta un determinado caudal y a partir de allí se mantiene cuasi uniforme. En el arroyo Las Tortugas se observa una evolución negativa del coeficiente D a medida que los caudales escurridos aumentan debido a que el flujo presenta mayores variaciones en el campo de velocidades (con zonas de estancamiento y recirculación) para aguas medias y bajas. En el río Tercero (Ctalamochita), en la localidad de Bell Ville, el coeficiente de dispersión, al igual que río Carcarañá en Inrville, crece hasta un determinado caudal y luego se mantiene cuasi-constante. En la misma figura se han graficado también valores obtenidos experimentalmente del coeficiente de dispersión longitudinal (D) reportados por varios autores para diferentes ríos del mundo.

A partir de los parámetros hidráulicos globales (Tabla 34), calculados en base a la información obtenida en campo para este trabajo, se procedió a calcular los coeficientes de dispersión longitudinal, utilizando las seis formulas empíricas detalladas en la sección anterior (Tabla 33). Además, utilizando los valores obtenidos de D mediante la Ec. 42 se ajustó una ecuación empírica para el sistema del Carcarañá. Los valores de los parámetros a, b y c de la Ec. 49 obtenidos del ajuste son 0,035; 2,50 y 1,13 respectivamente.

Los resultados obtenidos del coeficiente de dispersión longitudinal ( $D$ ) mediante las ecuaciones empíricas incluida la ajustada en esta tesis se reportan en la Tabla 36. Se puede apreciar la gran dispersión de valores de los coeficientes estimados por las diferentes fórmulas para las mismas secciones. Rutherford (1994) indica que los resultados obtenidos por las diferentes formulaciones empíricas pueden diferir 10 o más veces para una misma sección, especialmente cuando se los aplica en ríos diferentes a los calibrados. Rigo (1992) reporta una gran variación de los resultados obtenidos con las fórmulas empíricas para el río Paraíba do Sul. Es por ello que se recomienda utilizar con cautela estas expresiones, ya que las diferencias en la estimación del coeficiente de dispersión longitudinal pueden generar resultados que difieren hasta órdenes de magnitud. Aun cuando se ha realizado un ajuste de una ecuación específica para el sistema fluvial de estudio que permite determinar  $D$  en base a parámetros hidráulicos globales, se recomienda en esta tesis utilizar, cuando se disponga de la información necesaria, la metodología detallada en este apartado que implica resolver la Ec. 42 utilizando los datos de velocidad y batimetría obtenidos de ADCP, ya que la misma tiene en cuenta condiciones particulares del flujo en cada sección y para cada condición hidrológica que influyen en el valor del coeficiente de dispersión.



**Figura 70.:** Valores del coeficiente de dispersión longitudinal ( $D$ ) estimados en las diferentes secciones analizadas con la Ec. 42.



**Figura 71.:** Valores del coeficiente de dispersión longitudinal reportados por Rutherford (1994), Deng (2001), Carr y Rehmann (2007), Shen (2010) y estimados en las diferentes secciones del sistema de estudio analizadas con la Ec. 42.

**Tabla 36.:** Coeficientes de dispersión longitudinal estimados con la Ec. 42 y utilizando ecuaciones empíricas (presentadas en Tabla 33) con parámetros hidráulicos globales determinados de las mediciones con ADCP en las distintas secciones de medición.

Sección	D (Fischer) [m²/s]	D (Liu) [m²/s]	D (Iwasa y Aya) [m²/s]	D (Seo y Cheong) [m²/s]	D (Koussis et al) [m²/s]	D (Díaz Lozada) [m²/s]	D (Ec. 42) [m²/s]
Arroyo Las Tortugas – R. 9	18,70	7,76	8,91	139,73	7,59	32,40	33,8
Arroyo Las Tortugas – R. 9	9,06	5,41	7,12	80,85	5,98	14,24	21,0
Arroyo Las Tortugas – R. 9	41,32	11,49	6,70	58,71	9,85	31,50	76,2
Arroyo Las Tortugas – R. 9	3,75	4,95	5,62	14,54	7,12	2,21	55,0
Río Tercero – Bell Ville	48,19	19,77	22,56	355,25	19,29	83,30	98,9
Río Tercero – Bell Ville	57,08	20,26	18,95	262,34	18,84	79,49	60,3
Río Tercero – Bell Ville	97,77	20,58	11,83	155,64	16,07	93,98	67,2
Río Tercero – Bell Ville	88,78	20,17	11,62	136,48	16,16	79,88	38,3
Río Tercero – Bell Ville	89,33	19,76	11,27	135,45	15,69	80,91	31,7
Río Carcaraña - Inrville	226,94	57,47	38,40	495,05	47,74	239,44	258,2
Río Carcaraña - Inrville	202,12	56,33	31,54	257,14	48,31	143,51	214,0
Río Carcaraña - Inrville	181,05	58,63	31,94	196,87	52,87	106,79	256,6
Río Carcaraña - Inrville	169,82	56,07	30,07	175,06	50,88	95,77	230,3
Río Carcaraña - Inrville	190,04	55,46	25,75	140,71	48,30	93,31	64,1
Río Saladillo – Ruta 6	64,94	14,63	12,20	278,39	11,69	112,35	70,4
Río Saladillo – Ruta 6	69,12	16,14	10,98	165,55	13,05	81,06	46,7
Río Saladillo – Ruta 6	44,98	13,42	9,75	113,16	11,78	47,27	26,3
Río Saladillo – Ruta 6	60,97	16,08	9,33	88,08	13,54	48,43	40,3
Río Saladillo – Ruta 6	48,81	14,64	9,18	81,61	12,87	39,50	19,0
Río Saladillo – Ruta 6	61,51	16,07	9,14	84,64	13,48	47,64	20,2
Río Saladillo – Ruta 6	37,04	13,68	8,55	54,82	12,88	24,63	10,1

A continuación, se incluye un contraste de los coeficientes de dispersión obtenidos a través de las ecuaciones empíricas y los obtenidos mediante la Ec. 42 (integral de Fischer et al.; 1979) con una caracterización hidrodinámica detallada. Para cuantificar este contraste se utilizó la relación de discrepancia definida por White et al. (1973).

Ec. 50

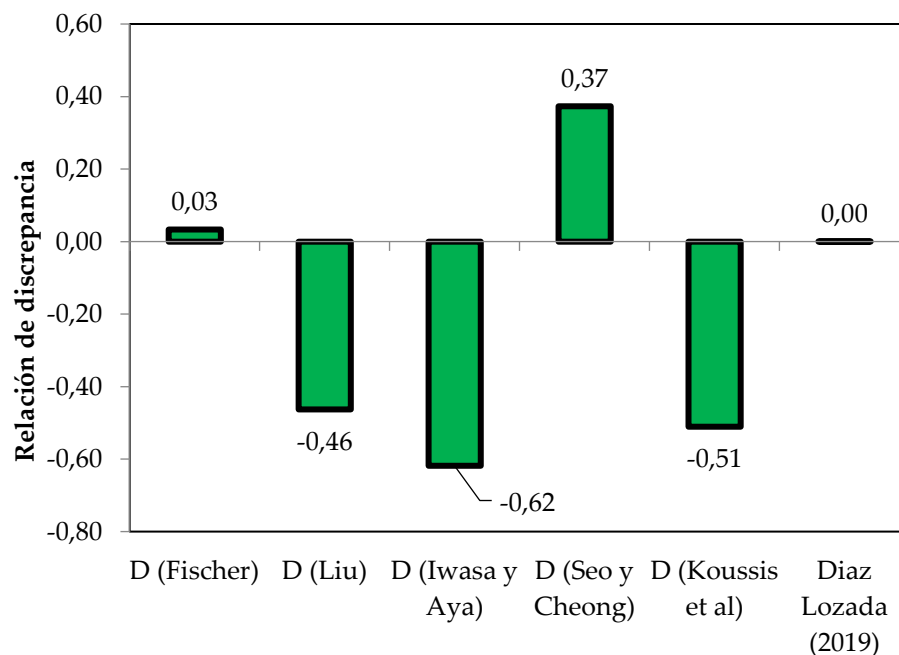
$$RD = \frac{1}{N} \sum_1^N \log \left( \frac{D_{FE}}{D_{ID}} \right)$$

dónde N es el número de datos,  $D_{FE}$  es el coeficiente de dispersión longitudinal obtenido mediante alguna fórmula empírica y  $D_{ID}$  es el coeficiente estimado con la Ec. 42 con una caracterización hidrodinámica detallada.

Si RD es igual a cero la correspondencia es perfecta entre el coeficiente de dispersión longitudinal estimado mediante una caracterización hidrodinámica detallada y el coeficiente estimado a través de la ecuación empírica. Si RD es menor a cero la formula empírica analizada otorga menores valores del coeficiente de dispersión respecto al obtenido mediante la utilización de la Ec. 42 y una caracterización hidrodinámica detallada, mientras que si es mayor a cero ocurre lo inverso.

En la Figura 72 se puede observar que mediante las ecuaciones empíricas de Fischer et al.; (1979) y Seo y Cheong (1998) se obtienen valores mayores del coeficiente de dispersión longitudinal respecto a la metodología utilizada en este trabajo (Ec. 42). La fórmula de Seo y Cheong genera valores mayores del coeficiente de dispersión respecto a otras fórmulas para relaciones de  $B/H_{med} < 40$  (Seo y Baek; 2004). Las ecuaciones de Liu (1977), Iwasa y Aya (1991) y Koussis y Rodríguez-Mirasol (1998) en general arrojan valores menores del coeficiente de dispersión longitudinal que los obtenidos mediante la Ec. 42 en el sistema de estudio. Con respecto a la ecuación ajustada en esta tesis el valor de la relación de discrepancia es cero, ya que la misma se ajustó con los datos obtenidos en esta tesis mediante la Ec. 42 que son los mismos con los que se realiza la comparación aquí detallada. Se observó que la formula empírica que mejor se aproxima, después de la ajustada en esta tesis, a los coeficientes de dispersión obtenidos con la Ec. 42 (Fischer et al.; 1979) con una caracterización hidrodinámica detallada es la propuesta por Fischer et al.; (1979), la cual presentó una relación de discrepancia de +0,03 (generados por diferencias porcentuales medias del 7%).

Del análisis de los datos graficados en la Figura 71 se puede apreciar también la gran variabilidad que poseen los coeficientes de dispersión longitudinales reportados por Rutherford (1994), Deng (2001), Carr y Rehmann (2007) y Shen (2010) en un gráfico con doble escala logarítmica. La gran variabilidad de los valores del coeficiente de dispersión longitudinal ( $D$ ) justifica el uso de una metodología que tenga en cuenta las características particulares del flujo, las cuales son tenidas en cuenta a través de la caracterización hidrodinámica con ADCP o bien utilizar una formula empírica que contemple las características del río estudiado, pero teniendo en cuenta que en la mayoría de los casos pueden no tener en cuenta características locales de la sección. Además, los valores reportados por Rutherford (1994) sugieren una evolución creciente del coeficiente de dispersión con el caudal, situación que fue corroborada en sólo una sección de estudio en este trabajo.



**Figura 72.:** Discrepancia de los valores de los coeficientes de dispersión longitudinal estimados con las ecuaciones empíricas y los obtenidos mediante la Ec. 33 (Fischer et al.; 1979) con una caracterización hidrodinámica detallada.

Distintas fuentes de errores e incertidumbre afectan a los valores estimados del coeficiente de dispersión utilizando la Ec. 42: (a) errores debido a que no se satisfacen en el tramo del río estudiado las hipótesis en las que se basa el desarrollo de la Ec. 42 (Fischer et al.; 1979); (b) errores de medición de las velocidades y profundidades de flujo. En relación a esta fuente de error Carr y Rehmann (2007) reportan errores entre el 45% y

140% en el coeficiente de dispersión si la región no medida por los perfiladores acústicos Doppler supera el 20% del total; (c) errores debido a que no es suficiente el número de cruces o transectas utilizados para determinar los perfiles medios de velocidad; (d) errores debidos al ajuste defectuoso de funciones a los perfiles de velocidades y de batimetría; (e) errores en la determinación del coeficiente de dispersión transversal y/o a las variables utilizadas para su estimación (por ejemplo errores en la determinación de la velocidad de corte y la constante  $\theta$  de la ecuación); (f) errores debido al método numérico adoptado para la resolución de la Ec. 42. La importancia relativa de cada fuente de error y/o incertidumbre deberán ser analizadas en futuras investigaciones.

#### **4.3. Evaluación de los procesos de mezcla en una confluencia fluvial en curva con ríos con diferente densidad.**

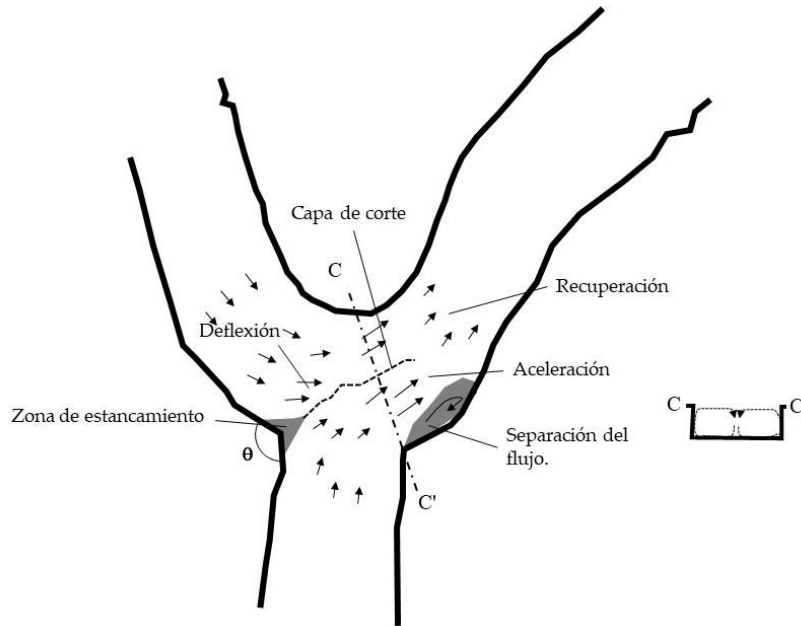
Este apartado es una traducción literal del artículo “The influence of tributary flow density differences on the hydrodynamic behavior of a confluent meander bend and implications for flow mixing” publicado por el autor de esta tesis en *Geomorphology* (304, 99-112, 2018)

##### **4.3.1. Introducción**

Otro tema de interés científico tanto desde el punto de vista de la hidrodinámica como de calidad de agua es la caracterización de confluencias. Esta línea de investigación ha generado un gran interés en los últimos 30 años (ver revisión de Best y Rhoads, 2008). Trabajos previos en la temática incluyen el estudio de confluencias en laboratorios (Mosley, 1976; Best, 1986, 1987, 1988; Best y Roy, 1991; Biron et al., 1996a, b; McLelland et al., 1996; Herrero, et al., 2016), en ríos pequeños (Best y Reid, 1984; Roy et al., 1988; Roy y Bergeron, 1990; Ashmore y otros, 1992; Bristow y otros, 1993; Biron y otros, 1993a, b; Kenworthy y Rhoads, 1995; Rhoads y Kenworthy, 1995; McLelland y otros, 1996; Rhoads, 1996; De Serres y otros, 1999; Rhoads y Suhodolov, 2001, 2004; Boyer et al., 2006; Rhoads et al., 2009; Riley y Rhoads, 2012; Ramón et al 2013, 2014; Lewis y Rhoads, 2015) y en grandes canales (Best y Ashworth, 1997; Parsons et al., 2007; Szupiany et al., 2007; Lane et al., 2008; Parsons et al., 2008; Laraque et al. 2009; Szupiany et al., 2009; Trevethan et al., 2015).



El conocimiento obtenido a través de estos estudios previos ha permitido el desarrollo de varios modelos de la dinámica de flujo de diferentes tipos de confluencias. Mosley (1976) y Best (1986) desarrollaron modelos conceptuales de estructura de flujo para confluencias simétricas. Best (1987) generó un modelo para confluencias asimétricas que ha sido ampliamente adoptado y reconoce cinco regiones hidrodinámicas: (a) estancamiento; (b) deflexión; (c) separación; (d) aceleración; y (e) recuperación (Best, 1986, 1987). Las características de estas zonas dependen de la geometría de confluencia, el ángulo entre los flujos convergentes, la relación de momentos y la morfología del lecho. Suhodolov y Rhoads (2001) propusieron una caracterización hidrodinámica del flujo en confluencias a través de una analogía con el flujo alrededor de un obstáculo, que recientemente ha sido validado a través de experimentos de laboratorio por Herrero et al. (2016). Con respecto a las confluencias en curvas, este tipo de unión se ha documentado en varios sistemas fluviales (Callaway, 1902, Davis 1903, Flint, 1980, Hills, 1983, Abrahams, 1984a, b), pero la hidrodinámica no se ha documentado detalladamente. Actualmente debido a los avances en las técnicas de medición, se ha podido estudiar con mayor detalle confluencias donde uno de los tributarios converge con el otro en la margen externa de la curva (Roberts, 2004; Riley y Rhoads, 2012; Riley et al., 2014). Uno de los primeros estudios modernos de confluencias en curvas fue el de Roberts (2004), que estudió la estructura de flujo 3D de una curva con un tributario que confluye a 90° realizando una modelación numérica y experimentos de laboratorio, y desarrolló un modelo conceptual para este tipo de unión (Figura 73). Más tarde, Riley y Rhoads (2012) caracterizaron, mediante mediciones de campo, la hidrodinámica de la confluencia en curva entre los ríos Little Wabash y Big Muddy localizados en Illinois, EE. UU. Dichos resultados se compararon con el modelo conceptual de Roberts (2004). Posteriormente, Riley et al. (2014) analizaron la influencia del ángulo entre los flujos confluyentes en la hidrodinámica y la morfología. A pesar de la gran cantidad de bibliografía reciente sobre confluencias en curvas tanto a escala de laboratorio como de campo, la mayoría de estos estudios solo se han enfocado en confluencias fluviales con flujos convergentes de igual densidad.



**Figura 73.:** Modelo conceptual de la estructura de flujo de una confluencia en curva (adaptado de Roberts, 2004).

Fischer (1969) desarrolló, mediante experimentación en laboratorio, una ecuación para calcular la longitud requerida para lograr una mezcla completa aguas abajo de confluencias de canales, con una desviación máxima del 5%. Fischer et al. (1979) adaptaron esta relación a una confluencia en curva de laboratorio con tributarios de igual densidad otorgando una buena aproximación longitud de mezcla, pero su implementación presenta problemas en los ríos naturales (Rutherford, 1994) y tiene deficiencias significativas cuando los tributarios tienen diferente densidad. Yotsukura y Sayre (1976) informaron otra expresión para estimar la longitud de la mezcla, pero al igual que la ecuación de Fischer, esta expresión tiene una gran incertidumbre.

