

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

**Maestría en Ciencias de la Ingeniería: Mención en Recursos
Hídricos**

**“CUANTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN
DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL EN EL
SISTEMA FLUVIAL DEL RÍO CARCARAÑÁ”**



Autor: Ing. José Manuel Díaz Lozada

Director: Dr. Ing. Carlos Marcelo García Rodríguez

AÑO 2014

CUANTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL EN EL SISTEMA FLUVIAL DEL RÍO CARCARAÑÁ

Autor: Ing. José Manuel Díaz Lozada

Director: Dr. Ing. Carlos Marcelo García Rodríguez

Palabras Claves: ADCP, Dispersión, Río Carcarañá, Hidrodinámica, Mezcla en ríos, Hidráulica Fluvial.

Resumen. La cuenca del Río Carcarañá, incluyendo a sus principales tributarios, tales como el Río Tercero (Ctalamochita), Río Saladillo, arroyo Tortugas, entre otros, es una de las principales cuencas superficiales del centro del país abarcando territorios de las Provincias de Córdoba y Santa Fe. Este sistema se convierte, evaluando sus efectos positivos, en una potencial fuente de agua para consumo y riego en la región. Sin embargo, las actividades antrópicas han puesto en peligro la disponibilidad futura del recurso hídrico, por lo que es necesario realizar el manejo sustentable del mismo. Para realizar este manejo sustentable es necesario cuantificar y caracterizar con precisión la disponibilidad del recurso y los procesos de mezcla que ocurren en el sistema fluvial y que determinan la calidad de ese recurso para evitar su degradación irreversible. Este sistema fluvial, además, puede tener efectos negativos sobre la región por su amenaza hídrica en periodos de crecidas, la cual no puede ser evitada, pero sí mitigada a través del diseño de medidas estructurales y no estructurales.

El objetivo de esta tesis es la cuantificación y caracterización del escurrimiento superficial del sistema fluvial del Río Carcarañá, para generar información necesaria para: a) el manejo sustentable del recurso hídrico superficial, y b) el diseño de medidas no estructurales para mitigar el riesgo hídrico ante eventos extremos. Para cumplir estos objetivos se realizaron intensas campañas de mediciones en diferentes secciones de los principales tributarios del sistema fluvial del Río Carcarañá utilizando tecnología Acústica Doppler de última generación (ADCP YSI/RiverSueyvor S5 para aguas poco profundas). Los principales resultados obtenidos incluyen: a) Información hidrológica generada a partir de 79 aforos en todo el sistema que permite evaluar la variación espacial y temporal de los caudales escurridos en la misma y determinar experimentalmente curvas que relacionan cota de superficie libre y caudal; b) Evaluación en diferentes secciones del coeficiente de dispersión longitudinal, el cual es un parámetro que indica la capacidad de mezcla del flujo y c) Evaluación de metodologías vigentes en la provincia de Córdoba para la determinación de medidas no estructurales (delimitación de líneas de ribera) para la mitigación de amenaza hídrica.

QUANTIFICATION AND CHARACTERIZATION OF SURFACE FLOW IN THE CARCARAÑÁ RIVER BASIN

Author: Ing. José Manuel Díaz Lozada

Director: Dr. Ing. Carlos Marcelo García Rodríguez

Key words: ADCP, Dispersion, Carcarañá river basin, Hydrodynamic, River mixing, River Hydraulics

Abstract: Carcarañá River basin, including its main tributaries such as Tercero River (also called Ctalamochita), Saladillo River and Tortugas Creek, etc., is an important surface watershed located on the center region of Argentina including areas of Córdoba and Santa Fe provinces. The mentioned river system is, evaluating its positive effects, potential source of water for drinking and irrigation in the region. In recent years, human activities have endangered future availability of water resources in this fluvial system, so a Sustainable Water Management is necessary. Characterization and quantification of water resource availability and the mixing process in the river system are required for this water management and to prevent an irreversible degradation of the resource. This river system also can have negative effects on the region in flood periods, which cannot be avoided, but can be mitigated through the design of structural and non-structural flood risk management measures.