Investigaciones anteriores, que han caracterizado las confluencias con diferentes tributarios de diferente densidad, han indicado que la hidrodinámica de la confluencia se ve afectada por muchos factores, que incluyen: (a) concentración de sedimentos en suspensión, (b) temperatura, (c) concentración de sólidos disueltos (d) relación de momentos entre los dos tributarios y (e) diferencia de profundidad entre los tributarios. Diferencias en las densidades puede afectar las velocidades del flujo y los procesos de mezcla (Weigold y Baborowski, 2009). Laraque et al. (2009) y Ramon et al. (2013) indican que la flotabilidad puede influir en la mezcla en las confluencias fluviales cuando los contrastes de densidad entre los flujos tributarios son relativamente pequeños. Lane et

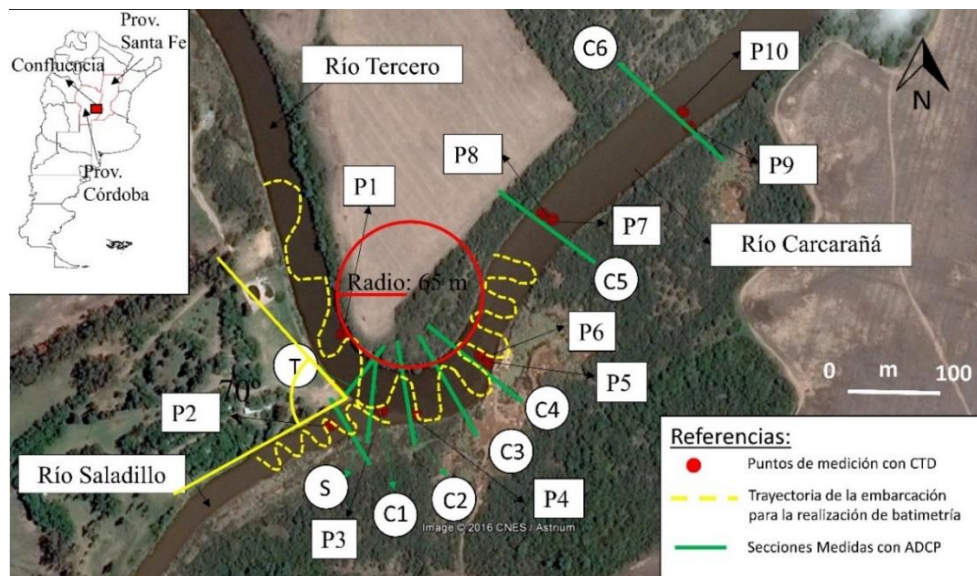
al. (2008) analizaron la hidrodinámica de la confluencia de los ríos Paraguay y Paraná, Argentina, donde el río Paraguay tiene una mayor densidad debido a su mayor concentración de sedimentos en suspensión. Lane et al. (2008) indican que la tasa de mezcla entre los dos flujos convergentes depende de la relación de momentos, cuando se produce una mayor penetración del tributario más denso bajo el tributario menos denso, se genera una diferencia importante de velocidad en la unión, que produce una mayor velocidad de mezcla. Lyubimova et al. (2014) analizaron, utilizando simulaciones numéricas y mediciones de campo, la hidrodinámica de una confluencia de diferentes tributarios de densidad, donde los flujos convergentes tenían diferentes características hidroquímicas. Lewis y Rhoads (2015) examinaron el impacto de la relación de momento, la escala del flujo y las diferencias de densidad entre los tributarios en la mezcla por diferencias térmicas en una confluencia de flujo pequeño. Llegaron a la conclusión de que cuando los flujos entrantes tienen una diferencia de densidad relativamente alta, la flotabilidad puede influir en el patrón de mezcla, y destacan que se requiere más investigación en la temática. Aunque la influencia de las diferencias de densidad entre dos flujos convergente ha demostrado ser importante (Maurice-Bourgoin et al., 2003; Moreira-Turcq et al., 2003; Laraque et al., 2009; Bouchez et al., 2010; Ramón et al., 2013, 2014; Lewis y Rhoads, 2015; Park and Latrubesse, 2015; Trevethan et al., 2015), los patrones y procesos de mezcla en tales condiciones no han sido completamente documentados. Estudios previos de confluencias fluviales no han abordado la hidrodinámica de la confluencia en curva donde los tributarios poseen diferentes densidades

#### **4.3.2. Área de Estudio y Metodología**

A continuación, se detalla el estudio realizado en una confluencia en curva con tributarios de diferente densidad, lo cual como se ha mencionado en apartados anteriores es un caso poco reportado en la bibliografía. La confluencia de estudio es la de los ríos Tercero (T) y Saladillo (S), localizada en el sudeste de la provincia de Córdoba, Argentina ( $32^{\circ} 54'55''\text{S}$ ;  $62^{\circ} 19'29''\text{W}$ ; Figura 74). El área de drenaje de la cuenca río arriba de la confluencia (de ambos afluentes) es de  $50,900\text{ km}^2$  ( $9,700\text{ km}^2$  en la cuenca del río Tercero y  $41,200\text{ km}^2$  en la cuenca del río Saladillo). La confluencia estudiada aquí se ubica en una curva de meandro con un radio de 65 m, donde el Río Tercero tiene una

caudal medio anual de  $27 \text{ m}^3/\text{s}$ , una profundidad media de  $0,93 \text{ m}$ , y un ancho medio de  $40 \text{ m}$ , y el Saladillo, una profundidad media de  $1,3 \text{ m}$ , y un ancho medio de  $30 \text{ m}$ . Las pendientes de superficie libre de ambos afluentes son del orden del  $0.02\%$ . El río Saladillo se une al río Tercero en un ángulo de  $70^\circ$  en la orilla externa de la curva, en la región de máxima curvatura.

En la confluencia de estudio, no es posible definir un tributario dominante porque el caudal de cada río depende de los eventos hidrometeorológicos que suceden en la cuenca y, en el caso del río Tercero, además, la regulación que generan los embalses en su cuenca alta, lo que resulta en que el río Tercero es en algunos momentos el principal tributario o viceversa (Díaz Lozada et al., 2015). En esta tesis, se define al río Tercero como el tributario dominante y el río Saladillo como el tributario secundario. La generación hidroeléctrica que se da en la cuenca del río Tercero, produce cambios bruscos en los caudales erogados por las presas, pero el último embalse de la cadena (dique Piedras Moras) mantiene un caudal uniforme en el río. Estadísticamente, una vez al año el nivel del agua está por encima del nivel del vertedero de las presas y el pico del hidrograma llega a la confluencia aproximadamente siete días después. Las observaciones previas de la confluencia también han mostrado diferentes patrones hidrodinámicos y de mezcla que dependen del caudal de cada tributario (Herrero, 2014).



**Figura 74.:** Confluencia de los ríos Tercero y Saladillo. La imagen satelital fue tomada el 14/10/2013. Se ilustra la trayectoria recorrida para el levantamiento batimétrico, puntos de medición con CTD y las secciones transversales donde se midió con ADCP.

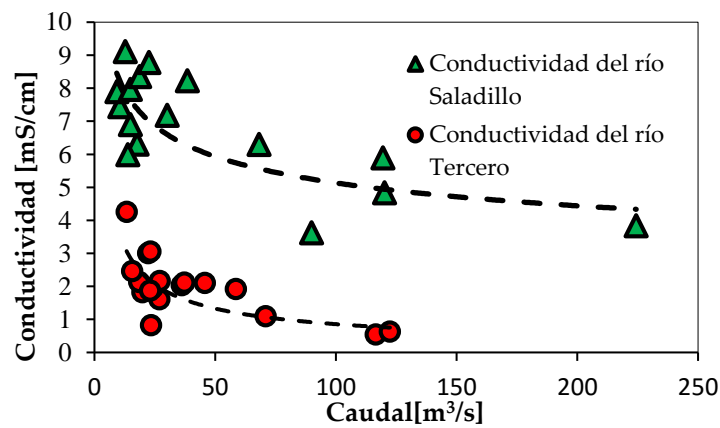
T = Tercero; S = Saladillo; C = Carcarañá

Cuando el río Saladillo presenta altos caudales, la confluencia presenta un comportamiento similar al reportado por Riley y Rhoads (2012), con longitudes de mezcla mayores que las observadas cuando el caudal del mismo es bajo. Cuando el caudal del río Saladillo es bajo, el mismo posee una densidad más alta que el río Tercero (Ctalamochita) debido a los minerales disueltos presentes en el agua, lo que produce patrones hidrodinámicos complejos y una longitud de mezcla más corta que cuando el río Saladillo presenta caudales importantes (ver Figura 74).

Como se ha mencionado antes, la cuenca del río Tercero posee seis embalses con una capacidad total de embalse de 1000 Hm<sup>3</sup> que tienen una fuerte influencia en los caudales escurridos por el mismo. El río Saladillo, aunque no contiene ningún embalse importante (solo algunos pequeños para atenuación de crecida), el río se ha visto afectado por los cambios en el uso de la tierra, el drenaje de los humedales y la construcción de canales, que producen una variación estacional importante en los caudales escurridos (Díaz Lozada et al., 2015). El río Saladillo recibe el aporte subterráneo en los "Baños del Saladillo" con altas concentraciones de cloruros, sulfatos, arsénico y magnesio, lo que produce un importante incremento de su salinidad, y por lo tanto densidad. Este aumento de salinidad y densidad se da principalmente cuando los caudales escurridos por el Saladillo son bajos. La evolución de la conductividad del agua de los ríos Tercero y Saladillo en la confluencia (Figura 75) muestra que el Saladillo presenta, en muchos casos, una conductividad más alta que el río Tercero, lo que se traduce en una mayor densidad del río Saladillo comparada con la del río Tercero. Las diferencias de temperatura entre ambos tributarios no son importantes (diferencias de temperatura inferiores al 10%).

Las mediciones de campo se realizaron el día 13 de agosto de 2013. En dicha campaña, los caudales de los ríos Tercero y Saladillo eran de 19,9 m<sup>3</sup>/s y 10,5 m<sup>3</sup>/s respectivamente. Para cuantificar la descarga en cada afluente, así como caracterizar el flujo en diferentes secciones de medición, se utilizó el ADCP YSI / SonTek RiverSurveyor S5® mencionado el apartado 1.4.2. En este estudio, el instrumento seleccionó automáticamente tamaños de celda de 0,02 m y 0,10 m.

Se midieron ocho secciones transversales en el área de la confluencia (secciones S, T y C en la Figura 74). Se realizó una única transecta en cada una de las secciones del río Carcarañá y en cada tributario, se realizaron cuatro transectas (> 12 min de medición) para obtener datos de caudales de acuerdo con la metodología propuesta por Mueller et al. (2013). Mediante la información recopilada, se calcularon diferentes parámetros hidráulicos como son el área de la sección transversal y la velocidad media del flujo. A través de estos parámetros y valores de densidad medidos, se procedió a calcular el número de Froude ( $Fr_i$ ), el número de Reynolds de cada tributario " $i$ " ( $Re_i$ ), la relación de momentos ( $Mr$ ) y la relación de caudales ( $Qr$ ).



**Figura 75.:** Conductividad vs caudal de los ríos Tercero y Saladillo (fuente: Díaz Lozada, 2014 y actualizada con datos hasta noviembre de 2016 provistos por la Secretaria de Recursos Hídricos de la Pcia. de Cba).

Ec. 51

$$Fr_i = \frac{U_i}{\sqrt{g H_{medi_i}}}$$

Ec. 52

$$Re_i = \frac{U_i H_{medi_i}}{\nu}$$

Ec. 53

$$Mr = \frac{\rho_S Q_S U_S}{\rho_T Q_T U_T}$$

Ec. 54

$$Qr = \frac{Q_S}{Q_T}$$

Donde  $U_i$  (m/s) es la velocidad media del tributario " $i$ ", S para el río Saladillo (considerado el tributario secundario en esta tesis) y T para el río Tercero (considerado tributario principal),  $H_{medi}$  (m) es la profundidad media del tributario " $i$ " (S o T),  $g$  (m/s<sup>2</sup>) es la aceleración debida a la gravedad,  $\nu$  (m<sup>2</sup>/s) es la viscosidad cinemática del agua,  $\rho$  es la densidad del agua (kg/m<sup>3</sup>), y  $Q$  es caudal (m<sup>3</sup>/s).

Los perfiles de densidad en cada afluente se calcularon utilizando el método empírico de la UNESCO (Fofonoff y Millard, 1983) con datos de temperatura del agua y salinidad (calculada mediante datos de conductividad y temperatura) obtenidos mediante la sonda CTD de YSI / Castaway. Se midieron perfiles verticales de temperatura y conductividad en diez localizaciones diferentes en cada tributario y dentro de la zona de mezcla (Figura 74). La conductividad eléctrica fue corregida, expresándose la misma a una temperatura de 25°C (debido a que la conductividad varía con la temperatura y por lo tanto es necesario expresar la conductividad a la misma temperatura para permitir la comparación).

En cada sección transversal, se obtuvieron los campos medios de flujo mediante el programa VMT (Velocity Mapping Toolbox, Parsons et al., 2013). La batimetría de la confluencia se realizó mediante los valores de profundidad registrados continuamente mediante el haz vertical de 1MHz del ADCP siguiendo una trayectoria en zigzag. La batimetría incluye las áreas aguas arriba y aguas abajo de la confluencia (Figura 74). Estos valores de profundidad se interpolaron luego en una cuadrícula que cubre el área de interés, utilizando un procedimiento de Kriging con un tamaño de celda promedio de 3,2 x 3,7 m.

Las pendientes de superficie libre de los ríos Tercero (Ctalamochita) y Saladillo, como así también la del río Carcarañá, se calcularon a partir de los valores pelo de agua registrados a lo largo de la línea central de los ríos utilizando un sistema de posicionamiento global diferencial (DGPS) de frecuencia de 1 Hz. El DGPS se referencio a una estación base (sistema RTK) ubicada una de las márgenes. Este sistema permitió obtener información con precisión  $\pm 10$  mm en horizontal y  $\pm 20$  mm en vertical.

Para visualizar los patrones de flujo de superficie, se utilizaron imágenes de Spot 6 y 7 (© CNES 2017, Distribución Spot Image S.A.) e Ikonos. Las imágenes SPOT fueron provistas por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales de Argentina (CONAE) y distribuidas por SPOT Image S.A. Las imágenes Spot 6 y 7 tienen una resolución espacial de 6 m y 1,5 m en modos multiespectral y pancromáticos, respectivamente. Las imágenes de Ikonos (obtenidas de Google Earth®) tienen una resolución de 4 m en modo multiespectral. El sistema de referencia adoptado para procesar las imágenes fue UTM

20S con WGS84 y se utilizaron técnicas de filtrado lineal para mostrar los patrones de flujo de la confluencia.

Además de la campaña del día 13/08/2013 en la que se registraron una importante cantidad de datos con ADCP y CTD, se realizaron otros trabajos de campo los días 07/06/2016, 08/03/2016 y 08/11/2016 en donde se midió caudal, temperatura y conductividad en cada tributario. Mediante esta información se calculó las diferencias de densidad y las relaciones de momento, que permitieron la interpretación de los procesos de mezcla en la confluencia mediante el análisis de las imágenes de satélite tomadas los días 17/06/2016, 12/03/2016 y 04/11/2016.

#### 4.3.3. Resultados

La Tabla 37 muestra los parámetros hidráulicos para las condiciones hidrológicas existentes en la campaña realizada el día 13/08/2013, donde la relación de momento fue de 0,25 ( $M_r = \rho_s Q_s U_s / \rho_T Q_T U_T = 0,25$ ), la capa de corte intercepta a la margen exterior de la curva unos pocos metros aguas abajo de la confluencia (84 m desde la zona de estancamiento hasta la intersección de la capa de corte con el banco exterior, ver Figura 74). Esto indica que el río Saladillo ingresa a la confluencia por debajo del río Tercero, formando así una corriente de densidad.

**Tabla 37.:** Parámetros hidráulicos de la confluencia en la campaña del 13/08/2013.

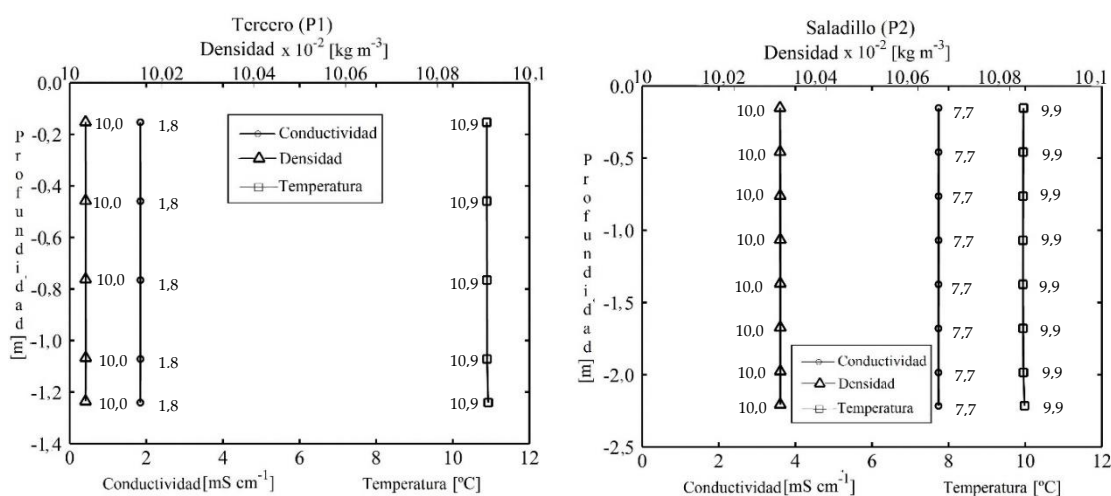
Parámetro	Unidad	Tributario	Valor
Caudal ( $Q$ )	$[m^3s^{-1}]$	Tercero	19,9
		Saladillo	10,5
Ancho ( $B$ )	$[m]$	Tercero	40
		Saladillo	33
Área ( $A$ )	$[m^2]$	Tercero	38
		Saladillo	42
Profundidad media del flujo ( $H_{med}=A/B$ )	$[m]$	Tercero	0,9
		Saladillo	1,3
Velocidad Media ( $U$ )	$[ms^{-1}]$	Tercero	0,52
		Saladillo	0,25
Numero de Reynolds ( $Re_i$ )	Adimensional	Tercero	$4,7 \times 10^5$
		Saladillo	$3,3 \times 10^5$
Numero de Froude ( $Fr_i$ )	Adimensional	Tercero	0,18
		Saladillo	0,07
Densidad ( $\rho$ )	$kgm^{-3}$	Tercero	1000,4
		Saladillo	1003,0
Relación de Momento ( $M_r$ )	Adimensional		0,25

La pendiente de la superficie libre del río Tercero, considerado como el tributario principal para la condición analizada, fue de 0.18 ‰ y se mantuvo constante aguas abajo

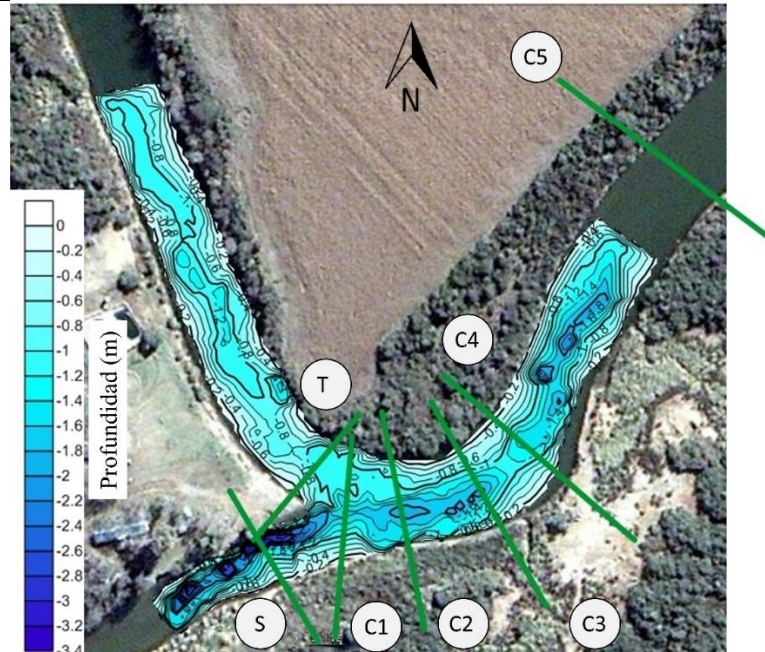


de la confluencia. Se observó un efecto de remanso en el tributario secundario con momento más bajo (río Saladillo) para las condiciones de flujo analizadas, además, se evaluaron los perfiles de conductividad eléctrica y temperatura para cuantificar las diferencias de densidad. La temperatura del agua y la conductividad eléctrica del río Tercero fue 10,9°C y 1,8 mS/cm, mientras que los valores registrados en el río Saladillo fueron de 9,9°C y 7,7 mS/cm, respectivamente (Figura 76). El valor de conductividad eléctrica del río Saladillo es, por lo tanto, más de cuatro veces mayor que la del río Tercero. Los valores conductividad y temperatura se usaron, luego, para calcular la densidad del agua de cada tributario (Figura 76). Los datos de densidad obtenidos en la vertical muestran que el río Saladillo tiene una mayor densidad que el río Tercero, pero no se observaron gradientes de densidad vertical en ninguno de los dos ríos.

La morfología de la confluencia (Figura 77) muestra que las mayores profundidades se encuentran en la margen izquierda del río Saladillo aguas arriba de la confluencia (producto de una intervención antrópica que consistió en un aumento en la profundidad de una parte de la sección transversal para mejorar la capacidad de descarga del río), que alcanza una profundidad máxima de 3,4 m. Esta zona de profundidad máxima posteriormente se une a una socavación en el centro de la confluencia. En la margen izquierda, aguas abajo de la confluencia, la elevación del lecho es mayor que margen derecha, lo cual es típico de flujo en curvas. Esta región de máxima profundidad se mueve hacia el centro del río.



**Figura 76.:** Perfiles de conductividad, temperatura y densidad del agua medidos en los ríos Tercero y Saladillo (puntos P1 y P2, ver Figura 74)



**Figura 77.:** Batimetría de la confluencia.

Con respecto a la composición del lecho, la distribución del tamaño del grano se determinó mediante el tamizado y el método del hidrómetro (Díaz Lozada, 2014) utilizando el sistema unificado de clasificación del suelo (USCS). Los resultados obtenidos para el río Saladillo y el río Carcarañá muestran una D50 de 0,1 mm, correspondiente a la arena limosa.

En las ocho secciones transversales en la confluencia (Figura 78) se determinaron las velocidades medias en la vertical mediante el programa VMT. El análisis de la información procesada muestra que el núcleo de velocidad máxima se encuentra cerca de la margen interna de la curva (secciones T, C1 y C2). Luego este núcleo de velocidad máxima se desplaza a la margen externa de la curva (secciones C3 y C4), mostrando una hidrodinámica típica de flujo en curvas. En las secciones S y C1, se observan bajas velocidades aguas arriba de la capa corte, debido a la existencia de una zona de estancamiento en el vértice de la confluencia y el efecto de remanso producido en el río Saladillo. La ubicación de la capa de corte se define por el fuerte gradiente de velocidad entre los dos flujos confluyentes, y marca la línea en la que el tributario más denso (río Saladillo) ingresa a la confluencia por debajo del tributario menos denso (río Tercero). Una deflexión del flujo se observa donde los flujos se unen y se manifiesta aguas abajo de la confluencia por el cambio en la dirección de los vectores de velocidad. En las

secciones transversales C1 y C2, los vectores de velocidad todavía no se han alineado completamente con la dirección del río, pero en las secciones transversales C3 y C4, están completamente alineados. Estos resultados no proporcionan evidencia de recirculación de flujo, o separación de flujo, aguas abajo de la confluencia, aunque la presencia de una barra en esta región puede evitar de separación de flujo (Best, 1988).

Para analizar la diferencia entre el campo de velocidades cercano al lecho y el flujo cercano a la superficie, se han graficado los vectores de flujo promediados en la vertical para dos regiones de flujo (desde la superficie hasta una profundidad de 1,2 m y desde de 1,2 m de profundidad hasta el lecho del río; Figura 79). En la Figura 79). se muestra que el flujo proveniente del río Saladillo en la sección transversal C1 se mueve cercana de lecho, moviéndose a través de la zona de socavación. Este patrón de flujo es una manifestación de que el tributario más denso forma un flujo inferior que se mueve a través del canal y puede generar flujos helicoidales.

Las secciones C1 y C2 (Figura 80) muestran que el río Saladillo ingresa a la confluencia fluyendo por debajo del río Tercero, y que la capa de corte se desplaza hacia la margen interna (izquierda) a mayores profundidades debido a la diferencia de densidad. En la sección C3 se observa (Fig. 8) se observa la capa de corte que genera el saladillo fluyendo debajo del Tercero.

Los campos de velocidades en cada sección transversal muestran claramente que cuando el río Tercero ingresa a la confluencia, su flujo es similar al reportando en la literatura para flujos en curvas. En la sección transversal T, el núcleo de máximas velocidades correspondientes al río Tercero está ubicado en el la margen interna (izquierda) (Figura 81 T), mostrando patrón de flujo típico de velocidades secundarias (flujo secundario cercano a la superficie en dirección hacia la margen externa y flujo secundario cercano a la superficie en dirección a margen interna). Los patrones de corrientes secundaria se calcularon utilizando el método ZSD (Zero Secondary Discharge; Parsons et al., 2013). Aguas arriba de la confluencia, el río Saladillo posee bajas velocidades (Figura 81) debido al efecto de remanso producido por la diferencia de densidad. En la sección C1 (Figura 81), el núcleo de velocidad máxima todavía se encuentra en la margen interna de la curva, pero los vectores de corriente secundaria muestran que el río Saladillo fluye por debajo del río Tercero y produce una aceleración

de las mismas en esa zona. Además, la intrusión del río Saladillo intensifica las corrientes secundarias generadas por el flujo dentro de la curva. En la sección transversal C2, se observa la aceleración de los vectores de corriente secundaria mencionada anteriormente. Aguas abajo, en la sección transversal C3 (Figura 81), el núcleo de velocidad máxima comienza a desplazarse hacia la margen externa de la curva, y en la sección transversal C4 este núcleo está localizado completamente en la margen externa. En la sección transversal C4, se puede observar también un patrón de flujo típico de corriente secundaria en curvas. En las secciones transversales C4 a C5, la circulación secundaria se ha invertido, y esto no es explicado por las diferencias de densidad, sino más bien por la ligera inversión de la curvatura a través de C4 a C6. Más abajo, en la sección transversal C6 que se encuentra en un tramo recto, las velocidades máximas se ubican cerca del centro de la sección transversal.

Fischer et. al. (1979) indica que la longitud de mezclado requerida para lograr una desviación máxima del 5% en el valor de la concentración (temperatura, conductividad) está dada por:

Ec. 55

$$L_m = 0.3 \frac{UB^2}{\varepsilon_t}$$

donde U y B son la velocidad media y el ancho del río aguas abajo de la confluencia, respectivamente. El coeficiente de mezcla transversal,  $\varepsilon_t$  para una curva se calcula de acuerdo con Fischer et. al. (1979) como:

Ec. 56

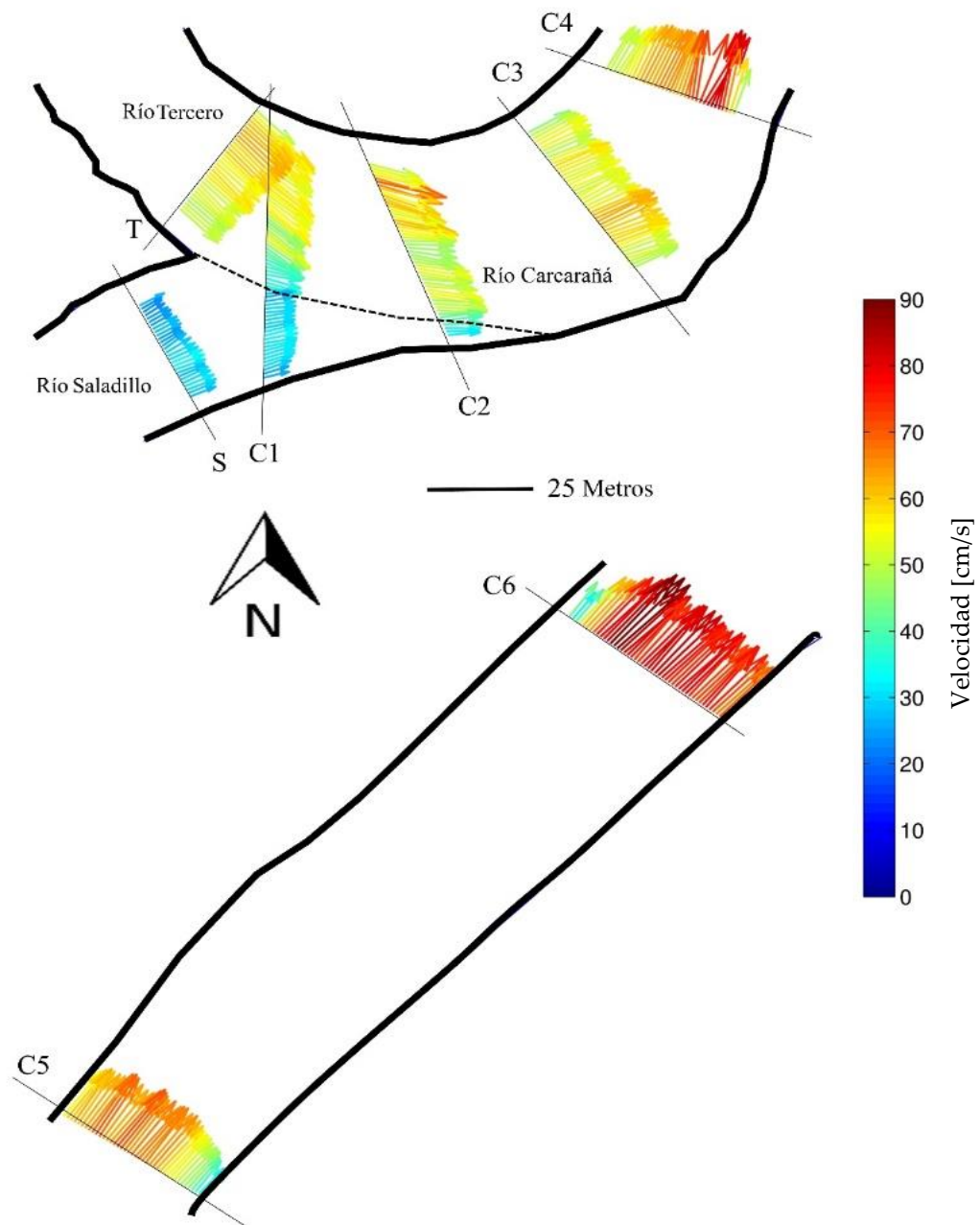
$$\varepsilon_t = 25 \frac{U^2 H^2}{R_d^2 u^*}$$

donde H es la profundidad media aguas abajo de la confluencia, R es el radio de la curva y  $u^*$  es la velocidad de corte determinada como (García, 2006):

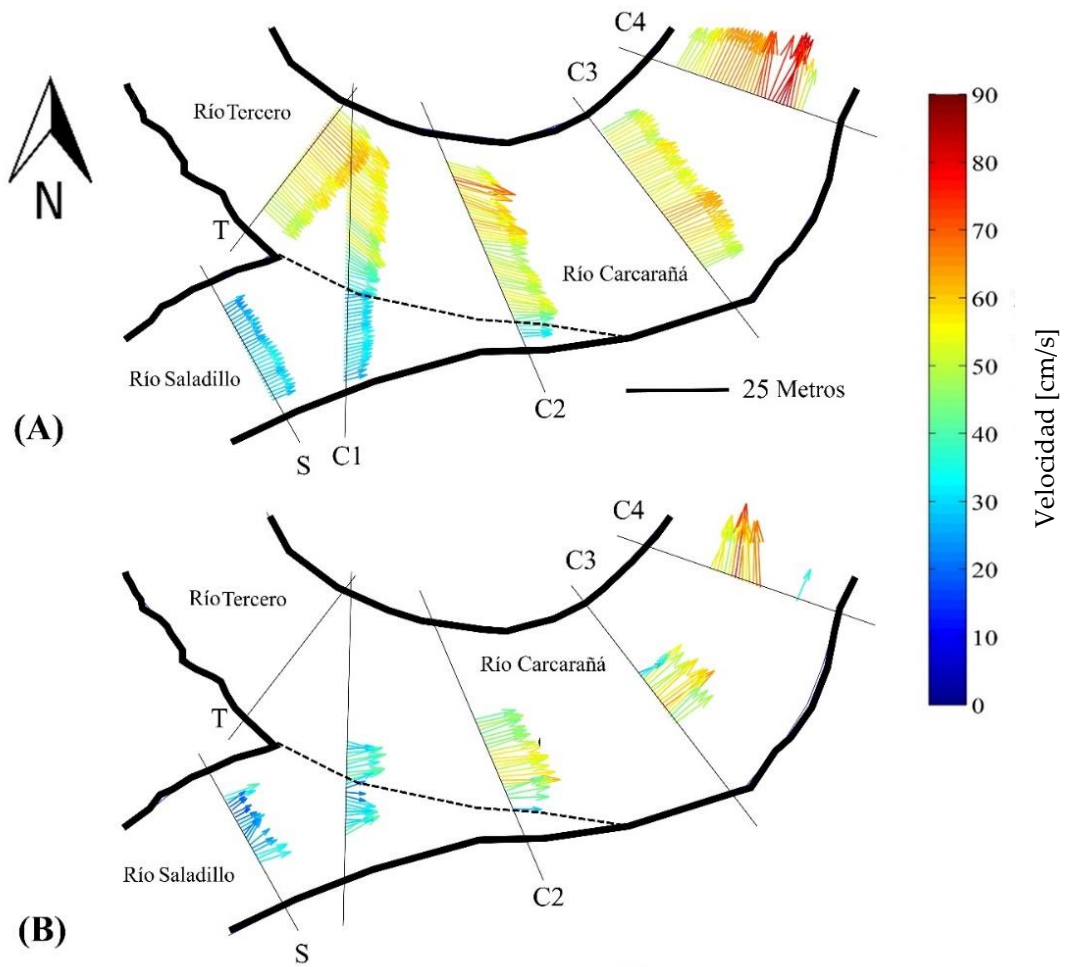
Ec. 39

$$u^* = \sqrt{g \cdot H \cdot S}$$

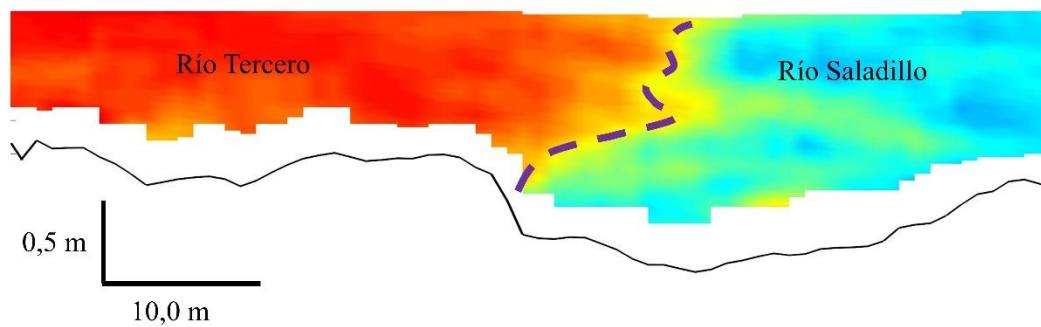
donde g es la aceleración debida a la gravedad y S es la pendiente de la energía (superficie del agua).



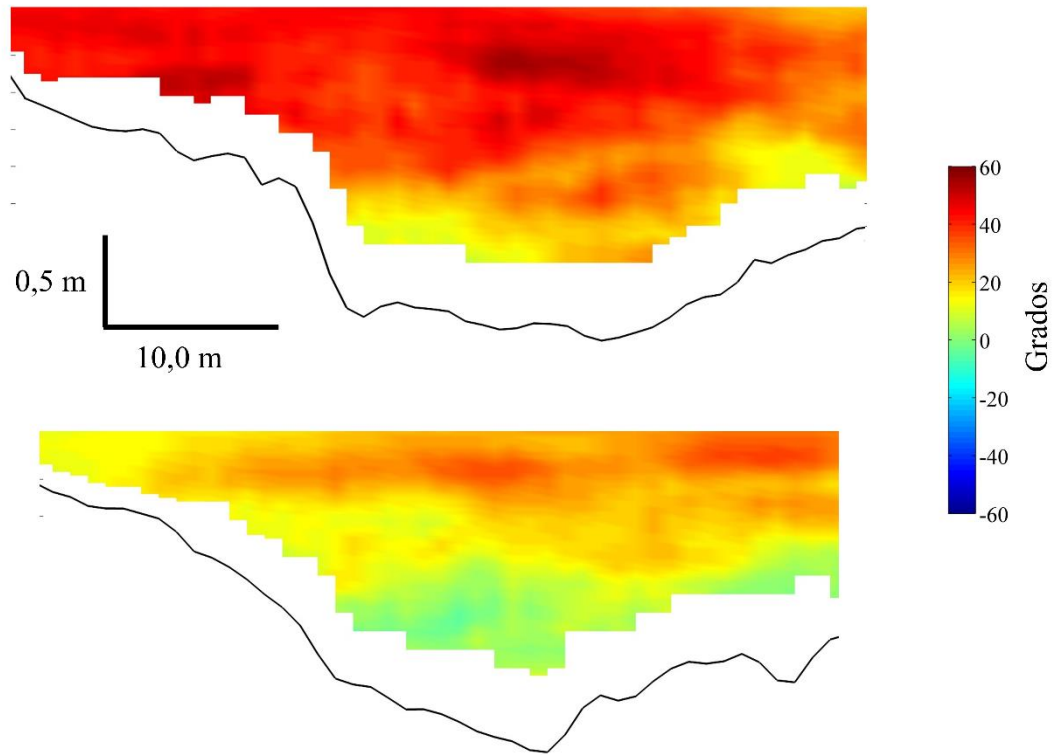
**Figura 78.:** Velocidad promediada en la vertical en la zona de la confluencia de los ríos Tercero y Saladillo.