This work's objective is the quantification and characterization of surface flow in the Carcarañá river system to generate information necessary to do: a) Sustainable management of surface water resources, and b) Design of structural and non-structural flood risk management measures. To achieve these objectives, intense field work had been performed in different cross sections of the main tributaries of the Carcarañá River system using Acoustic Doppler technology (ADCP YSI / S5 RiverSurveyor shallow waters). The main results of this work are: a) new hydrological information recorded in entire river system allowing both: the evaluation of the spatial and temporal variation of the flow discharge and the determination of flow stage–discharge relationships; b) experimental evaluation of the longitudinal dispersion coefficient in different cross sections, which is a parameter quantifying the mixing process; c) experimental evaluation of methods used nowadays in Córdoba Province, to define non-structural flood risk management measures.

AGRADECIMIENTOS

A mi director Carlos Marcelo García quien además de ser un gran profesor es una gran persona de la cual muchas cosas se pueden aprender más allá de lo académico.

A mis padres que siempre me apoyan y me incentivan a seguir adelante.

A Nico, Horacio, Leti, Matote, Erica, Mati, Antoine, Gustavo y Anita por el aguante y paciencia, y porque sin su apoyo y ayuda me hubiese sido imposible hacer este trabajo.

A Martín Romagnoli, Margarita Portapila y Ana Cosavella, por la enorme ayuda brindada.

A mis compañeros y docentes de la Maestría en Recursos Hídricos, por los gratos momentos vividos.

A la Secretaria de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Córdoba (SECyT) porque gracias a su beca fue posible elaborar esta tesis.



INDICE

INTRODUCCIÓN.....	23
Capítulo I: MARCO REFERENCIAL.....	27
1.1. Descripción general de la cuenca estudiada	27
1.2. Problemática existente	30
1.2.1 Manejo sustentable del Recurso.....	30
1.2.2 Diseño de medidas no estructurales para mitigar el riesgo hídrico	32
1.3. Estudios antecedentes	32
1.4. Metodología.....	34
Capítulo II: TÉCNICAS EXPERIMENTALES UTILIZADAS.....	38
2.1. Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP)	38
2.1.1 Introducción.....	38
2.1.2 Descripción del instrumento	39
2.1.3 Metodología de medición con ADPC desde plataformas móviles.....	42
2.1.4 Programas computacionales.....	53
2.2. Sonda Multiparamétrica	55
Capítulo III: LOCALIZACIÓN DE LOS SITIOS DE MEDICIÓN	58
3.1. Introducción.....	58
3.2. Localización de las secciones de medición.....	58
Capítulo IV: RESULTADOS DE LA CUANTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL FLUJO	81
4.1. Introducción.....	81
4.2. Resultados de caudales obtenidos durante las campañas	81
4.3. Contribución de los distintos tributarios al escurrimiento total del río Carcarañá	85
4.3.1 Campaña N° 8 (11 de junio de 2013)	85
4.3.2 Campaña N°11 (30 de septiembre y 1 de octubre de 2013).....	86
4.3.3 Campaña N°12 (19 y 20 de noviembre de 2013)	87
4.3.4 Campaña N° 16 (07, 08 y 09 de abril de 2014)	88
4.3.5 Campaña N° 17 (09, 10 y 11 de junio de 2014)	89
4.3.6 Campaña N° 18 (08, 09 y 10 de septiembre de 2014).....	90
4.3.7 Campaña N° 19 (16 de octubre de 2014)	91
4.3.8 Campaña N° 20 (17 y 18 de noviembre de 2014)	92
4.3.9 Resumen de las observaciones realizadas.	93
4.4. Elaboración de curvas de altura de superficie libre – caudal escurrido..	95
4.4.1 Marco Teórico	95
4.4.2 Valores experimentales de altura de superficie libre-caudal escurrido para distintas secciones de los principales tributarios de la cuenca del río Carcarañá.....	98
4.4.3 Ajustes estadísticos de relaciones empíricas entre los valores de altura de superficie libre- caudal escurrido.	103