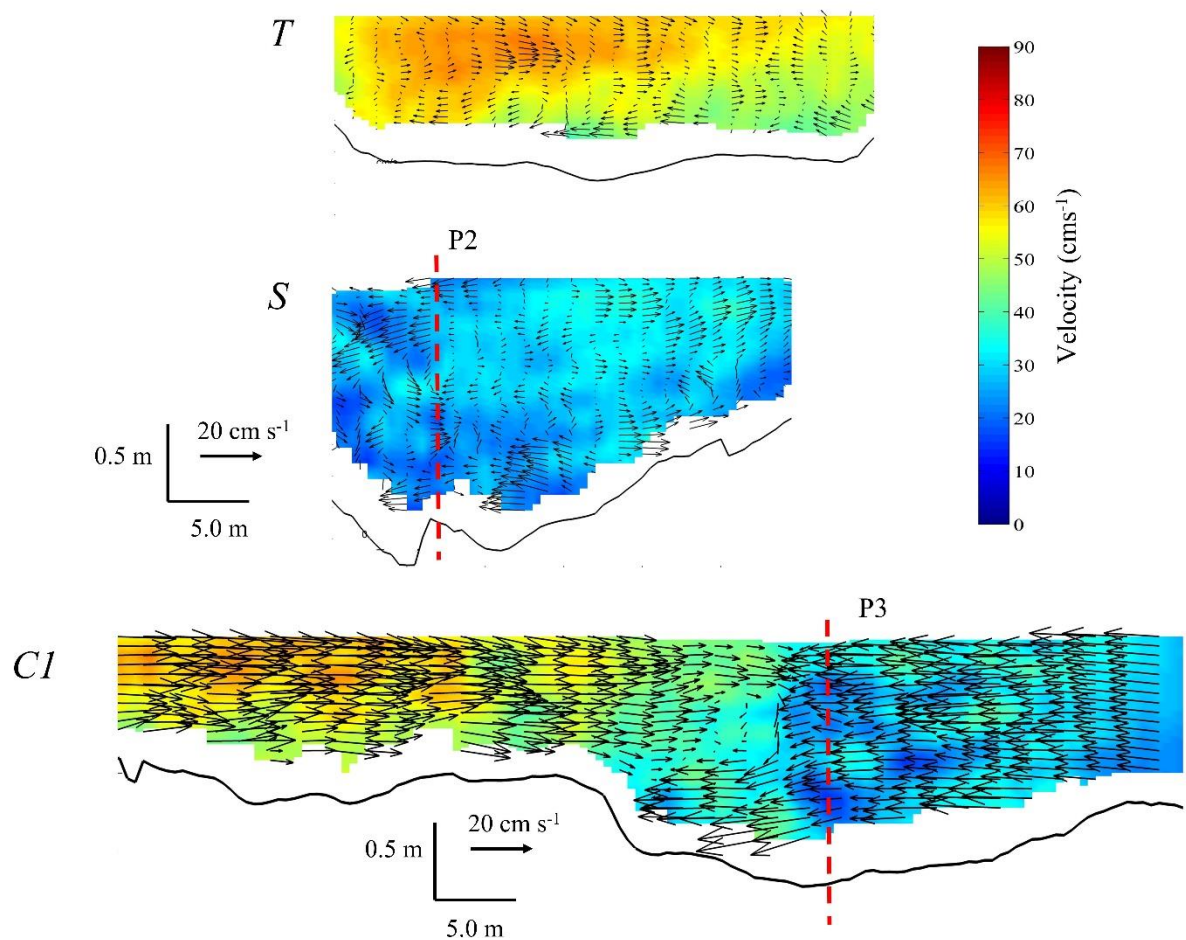
**Figura** promediada en la vertical en dos regiones de flujo. (A) Desde la superficie **79.:** Velocidad hasta 1,2 m y (B) desde 1,2 hasta el fondo del lecho.

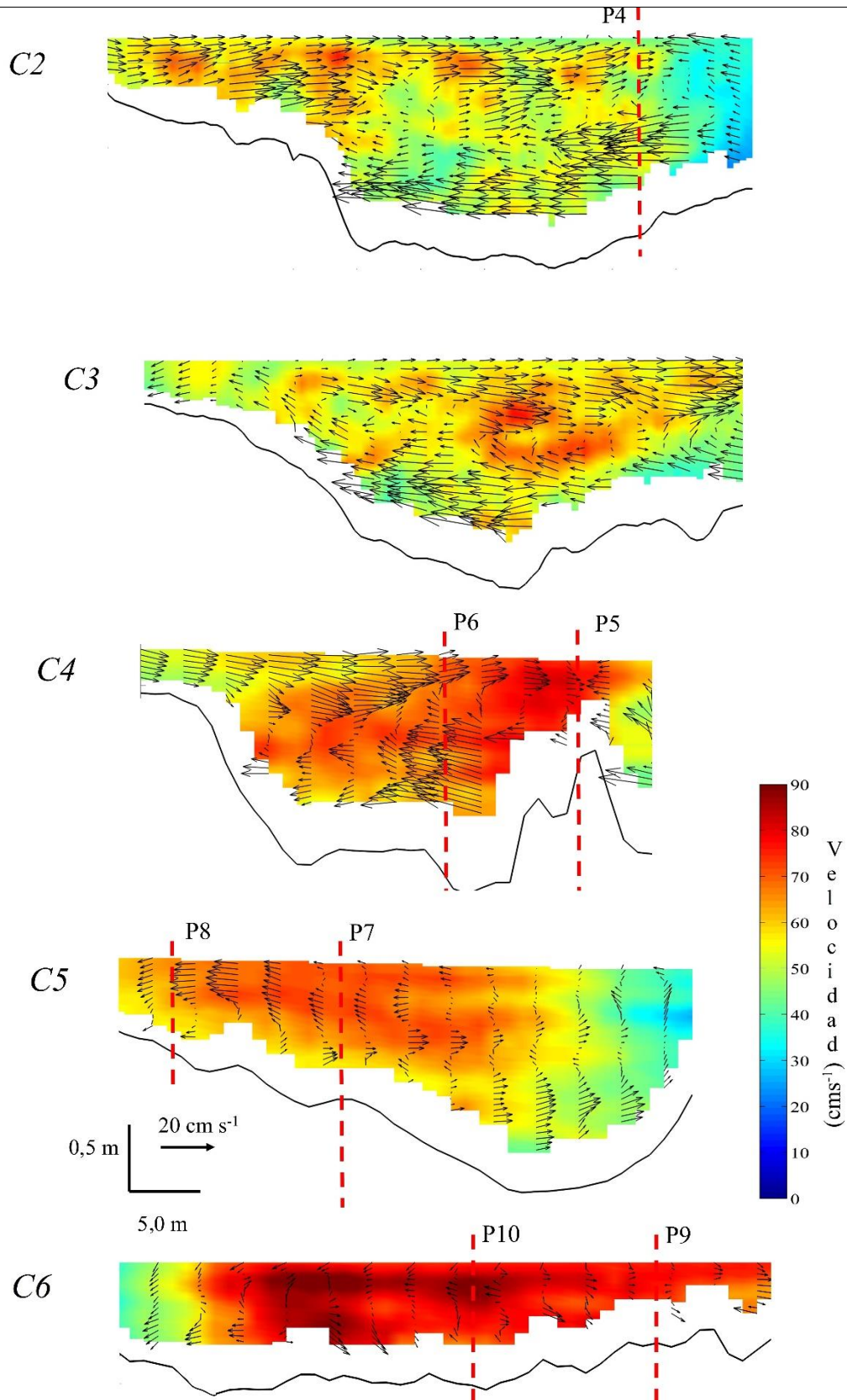






**Figura 80.:** Dirección del flujo respecto a la dirección principal media del flujo en cada sección transversal





**Figura 81.:** Magnitud de velocidad y vectores de corrientes secundarias calculadas con el método ZSD en cada sección transversal.



En la Tabla 38 se resumen los valores de todos los parámetros utilizados para determinar la longitud de mezcla basada en las mediciones realizadas. La pendiente de la superficie del agua se asumió igual a la medida aguas abajo de la confluencia.

**Tabla 38.:** Parámetros hidráulicos medidos aguas abajo de la confluencia y utilizados para calcular la longitud de mezcla teórica

	<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
$R$	Radio de curvatura	[m]	65
$U$	Velocidad media aguas abajo	[m/s]	0,55
$H$	Profundidad media aguas abajo	[m]	1,1
$B$	Ancho	[m]	49
$S$	Pendiente		0,00018
$g$	Gravedad	[m/s <sup>2</sup> ]	9,81
$u_*$	velocidad de corte	[m/s]	0,044
$\varepsilon$	Coefficiente de mezcla transversal	[m <sup>2</sup> /s]	0,055
$L_m$	<b>Long de mezcla</b>	<b>[m]</b>	<b>7278</b>

Con el fin de evaluar experimentalmente la longitud de mezcla aguas abajo de la confluencia, se registraron perfiles de temperatura y de conductividad eléctrica en diferentes sitios (Figura 82). El perfil P3 (ubicado en la capa de corte, ver la Figura 74) muestra que los tres puntos más profundos, ubicados en la sección transversal C1, tienen un valor de conductividad igual a la conductividad del río Saladillo (7,7 mS/cm) y este valor disminuye a 2,4 mS/cm en la superficie del agua. Un comportamiento similar está presente en el perfil P4 cerca de la margen externa de la curva y ubicado en la capa de corte, y esta característica se debe a la intrusión de flujo de mayor densidad (río Saladillo) debajo del flujo de densidad más baja (río Tercero). Los perfiles P5 y P6 muestran que se ha alcanzado la mezcla vertical en P5, pero no en P6, donde aún es posible ver la intrusión del río Saladillo.

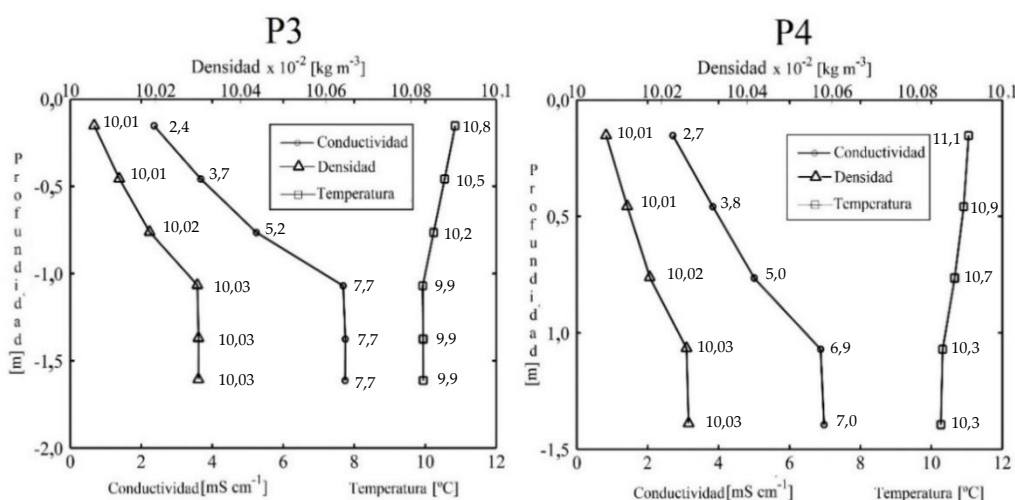
Los perfiles P7 y P8, ubicados en la sección transversal C5, muestran que se ha alcanzado la mezcla completa en la vertical debido a la similitud de los valores de conductividad en cada perfil, pero no se ha completado la mezcla en la transversal debido a que existe una diferencia significativa entre los valores de conductividad registrado en ambos perfiles. Finalmente, en los perfiles P9 y P10 (sección transversal C6), los valores de conductividad y temperatura son uniformes tanto en dirección

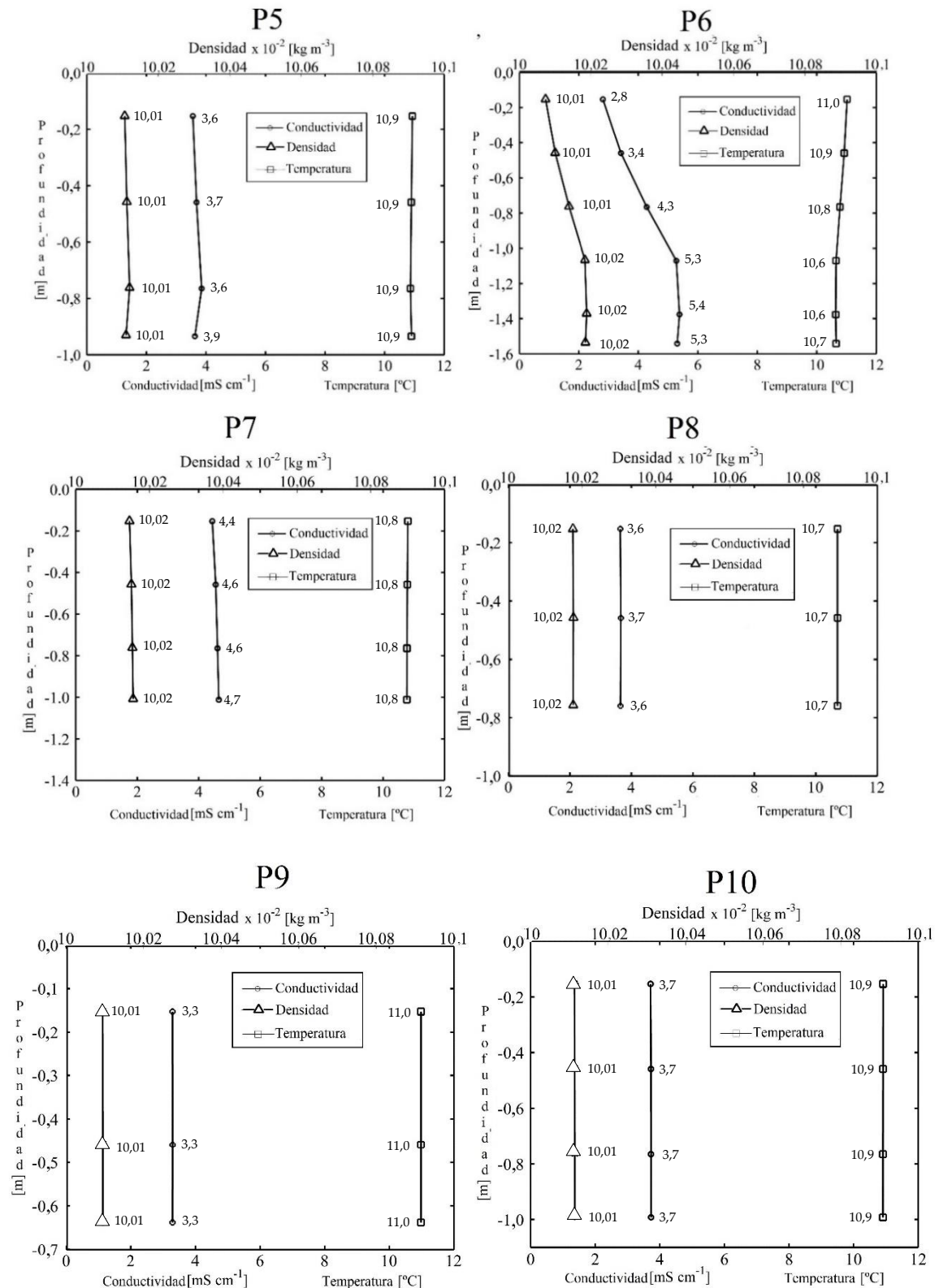
vertical como transversal, indicando que se ha logrado una mezcla completa en el río Carcarañá aproximadamente 450 m aguas abajo del vértice de la confluencia.

La longitud requerida estimada para lograr una mezcla completa utilizando las Ec. 55, Ec. 56 y Ec. 39 es 7,28 km, es decir, un orden de magnitud mayor que la longitud observada de 450 m. Sin embargo, las relaciones propuestas por Fischer et. al. (1979) suponen (i) flujo uniforme y velocidades constantes en todo el dominio, y (ii) mezcla completa en la dirección vertical y ninguna diferencia de densidad entre los flujos convergentes, hipótesis que no son aplicables en esta confluencia.

Durante el proceso de mezcla de los flujos convergentes, primero se produce la mezcla vertical, con una escala de tiempo característica más baja que la mezcla transversal (con un ancho del río de 40 m y una profundidad media de 0,9 m,  $T_z / T_y = 1975.3 \epsilon_t / \epsilon_v$  donde  $T_z$  y  $T_y$  son los tiempos para lograr la mezcla completa en dirección vertical y transversal, y  $\epsilon_t$  y  $\epsilon_v$  son los coeficientes de dispersión transversal y vertical respectivamente). La mezcla vertical puede ser beneficiada por las corrientes secundarias inducidas por la curva.

Para cuantificar los efectos de las diferencias de densidad en la estimación de los patrones de mezcla en la confluencia, se puede utilizar el parámetro del flujo boyante ( $B_f$ ) reportado por Fischer et al. (1979). Este parámetro se define como el peso flotante del fluido que pasa a través de una sección transversal por unidad de tiempo.





**Figura 82.:** Perfiles de conductividad eléctrica y temperatura registrados con sonda CTD en diferentes sitios aguas abajo de la confluencia (ver la Figura 74 para localizaciones).

Ec. 57

$$B_f = \frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot g \cdot Q_e$$

donde  $\rho$  es la densidad del tributario principal (río Tercero aquí),  $\Delta\rho$  es la diferencia de densidad entre los afluentes y  $Q_e$  es la caudal del tributario secundario (río Saladillo en esta tesis). Estos parámetros dan lugar a dos grupos adimensionales:

Ec. 58

$$\frac{B_f}{H_{med}.u_*^3}$$

Ec. 59

$$\frac{B_f}{B.u_*^3}$$

Estas ecuaciones resumen la relación entre la influencia estabilizante del efluente por unidad de profundidad y de ancho, y la capacidad de mezcla disponible en el cuerpo receptor.

Los resultados obtenidos en laboratorio por Prych (1970) muestran que si  $\frac{B_f}{H_{med}.u_*^3} < 5$ , los efectos de las diferencias de densidad son insignificantes en la mezcla transversal, y los efectos de la diferencia de densidad son despreciables para describir la mezcla transversal. Los resultados obtenidos por Schiller y Sayre (1973) para mezcla vertical a partir de mediciones de laboratorio, indican que si  $\frac{B_f}{B.u_*^3} < 1$  la mezcla vertical será independiente de los efectos de la diferencia de densidad. A partir de los parámetros hidráulicos medidos en la confluencia para la condición de flujo presente el día de la campaña del 13/08/2013 (Tabla 37), y una diferencia de densidad entre los tributarios de 2,61 kg/m<sup>3</sup>, los valores de estos grupos adimensionales son  $\frac{B_f}{H_{med}.u_*^3} = 2866.80 > 5$ , y  $\frac{B_f}{B.u_*^3} = 64.35 > 1$ . Estos valores muestran así que los efectos de la diferencia de densidad no son insignificantes, y podrían explicar la rápida mezcla observada entre estos tributarios.

La Tabla 39 muestra los valores de caudal y densidad medidos en cada tributario para tres condiciones hidrológicas diferentes (07/06/2016, 08/03/2016 y 08/11/2016). En todos estos casos, el caudal del río Saladillo fue mayor que el del río Tercero ( $Mr > 1$ ). El 07/06/2016, la densidad del río Saladillo fue importante y la relación de momentos obtenida fue un poco mayor que la unidad, lo que produjo que la capa de corte intercepte

a la margen externa de la curva unos pocos metros aguas abajo de su entrada (140 m desde el punto de estancamiento a la intersección de la capa de corte con la margen exterior, ver la Figura 83 A el 13/08/2013). En las campañas de los días 03/08/2016 y 11/08/2016, la densidad del río Saladillo es mayor que el río Tercero, y la relación de momento es significativamente mayor que 1, lo que produce que la capa de corte se desplace hacia el centro de la confluencia el 03/08/2016 (Figura 83 B) o hacia la margen interna de la curva, como en la campaña del 11/08/2016 (Figura 83 C).

**Tabla 39.:** Caudal y densidad de cada tributario de la confluencia (días 07/06/2016, 08/03/2016 y el 08/11/2016)

	Parámetros	Unidad	Tributario	Valor
06/07/2016	Caudal ( $Q$ )	$[m^3s^{-1}]$	Tercero	45,7
			Saladillo	68,2
	Densidad ( $\rho$ )	$[kgm^{-3}]$	Tercero	1000,6
			Saladillo	1003,2
03/08/2016	Caudal ( $Q$ )	$[m^3s^{-1}]$	Tercero	122,4
			Saladillo	224,4
	Densidad ( $\rho$ )	$[kgm^{-3}]$	Tercero	997,8
			Saladillo	998,9
11/08/2016	Caudal ( $Q$ )	$[m^3s^{-1}]$	Tercero	23,2
			Saladillo	119,4
	Densidad ( $\rho$ )	$[kgm^{-3}]$	Tercero	998,9
			Saladillo	1000,4

#### 4.3.4. Análisis de los resultados

La comparación entre el modelo conceptual de una confluencia en curva propuesto por Roberts (2004, Figura 73) y los patrones hidrodinámicos observados en esta tesis (cuando las diferencias de densidad son importantes y la relación de momento es menor a 1) muestran varias similitudes y diferencias. En ambos casos, existe una zona de estancamiento cerca del vértice de la confluencia, pero el modelo de Roberts (2004) indica una región de separación de flujo aguas abajo de la unión, una característica que no se observó en la campaña realizada. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que Roberts (2004) utilizó canales sin sedimentos y que en la confluencia estudiada hubo una barra con una mayor elevación que el resto del lecho circundante. En la confluencia en curva con diferencias densidad estudiada aquí, junto a una baja relación de momento, la capa de corte se cierra en la margen derecha del río Saladillo y, por lo tanto, la única forma en

que el flujo del mismo pueda entrar en la confluencia es por debajo del río Tercero. Debido a este fenómeno, se generó una zona de remolinos en la superficie del flujo, lo que probablemente afectó las longitudes y tiempo de mezcla en la confluencia. En esta zona, la mezcla vertical del río Saladillo produce una aceleración del proceso de mezcla. Tal mezcla no se informa en el modelo de Roberts (2004) porque esta característica se genera por la diferencia de densidad entre los tributarios. Cuando el caudal del río Saladillo es alto y la relación de momento es mayor que la unidad, la confluencia presenta un comportamiento similar al reportado por Riley y Rhoads (2012).



**Figura 83.:** Imágenes de la confluencia de los ríos Tercero (Ctalamochita) y Saladillo los días: (A) 17/06/2016, con mediciones de campo el 07/06/2016; (B) 12/03/2016, con mediciones de campo el 08/03/2016 y (C) 04/11/2016, con mediciones de campo el 08/11/2016.

La principal diferencia entre los resultados obtenidos en la confluencia de estudio y los reportados por Riley y Rhoads (2012) es que en este estudio previo la capa de corte se ubica aproximadamente en el centro de la confluencia y su posición varía acorde con la relación de momento, además no la misma no se intercepta con ninguna margen. En el caso en el que la capa de corte intercepte una margen en los casos de tributarios de igual densidad, el flujo del tributario secundario se bloquearía, causando un efecto de remanso importante hasta que haya suficiente gradiente de presión para forzar a la capa de corte a desplazarse de la margen. En el presente estudio, la diferencia de densidad produce que el un río escurra por debajo del otro, lo que produce un efecto de remanso algo limitado. Debido a esto en la confluencia del río Tercero - Saladillo, cuando la relación de momentos es baja ( $<1$ ), el río Saladillo fluye por debajo del río Tercero evitando que se genere el gradiente suficiente para desplazar la capa de corte hacia el centro de la sección. Si se comparan los resultados obtenidos en esta tesis con los resultados de Lane et al. (2008) en la confluencia de los ríos Paraná y Paraguay (donde las diferencias de densidad son producidas por la alta concentración de sedimentos del río Paraguay), la mezcla es más rápida cuando el caudal del río Paraguay es alto, ya que en esta condición el río tiene una mayor concentración de sedimentos y por ende mayor densidad, y por lo tanto fluye por debajo del río Paraná. En el caso del trabajo de Lane et al. (2008) además de manifestarse los efectos de la diferencia de densidad los para altas relaciones de momento, aquí la diferencia de densidad se debe a la alta carga de sedimentos, mientras que en la confluencia de estudio de esta tesis se debe a la concentración de sales disueltas en el agua.

Los resultados presentados aquí pueden tener importantes implicaciones para la dispersión de sedimentos y la morfodinámica de dichos sitios. La capacidad de un flujo denso para favorecer el transporte de sedimentos aguas abajo de la confluencia puede proporcionar una hidrodinámica diferente a los modelos tradicionales confluencia (Best y Rhoads, 2008) ya sea en presencia o ausencia de topografía del lecho. Los modelos existentes de confluencia a menudo discuten que la presencia de células de corriente secundaria, pueden ser producidas por sobre elevación de la superficie libre en el centro de la confluencia, curvatura de las líneas de corriente o los efectos de la topografía (por

ejemplo, Mosley, 1976; Best, 1988; Rhoads y Kenworthy, 1995; Rhoads, 1996; Best y Rhoads, 2008). Los datos reportados aquí (Figura 80 y Figura 81) muestran el movimiento del fluido y, por lo tanto, potencialmente el movimiento de sedimentos en suspensión y el transporte de la carga de fondo a través del canal. Esto puede potencialmente negar, o modificar, la presencia de células de flujo secundarias 'helicoidales' de este tributario y permitir el transporte de sedimentos, como carga de fondo o suspendida, a través de la confluencia y no que se segreguen en diferentes sitios en el centro de confluencia como se ha sugerido en trabajos anteriores donde las diferencias de densidad están ausentes (Best, 1988; Boyer et al., 2006). De hecho, en la sección transversal C1 (Figura 81), se puede ver que el flujo cerca del lecho se mueve a través del canal en el área de socavación, donde trabajos previos sugirieron la segregación de sedimentos de cada afluente (Best, 1988; Boyer et al., 2006). Estos patrones de flujo también pueden tener una influencia significativa en la mezcla de nutrientes y contaminantes en las regiones donde los flujos de densidad están presentes.



---

## **Capítulo V**

## **CONCLUSIONES**

---

## 5.1. Introducción

En esta tesis se realizaron **“Avances en la cuantificación hidrológica y la caracterización hidráulica del flujo superficial en el sistema fluvial del río Carcarañá utilizando Perfiladores de Corrientes Acústicos Doppler (ADCP)”**. Para cumplimentar el objetivo general propuesto, fue necesario, optimizar metodologías y estrategias de registro de datos con ADCP. El sistema fluvial fue seleccionado en virtud de su importancia regional ya que se lo utiliza para múltiples acciones como abastecimiento de agua potable, volcamiento de efluentes, extracción de áridos, riego y recreación. A pesar de su gran importancia y extensión, la información hidrológica e hidráulica existente al momento de iniciar esta tesis era escasa.

Las principales contribuciones originales de la tesis se desarrollaron en las siguientes áreas temáticas:

- (A) Desarrollo y optimización de técnicas y métodos experimentales.
- (B) Cuantificación hidrológica y desarrollo de herramientas para la gestión del recurso hídrico superficial en la cuenca del río Carcarañá
- (C) Caracterización hidrodinámica de flujos complejos en el sistema fluvial del río Carcarañá para cuantificar los procesos de mezcla

En las secciones 5.2 a 5.4 se detallan las principales contribuciones originales en cada área temática.

Además de las contribuciones originales, en esta tesis se realizaron aportes técnicos fundamentales para la gestión de los recursos hídricos superficiales en la cuenca del sistema fluvial de estudio. Durante el desarrollo de esta tesis doctoral: a) se elaboraron recomendaciones en cuanto a las técnicas hidro-acústicas óptimas para medir caudales en el sistema fluvial de estudio para distintas condiciones de flujo como así también los programas computacionales de procesamiento requeridos; b) se registraron una importante cantidad de datos de caudal en diferentes localizaciones de la cuenca de estudio. El total de mediciones realizadas por el autor de esta tesis fue 260 (98 realizadas durante su tesis de maestría y 162 durante el desarrollo de la tesis doctoral) durante 66 campañas de medición que incluyen condiciones de aguas bajas, medias y altas; c) se elaboraron recomendaciones para operar y modificar órganos de evacuación de las preesas existentes en el sistema para evitar inundaciones en los sectores ribereños a los

embalses y en los tramos aguas abajo. Dichas recomendaciones consisten en regular el caudal saliente del embalse, en base a las predicciones meteorológicas realizadas con 3 días de antelación, de manera tal de generar un volumen suficiente para poder laminar la crecida entrante y operar los órganos de evacuación de las presas para erogar menos de 200 m<sup>3</sup>/s; d) se determinaron caudales de diseño de medidas no estructurales para mitigar el riesgo hídrico (líneas de ribera), en distintos tramos fluviales; e) se ajustaron curvas que relacionan los valores esperados de altura de superficie libre y el caudal escurrido, las cuales fueron intensamente utilizadas durante periodos de emergencia hídrica para determinar la altura que alcanzaría el río con los caudales erogados por las presas, y generar las defensas y evacuaciones de las viviendas correspondientes; f) se instalaron diez estaciones automáticas de altura de superficie libre en secciones de interés en el sistema fluvial de estudio: Saladillo (Río Saladillo), Azud San Marcos (Río Tercero), Cruz Alta (Río Carcarañá), Inrville (Río Carcarañá), Tortugas (Arroyo homónimo), Santa Rosa de Calamuchita (Río Santa Rosa), Villa Quillinzo (Río Quillinzo), La Cruz (Río La Cruz), Las Albahacas (Río Piedra Blanca), y Alpa Corral (Río Barrancas), que permiten monitorear en tiempo real los caudales escurridos en el sistema de estudio mejorando significativamente la información disponible. Por último, pero no menos importante, en esta tesis se realizaron actividades de divulgación lo que permitió difundir parte de los conocimientos generados durante el desarrollo de la tesis (cuenca como territorio para la planificación integral de los recursos hídricos, importancia de las mediciones, etc.) a la sociedad quien fue la que ha financiado mis estudios de posgrado y quien demanda transferencia de conocimientos. Se concluye que este tipo de actividades complementa la formación del estudiante, le permite conocer lo que la sociedad espera de él y por qué no enriquecer su investigación con los aportes de ciencia ciudadana.

## **5.2. Principales conclusiones y contribuciones originales en relación con el desarrollo y optimización de técnicas y métodos experimentales**

Las contribuciones originales de esta tesis en relación con esta temática se desarrollaron en un trabajo conjunto con investigadores del Programa hidroacústica de la Oficina de Agua Superficial (OSW) del Servicio Geológico de los Estados Unidos

(USGS). Este programa es uno de los más importantes a nivel mundial en el cual se definen protocolos de medición recomendados para todas las técnicas hidroacústicas (entre las que se incluyen a los ADCP utilizados en esta tesis) que luego son implementados no solo en el Estados Unidos sino también en diferentes países de Europa, Oceanía y América. En los últimos 5 años, el tesista ha interactuado intensamente con investigadores que integran este programa del USGS a través de videoconferencias periódicas y personalmente a través de una estadía de investigación en Estados Unidos. Las principales contribuciones originales de estas tesis generadas en esta interacción y reportadas en esta tesis están relacionadas a:

- (A) Determinación del tiempo óptimo de medición en mediciones estacionarias con ADCP.
- (B) Estimación de la incertidumbre en mediciones de caudal con ADCP desde plataformas móviles mediante el uso de métodos computacionales.
- (C) Evaluación interinstitucional en campo de métodos y técnicas experimentales a través de Regatas de Medición de caudal.

En lo que se refiere a la **“Determinación del tiempo óptimo de registro en mediciones estacionarias de caudal con ADCP”**, en la actualidad los protocolos de medición del USGS recomiendan un tiempo de registro fijo para las mediciones estacionarias de 40 segundos (30 segundos en el caso de Argentina) en cada localización sin tener en cuenta las condiciones locales del flujo (magnitud de los valores medios y de las fluctuaciones de velocidad del flujo, profundidades, etc.). En esta tesis se presentó un nuevo desarrollo (en conjunto con el USGS) en la determinación del tiempo óptimo de medición en mediciones estacionarias con ADCP utilizando la técnica “Moving Block Bootstrap” (MBB). Esta novedosa metodología, se aplicó utilizando series temporales de los promedios de velocidades en la vertical registrados con ADCP. En todos los casos analizados se observó una reducción de entre un 30 y 48% del tiempo de medición requerido respecto a la normativa original (que indica que se debe medir 40 segundos). Otra ventaja que posee la metodología propuesta es que permite detectar fácilmente errores en las mediciones, los cuales se manifiestan mediante un coeficiente de variación (CV) alto de los valores medidos de velocidad.

Con respecto a la **“Estimación de la incertidumbre en mediciones de caudal con ADCP desde plataformas móviles mediante el uso de métodos computacionales”**, se evaluaron con colegas del USGS desarrollos recientes en el estado del arte, en particular se trabajó con un reciente desarrollo llamado QUant que determina la incertidumbre de la medición completa de caudales con ADCP desde plataformas móviles (compuesta por múltiples transectas o cruces ) y se detectaron falencias que requerían nuevos desarrollos como, por ejemplo, el método empleado para estimar la incertidumbre de una medición completa de caudales con múltiples transectas, limitaciones computacionales (tiempos de ejecución extensos), y la necesidad de realizar un análisis de sensibilidad para evaluar las principales fuentes de incertidumbre. En esta tesis se presentaron nuevos desarrollos, realizados en conjunto con investigadores del USGS que superan las falencias detectadas. En particular en esta tesis se presenta un nuevo enfoque para la estimación de incertidumbre de una medición completa de caudales con múltiples transectas utilizando QUant que tiene en cuenta la correlación de ciertas variables a través de los distintos cruces o transectas dentro de la misma medición. Los valores de incertidumbre obtenidos con este nuevo desarrollo son mayores que los obtenidos sin considerar la correlación. De la aplicación de esta novedosa metodología a mediciones realizadas en el sistema fluvial del río Carcarañá se observó que las variables sumergencia y muestras perdidas son las que mas aportan a la incertidumbre de medicion por lo que se recomienda especial atención a las mismas al momento de efectuar aforos en el sistema. Actualmente se esta trabajando con el uso del método de muestreo “Latin Hypercube” que permite ahorrar un tiempo considerable de ejecución del programa computacional, ya que es necesario ejecutar 200 realizaciones con este método de muestre para obtener la misma dispersión en los resultados que utilizando 1000 realizaciones del método de muestreo de Montecarlo. Los valores de incertidumbre del método “Latin Hypercube” se encuentran dentro del intervalo de confianza de la incertidumbre obtenida con el método de Montecarlo aun utilizando un numero significativamente menor de simulaciones. Finalmente, el análisis de sensibilidad realizados con QUant muestra que las incertidumbres en las variables temperatura del agua, salinidad, declinación magnética y cabeceo tienen un bajo impacto en la incertidumbre total cuando se utiliza

la referencia de Seguimiento de fondo (“Bottom track”) por lo que es posible ejecutar el programa computacional sin ellas para ahorrar tiempo de cálculo.

Finalmente, en relación a la **“Evaluación inter-institucional en campo de métodos y técnicas experimentales a través de Regatas de Medición de caudal”**, se desarrolló por primera vez en Argentina, y en particular en el sistema de estudio, una regata de medición de caudales la cual contó con la supervisión de un especialista del USGS de Estados Unidos. Esta institución está trabajando intensamente en el desarrollo de estas actividades en Europa (Francia) y Oceanía (Nueva Zelanda) para evaluar las ventajas de su realización y en ese marco elaboraron publicaciones recientes en revistas internacionales que muestran a estas regatas como una herramienta muy útil para estimar empíricamente la incertidumbre de los métodos y técnicas de medición de caudales. Se espera preparar una publicación con los principales resultados de esta regata. Además de la evaluación de la incertidumbre en la medición de caudales, en esta tesis, el desarrollo de esta regata y los resultados que se obtuvieron durante la misma contribuyeron a cumplimentar el objetivo específico relacionado a “generar recomendaciones y sugerencias para el registro de datos con ADCP en el sistema de estudio” ya que durante la regata se utilizaron distintas técnicas e instrumentos (aspecto novedoso a las regatas realizaron en otros países en las que solo se utilizaron ADCP) con diferentes características que generaron mediciones con distintas incertidumbres. La regata fue organizada por el grupo de trabajo donde se desarrolló esta tesis y de ella participaron técnicos e investigadores de más de 10 prestigiosas instituciones a nivel nacional con 2 diferentes técnicas hidro-acústicas y técnicas por imágenes de partículas. Los resultados obtenidos de esta actividad (analizados por el autor de esta tesis) permitieron determinar las metodologías de medición óptimas con ADCP para el sistema fluvial de estudio y las incertidumbres asociadas a la implementación de cada una de las técnicas. La realización de esta actividad permitió un importante avance en la relación interinstitucional entre los organismos que realizan mediciones en el país.

### 5.3. Principales conclusiones y contribuciones originales en relación con la cuantificación hidrológica y desarrollo de herramientas para la gestión del recurso hídrico superficial en la cuenca del río Carcarañá

Como se comentó anteriormente en la sección 5.1, además de las contribuciones originales, en esta tesis se realizaron aportes técnicos fundamentales para la gestión de los recursos hídricos superficiales en la cuenca del sistema fluvial de estudio. La mayoría de los aportes técnicos mencionados fueron generados en esta área temática. Al analizar estos aportes técnicos se determinó que la capacidad de escurrimiento determinada experimentalmente fue significativamente menor a la prevista. Para evaluar las razones de esta diferencia se ha analizado la influencia de las formas de fondo en la rugosidad del cauce y en su capacidad de escurrimiento.

Las contribuciones originales de esta área temática están referidas principalmente a la evaluación en el sistema fluvial de estudio de la **“Rugosidad inducida por la presencia de formas de fondo”**. En el estado del arte, es muy común utilizar la ecuación de Van Rijn (1982) para la evaluación de la resistencia generada por las formas de fondo. Sin embargo, dicha formula proviene de un ajuste estadístico de datos experimentales sin contemplar la física del problema. En esta tesis se genera una nueva ecuación con base física para determinar la rugosidad generada por formas de fondo partiendo de la base que la resistencia por forma de fondo es producto del arrastre que causan las mismas al flujo. Además, se propone una nueva metodología para determinar en campo los efectos de la rugosidad de las formas de fondo sobre el flujo (para su optima parametrización) en base a medición de perfiles de velocidad con ADCP. Todos los desarrollos propuestos han sido evaluados con datos registrados específicamente en el sistema fluvial de estudio. Si bien los resultados obtenidos de rugosidad arrojan valores similares a los provistos por la ecuación empírica de Van Rijn (1982), la nueva ecuación presentada en esta tesis posee base física. En el desarrollo de este apartado se trabajó con colegas con amplia experiencia en la temática (acreditada con publicaciones en las principales revistas internacionales) del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental de la Universidad de la Republica, Uruguay y de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) de la Universidad Nacional del Litoral, en Santa Fe, Argentina.