4.4.4 Reconstrucción de los hidrogramas generados durante un evento de crecida extraordinario	111
4.5. Recomendaciones para efectuar un estudio de cuantificación del escurrimiento superficial de un sistema fluvial.	113
Capítulo V: CARACTERIZACIÓN DE PARÁMETROS COMPLEMENTARIOS RELEVADOS EN CAMPO	116
5.1. Introducción.....	116
5.2. Conductividad.....	116
5.2.1 Resultados obtenidos durante las campañas de medición	116
5.2.2 Análisis de la variabilidad espacial y temporal de la conductividad y temperatura de las masas de agua	118
5.2.3 Resumen de las observaciones realizadas	123
5.2.4 Relaciones Conductividad – Caudal	125
5.3. Curvas Granulométricas del material del lecho.....	126
5.3.1 Río Tercero (Ctalamochita).....	130
5.3.2 Río Saladillo	131
5.3.3 Arroyo Tortugas.....	133
5.3.4 Río Carcarañá	134
5.3.5 Comparación entre curvas granulométricas.	142
5.4. Coeficiente de rugosidad de Manning (n)	144
5.4.1 Coeficiente de rugosidad de Manning del Río Tercero (Ctalamochita)..	144
5.4.2 Coeficiente de rugosidad de Manning del Río Carcarañá.....	145
Capítulo VI: DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS NECESARIOS PARA EVALUAR LOS PROCESOS DE MEZCLA	147
6.1. Introducción.....	147
6.2. Marco Teórico.....	147
6.2.1 Dispersión longitudinal por corte.....	147
6.2.2 Metodologías para determinar experimentalmente el coeficiente de dispersión	148
6.3. Determinación del coeficiente de dispersión longitudinal.....	156
6.3.1 Aplicación de las ecuaciones empíricas para determinar el coeficiente de dispersión longitudinal.	156
6.3.2 Aplicación de la ecuación integral para estimar el coeficiente de mezcla longitudinal con caracterización hidrodinámica detallada.	157
6.4. Contraste de los resultados obtenidos con las distintas metodologías en las secciones analizadas.	168
6.5. Contraste de los resultados obtenidos con los disponibles en la bibliografía.	170
6.6. Metodología y recomendaciones para estimar el coeficiente de dispersión longitudinal (D).....	171

Capítulo VII: CONTRIBUCIÓN A LA DETERMINACIÓN TÉCNICA DE LINEAS DE RIBERA EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA.....	174
7.1. Introducción.....	174
7.2. Marco Teórico.....	174
7.2.1. Resistencia al flujo en cauces fluviales	174
7.2.2. Formulaciones de Hermanek.....	175
7.2.3. Contraste entre Hermanek y otras fórmulas de resistencia al flujo ..	176
7.2.4. Metodología de cálculo de líneas de ribera en la Provincia de Córdoba según decreto N° 448.....	177
7.3. Trabajos de campo	178
7.3.1. Zona de estudio	178
7.3.2. Resultados.....	179
7.4. Aplicación de las formulaciones de Hermanek y otras fórmulas de resistencia para caracterizar el escurrimiento en las condiciones de flujo evaluadas en campo	181
7.4.1. Formulación de Hermanek utilizando el promedio de los valores de pendiente de superficie libre y de pendiente de fondo medias en todo el tramo	182
7.4.2. Formulación de Hermanek utilizando el valor de pendiente media de fondo en el tramo.....	182
7.4.3. Fórmula de Manning utilizando un coeficiente de rugosidad único en toda la sección y valores de pendiente de superficie libre media en todo el tramo	183
7.4.4. Fórmula de Manning utilizando un coeficiente de rugosidad único en toda la sección y valores de pendiente de fondo media en todo el tramo .	183
7.4.5. Fórmula de Manning utilizando un coeficiente de rugosidad compuesto (teniendo en cuenta su variabilidad en el cauce y en la planicie de inundación) y valores de pendiente de fondo media en todo el tramo	184
7.4.6. Análisis de resultados obtenidos con las distintas formulaciones....	186
7.5. Implementación de modelo hidráulico unidimensional Hec-RAS	187
7.5.1. Descripción del Modelo.....	187
7.5.2. Resultados.....	188
Capítulo VIII: CONCLUSIONES.....	193
Capítulo IX: RECOMENDACIONES.....	198
REFERENCIAS.....	199

INDICE DE FIGURAS

<u>Figura 1:</u> Cuenca del río Carcarañá.....	27
<u>Figura 2:</u> Cuenca del río Tercero –Ctalamochita- (Lenarduzzi 2013).....	28