Actualmente y sobre las bases de los resultados alcanzados en esta tesis se está elaborando un artículo para publicar en una revista científica con factor de impacto.

#### **5.4. Principales conclusiones y contribuciones originales en relación con la caracterización hidrodinámica de flujos complejos en el sistema fluvial del río Carcarañá para cuantificar los procesos de mezcla**

Las principales contribuciones realizadas por el tesista en este capítulo (que han sido publicadas en revistas internacionales) están relacionadas a:

- (A) Determinación del Coeficiente de Dispersión Longitudinal con ADCP en el sistema fluvial de estudio.
- (B) Evaluación de los procesos de mezcla en una confluencia fluvial en ríos con diferente densidad"

En lo que se refiere a la **“Determinación del Coeficiente de Dispersión Longitudinal con ADCP”** en esta tesis se implementa una novedosa metodología para tener una mejor estimación del coeficiente de dispersión longitudinal en los principales tributarios del sistema fluvial de estudio en base a mediciones de perfiles de velocidad con ADCP. La ventaja de la implementación de esta técnica es que es posible realizar una cuantificación de este coeficiente utilizando información registrada en las 260 mediciones de campo realizadas con ADCP en el sistema fluvial de estudio para condiciones de aguas bajas, medias y altas por lo que fue posible evaluar su comportamiento en las distintas secciones a medida que las condiciones de flujo cambian. Estas determinaciones no podrían realizarse con los métodos tradicionales (su implementación es costosa y laboriosa) y presentaría gran incertidumbre si se realizara con las ecuaciones empíricas que incluyen parámetros hidráulicos globales (gran incertidumbre). En la ejecución de este trabajo se interactuó con profesionales del área de calidad de agua del Ministerio de Servicios Públicos de la Provincia de Córdoba quienes realizan mediciones de calidad de agua en el sistema de estudio desde hace más de 15 años y con investigadores de la Universidad Nacional de Rosario. Los desarrollos realizados fueron publicados en la Revista “Ribagua” de la Asociación Internacional de Ingeniería e Investigaciones Hidro-Ambientales (IAHR) la cual cuenta con revisores



internacionales. Este artículo fue seleccionado como artículo seleccionado por el editor del año 2017 (Editor's choice article 2017") de esta publicación de la IHAR.

Finalmente, en lo que se refiere a la **"Evaluación de los procesos de mezcla en una confluencia fluvial en ríos con diferente densidad"** las contribuciones realizadas son originales y los contenidos de este capítulo fueron publicados en la reconocida revista científica internacional "Geomorphology". Estudios previos mostraron que cuando los flujos entrantes en una confluencia tienen una diferencia de densidad relativamente alta, estas pueden influir significativamente en el patrón de mezcla, y destacan que se requiere más investigación en la temática ya que los patrones y procesos de mezcla en tales condiciones no han sido completamente documentados. La confluencia seleccionada en el sistema fluvial de estudio (de gran relevancia en la región ya que en ella confluyen dos de los principales tributarios, los ríos Tercero -Ctalamochita- y Saladillo) presenta características particulares que resaltan las contribuciones realizadas en esta tesis entre las que se mencionan:

a) Esta confluencia se produce en una curva;

b) Las diferencias en la densidad de los tributarios son producidas por los minerales disueltos en el agua por lo que presenta las mayores diferencias en condiciones de estiaje (con menores relaciones de momento entre los tributarios), poco común de observar, ya que la mayoría de los antecedentes recopilados reportan efectos de la diferencia de densidad producida durante crecidas (con mayor relación de momento) debido a la gran cantidad de sedimentos en suspensión en uno de los tributarios como los que se observa, por ejemplo, en la confluencia de los ríos Paraná y Paraguay. Las características particulares mencionadas despertaron el interés de reconocidos investigadores internacionales que trabajan en confluencias fluviales, entre los que se encuentra el Dr. Jim Best (Universidad de Illinois – UIUC, Estados Unidos) quien cuenta con una gran cantidad de publicaciones en la temática. Junto a este investigador se ha desarrollado el artículo que ha sido publicado en la revista Geomorphology.

Cuando el caudal del río Saladillo es bajo (o se encuentra cercana al módulo), la relación de momento es baja y las diferencias de densidad entre los tributarios es alta (debido a una alta concentración de sal disuelta en el río Saladillo), la hidrodinámica y los procesos de mezcla difieren sustancialmente de los reportados en trabajos previos,

ya que el río Saladillo ingresa a la confluencia por debajo del río Tercero (Ctalamochita) modificando sustancialmente los procesos reportados por dichos autores. En este caso, la mezcla entre los dos flujos confluyentes es más rápida a pesar de la menor relación de momento, lo que demuestra la potencial importancia de las diferencias de densidad en la velocidad de mezcla de dos flujos confluyentes. La longitud de mezcla observada en la confluencia del río Tercero (Ctalamochita)-Saladillo fue un orden de magnitud menor que la estimada utilizando ecuaciones existentes, debido a que estas no tienen en cuenta las diferencias de densidad entre los tributarios, y además asume que el flujo es uniforme y existe mezcla completa en la vertical.

---

**Anexo**  
**ACTIVIDADES DE DIVULGACIÓN DE LOS CONTENIDOS**  
**ADQUIRIDOS EN ESTA TESIS A LA COMUNIDAD EN**  
**GENERAL**

---

Contenidos de este anexo han sido incluidos en el siguiente libro de divulgación:

**García, C.M.; Díaz Lozada, J.M.; Bibiloni, A.; Ramallo, A (2016).** “Adopto un tramo de arroyo como mi mascota” – Libro generado en el marco del convenio firmado en el año 2014 entre el Instituto Dante Alighieri (Villa Carlos Paz, Córdoba) y la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEFN) – UNC. ISBN: 978-987-9363-69-0.

## 6.1. Introducción

Las tesis doctorales en Argentina son financiadas en gran parte a través de becas otorgadas por diferentes organismos estatales como universidades y CONICET. Dado quien es la sociedad quien financia los estudios de posgrado los conocimientos generados por el doctorando deben ser utilizados en beneficio de la misma. Frente a esto, el autor de esta tesis encuentra la motivación no solo de generar herramientas útiles para la gestión de los recursos hídricos, sino también de realizar proyectos educativos en donde se divulguen los resultados obtenidos y se realice la capacitación y concientización de las problemáticas observadas en la cuenca de estudio que también se manifiesta en otras cuencas.

Actualmente en el grupo de investigación donde se desarrolla esta tesis, se están llevando a cabo en simultaneo dos proyectos educativos “MATTEO” y “ADOPTO UN CUERPO DE AGUA COMO MI MASCOTA”. Ambos proyectos generaron un impacto muy grande en las comunidades educativas lo cual ha producido que otros establecimientos educativos e instituciones se suman a esta iniciativa (Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos del Gobierno de la Provincia de Córdoba, ADARSA, COOPI, Municipalidad y Consejo de Representantes de Carlos Paz, INACIRSA, etc.). En el momento de escritura de esta tesis, ambos proyectos (de los cuales el tesista es codirector) fueron seleccionados por la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba como programas de Compromiso Social Estudiantil en donde los alumnos pueden realizar las 30 hs de trabajo social exigidos para la obtención del título de grado en cualquier carrera a partir de los alumnos matriculados en 2015. Además, los proyectos educativos mencionados son presentados anualmente en la jornada de capacitación docente “ESCUELA DEL AGUA” generada en conjunto entre los Ministerios de Agua, Ambiente y Servicios Públicos y Educación del gobierno de la Provincia de Córdoba

En el presente anexo se describe brevemente las actividades realizadas y algunos de los principales logros realizados. Cabe destacar que estos proyectos aún siguen en desarrollo y crecimiento.

## 6.2. Breve descripción proyecto MATTEO y su relación con esta tesis.

El proyecto educativo MATTEO, ver Figura 84 (Monitoreo Automático del Tiempo en la Troposfera en Escuelas y Organismos) nace de la necesidad de concientizar a los estudiantes de la importancia de realizar mediciones hidrológicas e hidrometeorológicas para la correcta gestión del recurso hídrico. Además, los estudiantes toman contacto con los equipos, los manejan y aprenden a cuidarlos. El proyecto involucra la participación de estudiantes desde nivel inicial hasta estudiantes de grado y posgrado, desarrollándose una gradualidad en los contenidos que se trabajan.



**Figura 84.:** Logo del proyecto educativo Matteo, generado por los estudiantes.

El proyecto es llevado a cabo en conjunto entre el Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA – UNC), el Centro de Estudios de la Región Semiárida (INA – CIRSA) y el Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Público del Gobierno de la Provincia de Córdoba. El proyecto se bautizó con el nombre de MATTEO en honor al estudiante fallecido Matteo Ravagli estudiante del instituto Dante Alighieri quien mostro una fuerte vocación científica. El tesista es codirector de este proyecto.

Para la materialización del proyecto se le entrega a cada escuela una estación meteorológica “SINOMETER” (Figura 85) de bajo costo (aproximadamente USD 150). A partir de que la estación está instalada, los estudiantes registran los datos diarios a las 9:00 Hs leyendo la información suministrada por la estación en la pantalla LCD. A pesar de que la estación meteorológica registra los datos y pueden ser bajados a la computadora, se enseña a los alumnos los datos diarios para responsabilizarlos y

concientizarlos en la toma del dato y además como respaldo frente a una falla en la alimentación energética de la estación, lo cual si se produce la misma pierde los datos.

Con la información obtenida los estudiantes trabajan en las diferentes asignaturas utilizando como eje el proyecto (Figura 86). Es decir, cada asignatura brinda al estudiante los conocimientos necesarios para la ejecución del proyecto. A continuación, se describe, a modo de ejemplo, cómo se ha programado en una escuela (Instituto Dante Alighieri de Villa Carlos Paz) los contenidos a desarrollarse en sexto grado para llevar a cabo el proyecto en cada asignatura.



**Figura 85.:** Estación meteorológica entregada a cada escuela integrante del proyecto.



**Figura 86.:** Los contenidos del proyecto pueden ser fácilmente adaptado a todos los niveles educativos. En la figura se está trabajando en el ciclo del agua con estudiantes de sala de 3, 4 y 5 años.

*“Atmósfera. Características de la Atmósfera. Capas. Funciones. Tiempo atmosférico.*

*Meteorología como ciencia, su importancia en la sociedad. Instrumentos para monitorear el estado del tiempo atmosférico. Inicio del registro de datos de la Central Meteorológica de la escuela;*

*continuación de la carpeta de registro comenzada en el año 2013. Organización: dos alumnos por semana. (Contenidos a desarrollar en Ciencias Naturales- Educación Tecnológica- Ciencias Sociales)*

*Inicio del Proyecto MATTEO: presentación, clase en Computación con el apoyo de los asesores científicos, para comenzar a registrar en formularios Google, una vez por semana, todos los datos tomados en forma escrita en la carpeta de campo. Actividad que deberán completar los alumnos encargados del registro de datos de cada semana. (Educación Tecnológica- Computación)*

*Concurso para diseñar la tapa del cuaderno de registro de datos que se implementará en las escuelas que se suman este año al proyecto. (Ciencias- Plástica)”*

Independientemente de la manera en que los directivos de las instituciones decidan como trabajar en el proyecto hay ciertos lineamientos generales que se llevan a cabo en todas las instituciones. Los mismos son:

- a. Una vez que el establecimiento educativo ha sido seleccionado para participar de este proyecto, representantes de las instituciones responsables de este proyecto se contactarán con los directivos para coordinar una primera reunión informativa donde además se realizará una determinación preliminar del sitio óptimo de instalación de la estación.
- b. Realización de una charla informativa sobre este proyecto para docentes y alumnos del establecimiento educativo: A cargo de docentes y estudiantes de la FCEfyN-UNC.
- c. Instalación de la estación meteorológica: A cargo de docentes y estudiantes de la FCEfyN-UNC junto a estudiantes de los establecimientos educativos.
- d. Incluir a la nueva estación en la red online de estaciones de este proyecto: A cargo de docentes y estudiantes de la FCEfyN-UNC junto a estudiantes de los establecimientos educativos.
- e. Registro manual de información meteorológica: Además del registro automático se incentiva a realizar el registro manual de los datos. Se recomienda que esta actividad este a cargo de los estudiantes de los establecimientos educativos al menos una vez por día (para concientizarlos en la importancia de tomar el dato). Se está trabajando en implementar una base de datos online donde los estudiantes una vez por semana carguen manualmente los datos a dicha base.

f. Descarga de los datos y mantenimiento de la estación y consola (cambio de baterías, etc.). A cargo de docentes y estudiantes de la FCEfyN-UNC junto a estudiantes de los establecimientos educativos.

g. Trabajo en clase con los alumnos de los establecimientos educativos. Los docentes y estudiantes de la FCEfyN-UNC participaran junto a estudiantes de los establecimientos educativos en el desarrollo del proyecto.

h. Desarrollo de talleres con los representantes de las instituciones responsables de este proyecto y docentes y alumnos de los establecimientos educativos para discutir sobre contenidos y actividades que se realizan en el marco de este proyecto.

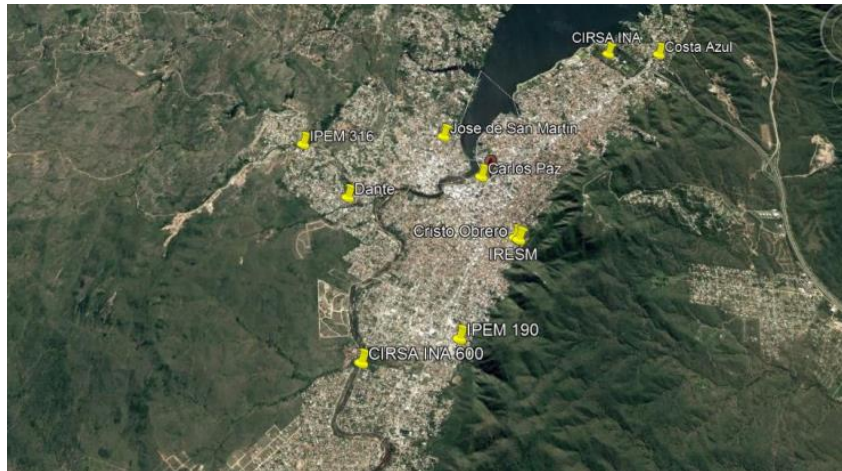
Con las estaciones instaladas, lo que se pretende es formar una red de escuelas (Figura 87) que estén trabajando en el proyecto y que las mismas compartan la información y las experiencias generadas. La red de escuelas actuales se centra principalmente en Carlos Paz y actualmente se está llevando estaciones a diferentes localidades de la provincia. Además, este proyecto está siendo replicado por la Universidad Católica de Salta (UCASAL) y la universidad nacional de Santiago del Estero (UNSE). Finalmente, este proyecto será implementado en Perú por el grupo del profesor Jorge Abad.

En el mes de mayo arribaron a la Provincia de Córdoba investigadores de la Universidad de Illinois y el Instituto Nacional de Estudios Atmosféricos de Estados Unidos (NCAR) para instalar las estaciones hidrometeorológicas de alta tecnología para la realización del proyecto RELAMPAGO. RELAMPAGO también busca realizar monitoreo del Tiempo y es un trabajo interinstitucional con una escala diferente, pero se corresponde correctamente con los objetivos de MATTEO. Los investigadores del Proyecto Relámpago han adoptado al proyecto MATTEO como brazo educativo del Proyecto Relámpago (ver <https://sites.google.com/illinois.edu/relampago/education-and-outreacheducación-y-alcance?authuser=0>)

La relación de este proyecto con esta tesis es que el mismo trabaja sobre una problemática importante en la región que está relacionada con falta de conciencia y la problemática que tiene la falta de información para la gestión de los recursos hídricos. Dicha problemática se repite en todas las cuencas de la República Argentina y la cuenca estudio objeto de esta tesis no estuvo ajena. Frente a esto surge la motivación de enseñar



y concientizar a los estudiantes sobre la importancia de medir y como la información puede ayudar a una mejor gestión de los recursos hídricos. A su vez los estudiantes transmiten lo aprendido a sus familiares y amigos en casa, lo que asegura el concepto extensionista de este proyecto.



**Figura 87.:** Estaciones meteorológicas de la red Matteo al mes de abril de 2018.

### **6.3. Breve descripción del proyecto Adopto un cuerpo de agua como mi mascota y su relación con esta tesis**

En el proyecto educativo denominado “Adopto un cuerpo de agua como mi mascota”, se trabaja sobre la hipótesis que es posible mejorar la apariencia y calidad del agua de diferentes cuerpos de agua si se los “adopta” responsablemente reconociendo y cuidando su cuenca de aporte, monitoreando la calidad y cantidad del agua presente, manteniendo limpias sus zonas de influencia, reeducando y realizando acciones de concientización dirigidas a la comunidad educativa, a los vecinos del lugar y a las autoridades municipales y provinciales.

El proyecto se basa en realizar una analogía entre el cuidado responsable de las mascotas, lo que es familiar para un niño y el cuidado de los recursos hídricos (Figura 88). Es por ello en la hipótesis mencionada anteriormente se menciona la palabra “adopta” ya que se busca que los estudiantes adopten un cuerpo de agua como si fuera una mascota.

Este proyecto, que continúa desarrollándose, se inició en el año 2013 entre investigadores del Centro de Estudios y Tecnología del Agua de la Universidad Nacional de Córdoba (FCEFYN - UNC), docentes del área de Ciencias Naturales del

segundo ciclo del nivel primario del Instituto Dante Alighieri (IDA) de Villa Carlos Paz. El tesista, al igual que el proyecto MATTEO es codirector de este proyecto. El proyecto que promueve el cuidado de los recursos naturales despertó interés de alumnos que en el 2013 cursaban en quinto grado A y B del nivel primario de ese instituto. Este proyecto luego conto con el apoyo de distintas instituciones, como el caso del Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos de la Pcia. De Córdoba; Municipalidad, el consejo deliberante y el consejo de planificación urbana de Villa Carlos Paz; la cooperativa integral de Carlos Paz (COOPI); la asociación de amigos del río San Antonio (ADARSA), entre otros.



**Figura 88.:** Analogía entre el cuidado responsable de las mascotas y el cuidado de los recursos hídricos.

El cuerpo de agua adoptado por los alumnos del nivel primario del Instituto Dante Alighieri y la escuela Isla de los Estados es el arroyo que escurre frente a ambas escuelas: El arroyo Huahuas Mayún, nombrado de esta forma por la legislatura de la Provincia de Córdoba a través del requerimiento de los alumnos de ambas instituciones educativas, avalado por el concejo deliberante de la ciudad de Villa Carlos Paz. Además, se ha trabajado en otras problemáticas como: (a) La contaminación del arroyo en donde se ha evaluado la calidad del agua midiendo en diferentes sitios con un programa de monitoreo diseñado por los estudiantes (los estudiantes incorporaron conceptos de química, física y matemática para aprender a graficar en ejes cartesianos). Las medidas

se hicieron utilizando las mismas sondas que utilizan los profesionales en el área. Además, se hicieron aforos de caudal utilizando técnicas sencillas (técnica del flotador) hasta complejas técnicas como LSPIV o ADV y (b) Erosión del arroyo debido a la urbanización de la cuenca alta del arroyo. En este caso los estudiantes incorporaron conceptos de caudal, transporte de sedimentos y erosión a través de analogías (por ej. Balanza de Lane) y experimentos sencillos. En esta última temática los estudiantes presentaron su trabajo el VIII Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, que congrega a especialistas de diferentes países de la región latinoamericana sobre erosión fluvial

Fruto del trabajo realizado con estas dos escuelas se publicó el libro “Adopto un tramo de arroyo como mi mascota”, el cual uno de los autores es el autor de esta tesis. En este libro se resume todas las experiencias realizadas con las escuelas Dante Alighieri e Isla de los Estados para que otras escuelas puedan reproducir el proyecto.

Actualmente este proyecto cuenta con un financiamiento del Ministerio de Ciencia y Tecnología de la Provincia de Córdoba a través del programa “PROTRI” para continuar llevando a cabo el proyecto.



**Figura 89.:** Libro adopto un tramo de arroyo como mi mascota

Por otra parte, los alumnos del Instituto Provincial de Enseñanza Media IPEM 316 “Eva Duarte de Perón” (Nivel Secundario) y la escuela Intendente Grimberg (Nivel Primario) están trabajando en conjunto adoptando un humedal colindante a ambos establecimientos.

La relación de este proyecto con esta tesis, es que el mismo surge de la problemática de que la planificación de los recursos hídricos debe hacerse a nivel de cuenca (para ello se les hace hacer a los alumnos una maqueta de la cuenca de estudio donde identifican las divisorias de agua, colectoras, etc. Figura 90). En este proyecto se insiste a los estudiantes que para mejorar la apariencia y calidad de un río o arroyo, las medidas deben tomarse teniendo en cuenta toda la cuenca (“No podemos adoptar la cabeza de un perro solamente, adoptamos la mascota completa”, así se les inculca este concepto a los niños). Este concepto de adoptar medidas a nivel de cuenca aun no es muy conocido por la población en general y por los organismos de gestión, es por ello que se invierte mucho tiempo en las escuelas para que los futuros gestores tengan incorporado este concepto de manera natural. La cuenca del río Carcarañá es una cuenca interjurisdiccional la cual tiene una gran cantidad de problemáticas que deben ser resueltas a nivel de cuenca sin importar los límites de jurisdicción. Actualmente se está trabajando en el plan director de la cuenca del Carcarañá para el comité de cuenca para este sistema.



**Figura 90.:** Maqueta de la cuenca Huahuas Mayún.

#### **6.4. Breve descripción del curso de capacitación docente Escuela del Agua.**

Debido a la falta de concientización por parte de la comunidad en general acerca del cuidado e importancia de los recursos hídricos y de las medidas que deben tomarse para

lograr un desarrollo sustentable, el Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos junto al Ministerio de Educación, ambos pertenecientes al gobierno de la Provincia de Córdoba implementaron el curso de capacitación con puntaje docente llamado “ESCUELA DEL AGUA” (Figura 91). El curso exige la asistencia a los docentes a 4 módulos donde se pretende la profundización y actualización de conocimientos sobre los recursos hídricos de la región y promover otras formas de abordajes en el aula. Finalizado el curso, los docentes elaborarán un proyecto integral y socio comunitario para el cual tendrán el acompañamiento técnico necesario, tanto para su etapa de diseño como así en las fases de desarrollo y evaluación y lo expondrán a fin de año en una muestra colectiva abierta a la comunidad.

El autor de esta tesis junto con otros miembros del CETA-UNC estuvieron a cargo del Módulo N.º 1: “La cuenca como territorio”, en donde se trabajó con los docentes en el concepto de que las problemáticas y planificación de los recursos hídricos deben ser resueltos a nivel de cuenca. En cada sitio donde se realizó la capacitación se trabajó sobre la cuenca hídrica en la que se ubica la localidad, a saber: (a) Cruz del Eje, cuenca del río Cruz del Eje; (b) Corral de Bustos, cuenca del Carcarañá, (c) Almafuerte, cuenca alta del río Tercero (Ctalamochita) y (d) La Falda, cuenca del Lago San Roque. En cada cuenca, lo primero que se hizo fue armar una maqueta con la topografía del territorio que abarca la cuenca, luego los docentes delimitaron la cuenca hidrográfica y posteriormente se discutieron las características de las mismas (características cuencas de llanura y montaña), las problemáticas que tienen y como decisiones no tomadas a nivel de cuenca afectan a diferentes sitios de las mismas. Finalmente se mostró a los docentes los proyectos “MATTEO” y “ADOPTO UN CUERPO DE AGUA COMO MI MASCOTA” como disparador de ideas y base para la realización del proyecto final que tienen que realizar para la acreditación del curso.

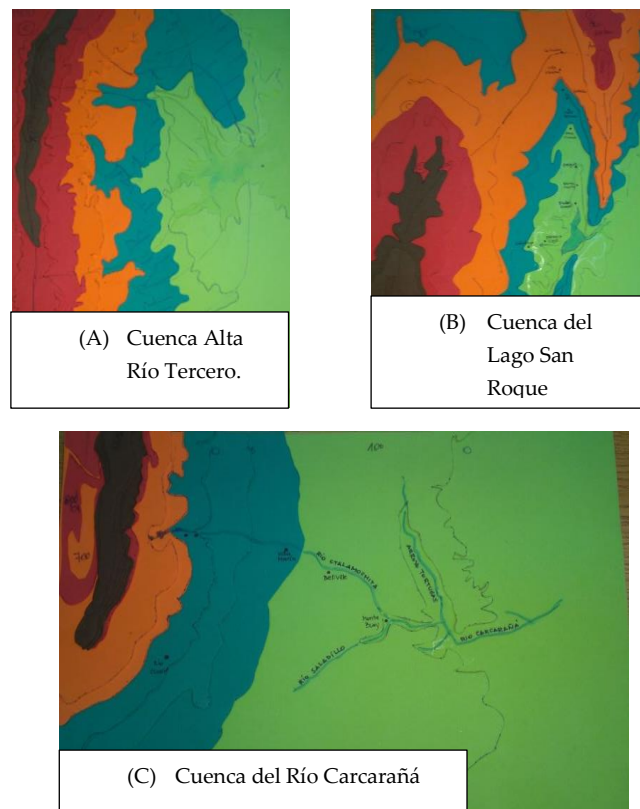
La relación que tiene esta capacitación con esta tesis es que la cuenca de estudio está fuertemente afectada por diversas problemáticas y muchas decisiones se toman sin conocer cómo funciona la cuenca. Con esta capacitación, se busca concientizar a la comunidad sobre el cuidado de las cuencas hídricas, que la planificación de las mismas y solución de problemas debe ser a nivel de cuenca (se hizo hincapié en que la cuenca no respeta límites políticos), que debe hacerse un manejo sustentable de las mismas y



que es importante medir y registrar datos. Dos de las cuencas trabajadas en estas capacitaciones son objeto de estudio de esta tesis, muchos de los resultados obtenidos fueron compartidos con los docentes. Aproximadamente se capacitó a unos 200 docentes que tienen a cargo grupos de 30 estudiantes en promedio cada uno, con lo cual a través de este programa se espera concientizar a 6000 estudiantes de nivel inicial, primario y secundario.



**Figura 91.:** Logotipo de la escuela del agua. El programa inicio en 2017 con una única capacitación, en 2018 se están dando cuatro capacitaciones en simultaneo y en los próximos años busca extenderse aún más.



**Figura 92.:** Maquetas de las cuencas de estudio (A) Cuenca Alta de río Tercero, (B) Cuenca del Lago San Roque y (C) Cuenca del Río Carcarañá.

---

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

---

- [1] **APRHI, Administración Provincial de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba**, “Expedientes de la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba N° 0416-03723-1994, 0416-038787-2004, 0416-042324-2005, 0416-057516-2009, 0416-060854-2010” – Información provista por el área de Servicios Hidrológicos del APRHI.
- [2] **Barchiesi G.M, Díaz Lozada, J.M y García, C.M.** “Determinación de curvas altura de superficie libre – caudal en secciones de los canales maestros del sistema de riego del Dique Pichanas” Informe Técnico solicitado por la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba. – Octubre de 2014.
- [3] **Barchiesi G.M, Díaz Lozada J.M, García, C.M, Heredia Ligorria, A.I, Plencovich G., Patalano A., Ragessi, I.M, y Guillen NF.** “Verificación de los caudales erogados por las estructuras de descarga de la central hidroeléctrica en el dique Cruz del Eje” – VIII Congreso Argentino de Presas y Aprovechamientos hidroeléctricos – Santa Fe – abril de 2015.
- [4] **Bertoni, J. C., Ambrosino, S., Barbeito, O., Daniele, A., Maza, J. A., Paoli, C. U., Serra, J. J. (2004).** “Inundaciones urbanas en la Argentina”. GWP-SAMTAC; Programa Asociado de Gestión de Crecidas; Universidad Nacional de Córdoba. Secretaría de Ciencia y Técnica, SECyT; Comité Permanente de los Congresos Nacionales del Agua, Argentina; Arg CAP-NET.
- [5] **Best, J.L., (1986).** “The morphology of river channel confluences”. *Progress in Physical Geography* 10(2), 157-174.
- [6] **Best, J.L., (1987).** “Flow dynamics at river channel confluences: implications for sediment transport and bed morphology”. In: Ethridge, F.G., Flores, R.M., Harvey, M.D. (Eds.), *Recent Developments in Fluvial Sedimentology: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication No. 39*. Society for Sedimentary Geology, Tulsa, OK, pp. 27–35.
- [7] **Best, J.L., (1988).** “Sediment transport and bed morphology at river channel confluences”. *Sedimentology* 35(3), 481-498.
- [8] **Best, J.L., Reid, I. (1984).** “Separation zone at open channel junctions”. *Journal of Hydraulic Engineering* 110 (11), 1588–1594.
- [9] **Best, J.L., Roy, A.G., (1991).** “Mixing-layer distortion at the confluence of channels of different depth”. *Nature* 350(6317), 411-413.
- [10] **Best, J.L., Ashworth, P.J., (1997).** “Scour in large braided rivers and the recognition of sequence stratigraphic boundaries”. *Nature* 387(6630), 275-277.
- [11] **Best, J.L., Rhoads, B.L., (2008).** “Sediment transport, bed morphology and the sedimentology of river channel confluences”. In: Rice, S., Roy, A., Rhoads, B. (Eds.), *River confluences, tributaries and the fluvial network*. John Wiley & Sons. pp 45-72.
- [12] **Biron, P., De Serres, B., Best, J.L., (1993a).** “Shear layer turbulence at unequal depth channel confluence”, In: Clifford, N.J., French, J.R., Hardisty, J., (Eds.), *Turbulence: Perspectives on Flow and Sediment Transport*, 197–213.
- [13] **Biron, P., Roy, A., Best, J.L., Boyer, C.J., (1993b).** “Bed morphology and sedimentology at the confluence of unequal depth channels”. *Geomorphology* 8(2), 115-129.
- [14] **Biron, P., Best, J.L., Roy, A.G., (1996a).** “Effects of bed discordance on flow dynamics at open channel confluences”. *Journal of Hydraulic Engineering* 122(12), 676-682.
- [15] **Biron, P., Roy, A.G., Best, J.L., (1996b).** “Turbulent flow structure at concordant and discordant open-channel confluences”. *Experiments in Fluids* 21, 437–446.
- [16] **Bogle G.V. (1997)** “Stream velocity profiles and longitudinal dispersion.” *Journal of Hydraulic Engineering*, 1239, 816–820



- [17] **Boyer, C., Roy, A.G., Best, J.L., (2006).** “Dynamics of a river channel confluence with discordant beds: flow turbulence, bed load sediment transport, and bed morphology”. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 111(F4).
- [18] **Bouchez, J.E., Lajeunesse, J., Gaillardet, C., France-Lanord, P., Dutra-Maia, L., Maurice, (2010).** “Turbulent mixing in the Amazon River: the isotopic memory of confluences”. *Earth Plan. Sci. Lett.* 290, 37-43.
- [19] **Brandolin, P. G., Ávalos, M. A., Angelo, C. (2013).** “The impact of flood control on the loss of wetlands in Argentina”. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 23(2), 291-300.
- [20] **Bristow, C.S., Best, J.L., Roy, A.G., (1993).** “Morphology and facies models of channel confluences”. *Alluvial Sedimentation* 91-100.
- [21] **Brownlie, W. R. (1983).** “Flow Depth in sand-bed channels”. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 109(7), 959-990
- [22] **Callaway, C., (1902).** “On a cause of river curves”. *Geological Magazine (Decade IV)* 9, 450-455.
- [23] **Carr, M. L., Rehmann, C. R. (2007).** “Measuring the dispersion coefficient with acoustic Doppler current profilers”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(8), 977-982.
- [24] **Carr, M. L., (2007).** “An efficient method for measuring longitudinal dispersion in rivers”. Phd. Thesis – University of Illinois at Urbana-Champaign – USA.
- [25] **Chow, V. T. (1994).** “Hidráulica de canales abiertos”. Editorial Mc Graw-Hill
- [26] **Coniglio, J., M. Villegas, S. Degiovanni, L. Gentile, H. Petrelli, G. Villalba y J. Felizzia, (2008).** “Extracción de áridos en el río Cuarto. Importancia del recurso, tipificación y factores de calidad”. 1° Cong. Nac. Áridos y 6° Jorn. Iberoam. de Materiales de Construcción. Actas TI: 55-62, Mar del Plata.
- [27] **Constitución Nacional de la República Argentina (1994).**
- [28] **Cossavella, A.M.; Carranza, P.; Monarde, F.; Larrosa, N.; Roqué, M; Nuño, C.; Hunziker, M.L; Ferreyra, M., Melián J. (2003).** “Gestión de efluentes líquidos en la cuenca del Río Tercero (Ctalamochita)”. XXIVº Congreso Nacional del Agua 2013, San Juan, Argentina.
- [29] **Davis, W.M., (1903).** “The development of river meanders”. *The Geological Magazine, New Series, Decade IV* 10, 145–148
- [30] **Degiovanni S., D. Origlia, F. Grosso, N. Doffo, A. Santángelo, (2005a).** “Erosión de márgenes: análisis de los factores que regulan la evolución de un meandro en la cuenca media del río Cuarto”. En Blarasin M., S. Degiovanni, A. Cabrera y M. Villegas (eds) *Aguas superf. y subterr. en el Sur de Cba: 117-128*, Río Cuarto.
- [31] **Deng, Z., Singh, V. P., Bengtsson, L. (2001).** “Longitudinal dispersion coefficient in straight rivers”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127 (11), 919–927.
- [32] **De Serres, B., Roy, A.G., Biron, P.M., Best, J.L., (1999).** “Three-dimensional structure of flow at a confluence of river channels with discordant beds”. *Geomorphology* 26(4), 313-335
- [33] **Díaz, Erica (2016).** “Sequías Hidrológicas en la República Argentina y su relación con Variables Macroclimáticas” - Tesis Doctoral– FCEFYN- UNC; Córdoba, Argentina.
- [34] **Díaz Lozada, J.M; García, C. M.; Herrero, H., Heredia Ligorria, A.I.; Lopez, F.; Castelló, E. y Brarda, J.P., (2016).** “Caracterización Experimental y Numérica de Eventos de Crecida Extraordinarios en la Cuenca del Río Carcarañá, Argentina”. *Aqua-LAC - Vol. 8 - N° 1 - Mar. 2015*. pp. 10 – 20.

- [35] **Díaz Lozada, J.M., (2014).** “Cuantificación y Caracterización del escurrimiento superficial de la cuenca del Río Carcarañá”. Tesis de Maestría – FCEFYN- UNC; Córdoba, Argentina.
- [36] **Díaz Lozada, J.M., García, C.M., Herrero, H., Barchiesi, G.M., Romagnoli, M., Portapila, M.; Brarda, J.P., (2015).** “Cuantificación del escurrimiento superficial de la cuenca del Río Carcarañá”. Rev. Fac. Cs. Exactas, Físicas y Naturales. 2 (1), 59–72.
- [37] **Díaz Lozada, J.M.; García, C.M.; Flores Nieto, F.; Oberg, K.A; Over, T. (2018) en revision;** “Optimization of Uncertainty Analysis of Multiple Transects ADCP Discharge Measurements by Moving Boat using Sampling Methods”. – Revista propuesta: Journal of Hydraulic Engineering.
- [38] **Dublin (1992)** “Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente” – Conferencia llevada a cabo en Dublin, Irlanda, 1992.
- [39] **Efron B (1979)** “Bootstrap methods: another look at the jackknife”. Ann Stat 7:1–26
- [40] **Fenton, J. D. (2018).** “On the generation of stream rating curves”. Journal of hydrology, 564, 748-757.
- [41] **Fischer H.B., (1969).** “The effects of bends on dispersion in streams”. Water Resources Research 5, 496-506.
- [42] **Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J., Brooks, N.H., (1979).** “Mixing in Inland and Coastal Waters”. Academic Press, Waltham.
- [43] **Flint, J.J., (1980).** “Tributary arrangements in fluvial systems”. American Journal of Science 280(1), 26-45.
- [44] **Fofonoff, N.P., Millard, R.C., (1983).** “Algorithms for computation of fundamental properties of seawater”. UNESCO technical papers in Marine Science, Paris. 53 p.
- [45] **García, M. H. (2008).** “ASCE Manual of Practice 110—Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling and Practice”. In World Environmental and Water Resource Congress 2006: Examining the Confluence of Environmental and Water Concerns (pp. 1-4).
- [46] **García, C.M.; Cantero, M.; Niño, Y.; García M.H. (2005)** “Turbulence measurements with Acoustic Doppler Velocimeters” Journal of Hydraulic Engineering; lugar: Reston, Virginia, Estados Unidos; año: 2005 vol. 131 p. 1062 – 1073
- [47] **García, C. M., Jackson, P. R., Garcia, M. H. (2006).** “Confidence intervals in the determination of turbulence parameters”. Experiments in fluids, 40(4), 514-522.
- [48] **García, C. M., Tarrab, L., Oberg, K., Szupiany, R., Cantero, M. I. (2012).** “Variance of discharge estimates sampled using acoustic Doppler current profilers from moving platforms”. J. Hydraul. Eng., 138(8), 684-694.
- [49] **García, C.M (2015)** “Optimum Sampling time in wading discharge measurements using Acoustic Doppler Velocimetry Techniques” – Conferencia brindada a los técnicos de OTT y SonTek.
- [50] **Garcia, C.M; Herrero, H.S.; Díaz Lozada, J.M.; Heredia Ligorria, A.I.; Vaschalde, T.; López, F.; Castelló, E.; Brarda, J.P; Cossavella, A.; “Río Carcarañá. Resultados de la cuantificación del escurrimiento superficial en localizaciones de la Provincia de Córdoba. Período: 2012 – 2017” – ISBN: En trámite.**
- [51] **Gleick, P. H. (2000).** “Changing water paradigm”. International Water Resources Association, Vol 25. N°1. Pp. 127-138.
- [52] **Gonzalez-Castro, J., Muste, M. (2007).** “Framework for estimating uncertainty of ADCP measurements from a moving boat by standardized uncertainty analysis.” J. Hydraul. Eng., 133(12), 1390–1410.