<u>Figura 3:</u> Complejos hidroeléctricos ubicados en la cuenca alta del río Tercero (Ctalamochita).....	28
<u>Figura 4:</u> Cuenca del arroyo Tortugas	29
<u>Figura 5:</u> Usos estimados del agua a nivel mundial. Fuente: http://iessonferrerdgh1e07.blogspot.com.ar/	30
<u>Figura 6:</u> Planta petroquímica ATANOR en la localidad de Río Tercero	31
<u>Figura 7:</u> Inundación en la ciudad de Bell Ville en el mes de Marzo de 2014.....	32
<u>Figura 8:</u> Esquema de funcionamiento del ADCP	38
<u>Figura 9:</u> Plataforma Móvil con ADCP YSI/SonTek S5 y todos sus componentes.	40
<u>Figura 10:</u> Características del Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP) YSI/SonTek S5	41
<u>Figura 11:</u> Elementos necesarios para realizar mediciones con ADCP.....	42
<u>Figura 12:</u> Módulo de energía y comunicación (extraído del folleto RiverSurveyor - Sontek).....	42
<u>Figura 13:(a)</u> Esquema y ejemplo de una mala sección de medición. El ejemplo corresponde a una sección sobre el río Tercero (Ctalamochita) en el puente que une la localidad homónima con Despeñaderos. (b) Esquema y ejemplo de una sección de medición óptima. El ejemplo corresponde a una sección del río Saladillo ubicada en las cercanías del puente de la ruta provincial 6.....	44
<u>Figura 14:</u> Sonda multiparamétrica para el relevamiento de diferentes parámetros entre los cuales se encuentra la salinidad y temperatura.....	47
<u>Figura 15:</u> Esquema de movimientos a realizar para la calibración de la brújula del ADCP	48
<u>Figura 16:</u> Esquema de un ADCP con las distancias que deben ser cargadas en el programa de registro de datos al momento de realizar la medición.....	48
<u>Figura 17:</u> Diferentes formas de operación de la plataforma móvil(A) desde puente (B) Desde las márgenes (C) Desde cable-carril (D) Desde bote. El modo de operación dependerá de las características del flujo y la sección.....	49
<u>Figura 18:</u> Perdida de celdas producida por los altos niveles de turbulencia presente en el flujo.....	50
<u>Figura 19:</u> Perdida de detección del lecho del río (Bottom-Track) debido a que la profundidad del flujo es mayor que la máxima profundidad de registro del instrumento.	51
<u>Figura 20:</u> En las secciones de medición muchas veces se pueden encontrar elementos (escombros, postes, rocas, etc.) que se pueden utilizar como	

referencia para referenciar el instrumento y obtener una medición precisa de las márgenes.	52
<u>Figura 21</u> : Interfaz del Programa RiverSuveyor Live 3.60.....	54
<u>Figura 22</u> : Interfaz gráfica de VMT	55
<u>Figura 23</u> : Sonda multiparamétrica Horiba U-10.....	55
<u>Figura 24</u> : Secciones de aforo de la cuenca del río Carcarañá.....	59
<u>Figura 25</u> : Sección de aforo en el río Tercero (Ctalamochita) ubicada en el balneario de la ciudad homónima.....	60
<u>Figura 26</u> : Sección de aforo en el río Tercero (Ctalamochita) ubicada en el balneario de la ciudad homónima.....	60
<u>Figura 27</u> : Sección de aforo en el puente de ingreso a la localidad de Villa Ascasubi.	61
<u>Figura 28</u> : Imagen del puente sobre el río Tercero (Ctalamochita) en la localidad de Villa Ascasubi.	61
<u>Figura 29</u> : Imagen de la sección de aforo en el río Tercero (Ctalamochita) ubicada en el cruce con ruta 158 (Villa María).	62
<u>Figura 30</u> : Imagen de la sección de aforo en el río Tercero (Ctalamochita) ubicada en el cruce con ruta 158 (Villa María).	62
<u>Figura 31</u> : Sección de aforo en el río Tercero (Ctalamochita) ubicada en el puente Alberdi (Villa María).....	63
<u>Figura 32</u> : Imagen de la Sección de aforo en el río Tercero (Ctalamochita) ubicada en el puente Alberdi (Villa María).	63
<u>Figura 33</u> : Sección de aforo en puente Cárcano en la localidad de Ramón J. Cárcano.	64
<u>Figura 34</u> : Imagen del puente Cárcano sobre el río Tercero (Ctalamochita) en la localidad de Ramón J. Cárcano.....	64
<u>Figura 35</u> : Sección de aforo en el río Tercero (Ctalamochita) ubicada en el azud Bell Ville.	65
<u>Figura 36</u> : Sección de aforo en el río Tercero (Ctalamochita) ubicada en el azud Bell Ville.	65
<u>Figura 37</u> : Sección de aforo en puente Sarmiento de la localidad de Bell Ville..	66
<u>Figura 38</u> : Imagen del Puente Sarmiento sobre el río Tercero (Ctalamochita) de la ciudad de Bell Ville.	66
<u>Figura 39</u> : Sección de aforo en el río Tercero (Ctalamochita) ubicada en el azud San Marcos.....	67
<u>Figura 40</u> : Sección de aforo en el río Tercero (Ctalamochita) ubicada en el azud San Marcos.....	67