- [53] **Gonzalez-Castro, J. A., Buzard, J., Mohamed, A. (2016).** “RiverFlow UA-a package to estimate total uncertainty in ADCP discharge measurement by FOTSE-with an application in hydrometry”. In River Flow (Vol. 2016, pp. 715-723).
- [54] **Heredia, Ana I. (2018)** “Caracterización del transporte de sedimentos en un tramo del río Tercero (Ctalamochita) utilizando tecnología acústica doppler” – Tesis de Maestría en Cs. de la Ingeniería, Mención en Recursos Hídricos, FCEFyN – UNC.
- [55] **Herrero, H.S., (2014)** “Evolución espacial y temporal de la hidrodinámica en confluencias fluviales” – Tesis de Doctorado – FCEFyN – UNC, Córdoba Argentina.
- [56] **Herrero, H.S., García, C.M., Pedocchi, F., López, G., Szupiany, R.N., Pozzi-Piacenza, C.E., (2016).** “Flow structure at a confluence: experimental data and the bluff body analogy”. Journal of Hydraulic Research 54(3), 263-274.
- [57] **Hills, R., (1983).** “Tributary confluences on meandering streams in Minnesota”. Unpublished Survey.
- [58] **Holmes Jr, R. R., Garcia, M. H. (2008).** “Flow over bedforms in a large sand-bed river: A field investigation”. Journal of Hydraulic Research, 46(3), 322-333.
- [59] **Hauet, A., Le Coz, J., Sevez, D., Dramais, G., H´enault, F., Perret, C., Pierrefeu, G., Pobanz, K., Thollet, F. (2012)** “Intercomparaison ADCP sur le canal de La Gentille (12-16/09/2011)”. (En frances) Groupe Doppler, Reporte Técnico, diciembre de 2012, 62 p
- [60] **ISO, E. (2007).** 748, 2007 “Hydrometry. Measurement of liquid flow in open channels using current-meters or floats”. BSI, 58pp
- [61] **Iwasa, Y, Aya, S. (1991).** “Predicting longitudinal dispersion coefficient in open-channel flows.” Proc. Int. Symp. of Environmental Hydraulics, 505–510
- [62] **Julien, P. Y. (2010).** “Erosion and sedimentation”. Cambridge University Press.
- [63] **Kennedy, E. J. (1984).** “Discharge ratings at gaging stations”. U.S. Geological Survey -US Government Printing Office
- [64] **Kenworthy, S.T., Rhoads, B.L., (1995).** “Hydrologic control of spatial patterns of suspended sediment concentration at a stream confluence”. Journal of Hydrology 168(1), 251-263.
- [65] **Koussis, A. D., Rodriguez-Mirasol, J. (1998).** “Hydraulic estimation of dispersion coefficient for streams” Journal of Hydraulic Engineering, 124(3), 317–320.
- [66] **Lane, S.N., Parsons, D.R., Best, J.L., Orfeo, O., Kostaschuk, R.A., Hardy, R.J., (2008).** “Causes of rapid mixing at a junction of two large rivers: Rio Parana and Rio Paraguay, Argentina”. Journal of Geophysical Research: Earth Surface 113(F2).
- [67] **Laraque, A., Guyot, J.L., Filizola, N., (2009).** “Mixing processes in the Amazon River at the confluences of the Negro and Solimoes Rivers, Encontro das Aguas, Manaus, Brazil”. Hydrological Processes 23(22), 3131.
- [68] **Latosinski, F. G., Szupiany, R. N., García, C. M., Guerrero, M., Amsler, M. L. (2014).** “Estimation of concentration and load of suspended bed sediment in a large river by means of acoustic Doppler technology”. Journal of Hydraulic Engineering, 140(7), 04014023.
- [69] **Le Coz, J., Sayssset, G., and Pierrefeu, G. (2009).** “Testing report -ADCP Regatta 1, 2009/02/3- 4-5, Vézère River at Garavet Bridge, Allasac, France”. Groupe Doppler, Lyon, France, 33p (in French).
- [70] **Le Coz, J., Blanquart, B., Pobanz, K., Dramais, G., Pierrefeu, G., Hauet, A., & Despax, A. (2016).** “Estimating the uncertainty of streamgauging techniques using in situ collaborative interlaboratory experiments”. Journal of Hydraulic Engineering, 142(7), 04016011.

- [71] **Lewis, Q.W., Rhoads B.L., (2015).** “Rates and patterns of thermal mixing at a small stream confluence under variable incoming flow conditions”. *Hydrological Processes* 29, 4442-4456.
- [72] **Liu, H. (1977).** “Predicting dispersion coefficient of streams” *Journal of Environmental Engineering. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, 103 (1), 59– 69
- [73] **Lyubimova, T., Lepikhin, A., Konovalov, V., Parshakova, Y., Tiunov, A., (2014).** “Formation of the density currents in the zone of confluence of two rivers”. *Journal of Hydrology* 508, 328-342.
- [74] **Manning, R. (1891)** “On the flow of water in open channels and pipes”, *transactions*, Vol. 20, Institution of Civil Engineers of Ireland, Dublin. Pp 191-207.
- [75] **Metropolis, N; Ulam, S. (1949).** “The monte carlo method”. *Journal of the American statistical association*, 44(247), 335-341.
- [76] **Miatello R. (1978).** “Geografía Física de la Provincia de Córdoba”. Directorio del Banco de la Provincia de Córdoba. Editorial Boldt. p 164-454.
- [77] **Maurice-Bourgoin, L., Quemerais, B., Moreira-Turcq, P., Seyler, P., (2003).** “Transport, distribution and speciation of mercury in the Amazon River at the confluence of black and white waters of the Negro and Solimões Rivers”. *Hydrological Processes* 17, 1405-1417
- [78] **McLelland, S.J., Ashworth, P., Best, J.L., (1996).** “The origin and downstream development of coherent flow structures at channel junctions”. In: Ashworth, P., Bennett, S.J., Best, J.L., McLelland, S.J., (Eds.), *Coherent flow structures in open channels*. John Wiley and Sons, Chichester, UK, pp. 459-490. ISBN 9780471957232.
- [79] **Moore, S. A., Jamieson, E. C., Rainville, F., Rennie, C. D., & Mueller, D. S. (2016).** “Monte Carlo Approach for Uncertainty Analysis of Acoustic Doppler Current Profiler Discharge Measurement by Moving Boat”. *J. Hydraul. Eng.*, 04016088.
- [80] **Moreira-Turcq, P.F., Seyler, P., Guyot, J.L., Etcheber, H., (2003).** “Characteristics of organic matter in the mixing zone of the Rio Negro and Rio Solimões of the Amazon River”. *Hydrological Processes* 17, 1393-1404.
- [81] **Morris, H. M. (1963).** “Applied hydraulics in engineering” (No. TC160 M74).
- [82] **Mosley, M.P., (1976).** “An experimental study of channel confluences”. *Journal of Geology* 84(5), 535-562.
- [83] **Mueller, D. S. and Wagner, C. R. (2006).** “Application of the loop method for correcting Acoustic Doppler Current Profiler discharge measurements biased by sediment transport.” U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.
- [84] **Mueller, D. S., Wagner, C. R., Rehmel, M. S., Oberg, K. A., Rainville, F. (2013).** “Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat”. US Department of the Interior, US Geological Survey.
- [85] **Mueller, D. S. (2013).** “Extrap: Software to assist the selection of extrapolation methods for moving-boat ADCP streamflow measurements”. *Computers & geosciences*, 54, 211-218.
- [86] **Mueller, D.S. (2016),** “QRev—Software for computation and quality assurance of acoustic 5Doppler current profiler moving-boat streamflow measurements—User’s manual for version 2.8” U.S. Geological Survey Open-File Report 2016–1052, 50 p.
- [87] **Naciones Unidas (2015)** “Población Mundial” <http://www.un.org/es/sections/issues-depth/population/index.html>.
- [88] **Oberg, K. A., Morlock, S. E., and Caldwell, W. S. (2005).** “Quality assurance plan for discharge measurements using acoustic Doppler current profilers.” USGS Scientific Investigations Rep. 2005-5183, Reston, VA.

- [89] **Oberg, K. and Mueller, D. S (2007).** “*Validation of streamflow measurements made with acoustic Doppler current profilers*”. J. Hydraul. Eng., 133(12), 1421-1432.
- [90] **Ochoa, Santiago (2018)** “*Simulación Hidrodinámica Tridimensional con Procesos de Transporte de Sedimentos en un Cauce Natural*”. Tesis doctoral en ciencias de la Ingeniería – FCEFyN- UNC. Córdoba, junio de 2018.
- [91] **Park, E., Latrubesse E.M., (2015).** “*Surface water types and sediment distribution patterns at the confluence of mega rivers: the Solimões-Amazon and Negro Rivers junction*”, Water Resour. Res. 51, 6197–6213, doi:10.1002/2014WR016757.
- [92] **Parsons, D.R., Best, J.L., Lane, S.N., Orfeo, O., Hardy, R.J., Kostaschuk, R., (2007).** “*Form roughness and the absence of secondary flow in a large confluence–diffuence, Rio Paraná, Argentina*”. Earth Surface Processes and Landforms 32(1), 155-162.
- [93] **Parsons, D.R., Best, J.L., Lane, S.N., Kostaschuk, R.A., Hardy, R.J., Orfeo, O., Amsler L.M., Szupiany, R.N., (2008).** “*Large river channel confluences*”. River Confluences, Tributaries and the Fluvial Network, 17-32.
- [94] **Parsons, D.R., Jackson, P.R., Czuba, J.A., Engel, F.L., Rhoads, B.L., Oberg, K.A., Best. J.L., Mueller D.S., Johnson K.K., Riley, J.D., (2013).** “*Velocity Mapping Toolbox (VMT): a processing and visualization suite for moving-vessel ADCP measurements*”. Earth Surface Processes and Landforms 38(11), 1244-1260.
- [95] **Patalano, A., García, C. M., & Rodríguez, A. (2017).** “*Rectification of image velocity results (RIVeR): a simple and user-friendly toolbox for large scale water surface particle image velocimetry (PIV) and particle tracking velocimetry (PTV)*”. Computers & Geosciences, 109, 323-330.
- [96] **Plant, W. J., Keller, W. C., Hayes, K., Spicer, K. (2005).** “*Streamflow properties from time series of surface velocity and stage*”. Journal of Hydraulic Engineering, 131(8), 657-664.
- [97] **Perucca, E., Camporeale, C., Ridolfi, L. (2009).** “*Estimation of the dispersion coefficient in rivers with riparian vegetation*”. Advances in Water Resources, 32(1), 78-87.
- [98] **Pobanz, K., Le Coz, J., Hauet, A., Thollet, F., Longefay, Y., Pierrefeu, G (2015).** “*Intercomparaison ADCP/SVR sur le Rhône à l’aval du barrage de Génissiat, 25 au 28 septembre 2012*”. Groupe Doppler Hydrométrie, reporte técnico.
- [99] **Pobanz, K., Le Coz, J., and Pierrefeu, G. (2011).** “*Intercomparison of ADCPs on the Rhône downstream of Génissiat dam (2010/10/12- 15)*.” Groupe Doppler, Lyon, France, 59 (en Frances).
- [100] **Pope, S. B. (2000).** “*Turbulent flows*”. Cambridge university press.
- [101] **Prych, E.A., (1970).** “*Effects of density differences on lateral mixing in open-channel flows*” – Report N° KH-R-21 – W.M. Keck Engineering Laboratories - California Institute of Technology.
- [102] **Ramón, C.L., Hoyer, A.B., Armengol, J., Dolz, J., Rueda, F.J., (2013).** “*Mixing and circulation at the confluence of two rivers entering a meandering reservoir*”. Water Resour. Res. 49, 1429–1445, doi:10.1002/wrcr.20131.
- [103] **Ramón, C., Armengol, J., Dolz, J., Prats, J., Rueda, F.J., (2014).** “*Mixing dynamics at the confluence of two large rivers undergoing weak density variations*”. J. Geophys. Res. Oceans 119, 2386–2402, doi:10.1002/2013JC009488.
- [104] **Rhoads, B.L., (1996).** “*Mean structure of transport-effective flows at an asymmetrical confluence when the main stream is dominant*”. Coherent Flow Structures in Open Channels, 491-517.
- [105] **Rhoads, B.L., Kenworthy, S.T., (1995).** “*Flow structure at an asymmetrical stream confluence*”. Geomorphology 11(4), 273-293.

- [106] **Rhoads, B.L., Sukhodolov, A.N., (2001).** “*Field investigation of three-dimensional flow structure at stream confluences: 1. Thermal mixing and time-averaged velocities*”. Water Resources Research 37(9), 2393-2410.
- [107] **Rhoads, B.L., Sukhodolov, A.N., (2004).** “*Spatial and temporal structure of shear layer turbulence at a stream confluence*”. Water Resources Research 40(6).
- [108] **Rhoads, B.L., Riley, J.D., Mayer, D.R., (2009).** “*Response of bed morphology and bed material texture to hydrological conditions at an asymmetrical stream confluence*”. Geomorphology 109(3), 161-173.
- [109] **Rigo, D. (1992)** “*Dispersão longitudinal em rios; desempenho de métodos de previsão e de traçadores fluorescentes*”. Tesis - Universidad Federal de Rio de Janeiro, COPPE, Río de Janeiro.
- [110] **Riley, J.D., Rhoads, B.L., (2012).** “*Flow structure and channel morphology at a natural confluent meander bend*”. Geomorphology 163, 84-98.
- [111] **Riley, J.D., Rhoads, B.L., Parsons, D.R., Johnson, K.K., (2014).** “*Influence of junction angle on three-dimensional flow structure and bed morphology at confluent meander bends during different hydrological conditions*”. Earth Surface Processes and Landforms 40(2), 252-271.
- [112] **Roberts, M.V.T., (2004).** “*Flow dynamics at open channel confluent-meander bends*”. Ph.D. Thesis, University of Leeds, Leeds, UK.
- [113] **Rodríguez C., Mancini, M.; Prósperi, C.; Weyers, A.; Alcantú, C. & Ferrero, S. (2002).** “*Variaciones estacionales de la calidad del agua del río Chocancharava (Río Cuarto), Córdoba, Argentina*”. Ecología Austral: 12:65-72. Asociación Argentina de Ecología
- [114] **Roy, A.G., Bergeron, N., (1990).** “*Flow and particle paths in a natural river confluence with coarse bed material*”. Geomorphology 3, 99–112.
- [115] **Roy, A.G., Roy, R., Bergeron, N., (1988).** “*Hydraulic geometry and changes in flow velocity at a river confluence with coarse bed material*”. Earth Surface Processes and Landforms 13, 583–598.
- [116] **Rutherford, J.C., (1994).** “*River Mixing*”. John Wiley & Son Ltd., New York. 336 pp.
- [117] **Schiller, E.J., Sayre, W.W., (1973).** “*Vertical mixing of heated effluents in open-channel flow*”. Iowa Institute of Hydraulics Research Rep. No. 148.
- [118] **Seo I.W, Baek, K.O (2004)** “*Estimation of the Longitudinal Dispersion Coefficient Using the Velocity Profile in Natural Streams*” Journal of Hydraulic Engineering.
- [119] **Seo, I. W., Cheong, T. S. (1998).** “*Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams.*” Journal of Hydraulic Engineering.,124(1), 25–32.
- [120] **Shen, C., Niu, J., Anderson, E. J., & Phanikumar, M. S. (2010).** “*Estimating longitudinal dispersion in rivers using Acoustic Doppler Current Profilers*”. Advances in Water Resources, 33(6), 615-623.
- [121] **Shiklomanov, I. A. (1998).** “*World water resources: a new appraisal and assessment for the 21st century: a summary of the monograph World water resources*”. Unesco.
- [122] **Smeithlov, B. B. (1990).** *Effect of channel sinuosity on river turbulent diffusion.* Yangtze River, 21(11), 62.
- [123] **Sontek, Y. S. I. (2013).** “*River Surveyor S5/M9 System Manual*”. San Diego.
- [124] **Sotelo Avila, G. (1991).** “*Hidráulica general; fundamentos*”. Ed. Limusa. Mexico D.F.
- [125] **Streeter, V. L., Wylie, E. B., Bedford, K. W., & Saldarriaga, J. G. (1988).** *Mecánica de los fluidos (Vol. 9).* McGraw-Hill.

- [126] **Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, SSRH. (2010)** “Cuenca N.º 31: Cuenca del río Carcarañá” – <http://www.hidricosargentina.gov.ar/>
- [127] **Sukhodolov, A.N., Rhoads, B.L., (2001).** “Field investigation of three-dimensional flow structure at stream confluences: 2. Turbulence”. *Water Resources Research* 37(9), 2411-2424.
- [128] **Szupiany, R.N., Amsler, M.L., Best, J.L., Parsons, D.R., (2007).** “Comparison of fixed-and moving-vessel flow measurements with an aDp in a large river”. *Journal of Hydraulic Engineering* 133(12), 1299-1309.
- [129] **Szupiany, R.N., Amsler, M.L., Parsons, D.R., Best, J.L., (2009).** “Morphology, flow structure, and suspended bed sediment transport at two large braid-bar confluences”. *Water Resources Research* 45(5).
- [130] **Tarrab, L., García, C. M., Cantero, M. I., & Oberg, K. (2012).** “Role of turbulence fluctuations on uncertainties of acoustic Doppler current profiler discharge measurements.” *Water Resources Research*, 48(6).
- [131] **Tarrab, L. (2014)** “Incertidumbres en Mediciones de Caudal con Perfiladores de Corriente Acústicos Doppler desde Plataformas Móviles”. Tesis de doctorado - Universidad Nacional de Córdoba (Argentina).
- [132] **Thielicke, W., & Stamhuis, E. (2014).** “PIVlab—towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB”. *Journal of Open Research Software*, 2(1).
- [133] **Tomkins, K. M. (2014).** “Uncertainty in streamflow rating curves: methods, controls and consequences”. *Hydrological Processes*, 28(3), 464-481.
- [134] **Trevethan, M., Martinelli A., Oliveira, M., Ianniruberto, M., Gualtieri, C., (2015).** “Fluid mechanics, sediment transport and mixing about the confluence of Negro and Solimões rivers, Manaus, Brazil”. E-Proceedings of the 36th IAHR World Congress, 28 June – 3 July, 2015, The Hague, the Netherlands, 12 pp
- [135] **Van Rijn, L. C. (1982).** “Equivalent roughness of alluvial beds”. *Journal of Hydraulic Division, ASCE*, 108(10), 1215-1218.
- [136] **Van Rijn, L. C. (1984).** “Sediment transport, part I: bedload transport”. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 110, Issue 12 (December 1984).
- [137] **Weigold, F., Baborowski, M., (2009).** “Consequences of delayed mixing for quality assessment of river water: example Mulde–Saale–Elbe”. *Journal of Hydrology* 369(3), 296-304.
- [138] **White, W.R., Milli, H., y Crabbe, A. D (1973).** “Sediment transport: An appraisal methods, Vol. 2: Performance of theoretical methods when applied to flume and field data” *Hydraulic Research Statiton Rep.*, No IT119, Wallingford, U.K.
- [139] **Yáñez, Nancy y Susan Poats (2007).** "Documento introductorio". En: Yáñez, Nancy y Poats, Susan. *Derechos de agua y gestión ciudadana*. La Paz: Agua Sustentable-IDRC. pp. 13-50.
- [140] **Yotsukura, N., Sayre, W.W., (1976).** “Transverse mixing in natural channels”. *Water Resources Research* 12(4), 695-704.
- [141] **Young, H. D y Freedman, R. A. (2009).** “Física Universitaria de Sears y Zemansky” (Vol. 2). Decimosegunda edición, Pearson education. Mexico. ISBN: 978-607-442-288-7