<u>Figura 41</u> : Sección de aforo en el Río Tercero (Ctalamochita) ubicada en la confluencia con el río Saladillo.	68
<u>Figura 42</u> : Sección de aforo en el río Tercero (Ctalamochita) ubicada en la confluencia con el río Saladillo.	68
<u>Figura 43</u> : Sección de aforo en el río Saladillo ubicada en el cruce con la ruta provincial 6.	69
<u>Figura 44</u> : Sección de aforo en el río Saladillo ubicada en el cruce con la ruta provincial 6.	69
<u>Figura 45</u> : Sección de aforo en el Río Saladillo ubicada en la confluencia con el río Tercero (Ctalamochita).....	70
<u>Figura 46</u> : Sección de aforo en el río Saladillo ubicada en la confluencia con el río Tercero (Ctalamochita).....	70
<u>Figura 47</u> : Sección de aforo en el río Carcarañá ubicada en la confluencia entre los ríos Tercero (Ctalamochita) y Saladillo.	71
<u>Figura 48</u> : Sección de aforo en el río Carcarañá ubicada en la confluencia entre los ríos Tercero (Ctalamochita) y Saladillo.	71
<u>Figura 49</u> : Sección de aforo sobre el río Carcarañá ubicada a 11,5km aguas abajo de la confluencia en cercanías de la localidad de Inrville.	72
<u>Figura 50</u> : Sección de aforo sobre el río Carcarañá ubicada a 11,5km aguas abajo de la confluencia en cercanías de la localidad de Inrville.	72
<u>Figura 51</u> : Sección de aforo sobre el río Carcarañá ubicada en el cruce con ruta provincial 12 en cercanías de la localidad de Inrville.	73
<u>Figura 52</u> : Sección de aforo sobre el río Carcarañá ubicada en el cruce con ruta provincial 12 en cercanías de la localidad de Inrville.	73
<u>Figura 53</u> : Sección de aforo en el río Carcarañá ubicada en el cruce con la ruta provincial 15 (Santa Fe) en proximidades de la localidad de Cruz Alta.	74
<u>Figura 54</u> : Sección de aforo en el río Carcarañá ubicada en el cruce con la ruta provincial 15 (Santa Fe) en proximidades de la localidad de Cruz Alta.	74
<u>Figura 55</u> : Sección de aforo en el río Carcarañá ubicada en el Parque Sarmiento de la localidad de Carcarañá.....	75
<u>Figura 56</u> : Sección de aforo en el río Carcarañá ubicada en el Parque Sarmiento de la localidad de Carcarañá.....	75
<u>Figura 57</u> : Sección de aforo en el río Carcarañá en el cruce con la ruta nacional 9 en la localidad de Carcarañá.	76
<u>Figura 58</u> : Sección de aforo en el río Carcarañá en el cruce con la ruta nacional 9 en la localidad de Carcarañá.	76

<u>Figura 59</u> : Sección de aforo en el río Carcarañá ubicada en la ciudad de Pueblo Andino.....	77
<u>Figura 60</u> : Sección de aforo en el río Carcarañá ubicada en la ciudad de Pueblo Andino.....	77
<u>Figura 61</u> : Sección de aforo en el río Carcarañá ubicada en proximidades de la localidad de Puerto Gaboto.....	78
<u>Figura 62</u> : Sección de aforo en el río Carcarañá ubicada en proximidades de la localidad de Puerto Gaboto.....	78
<u>Figura 63</u> : Sección de aforo en el arroyo Tortugas ubicada en proximidades de la localidad homónima.	79
<u>Figura 64</u> : Sección de aforo en el arroyo Tortugas ubicada en proximidades de la localidad homónima.	79
<u>Figura 65</u> : Contribución relativa de los tributarios principales en el caudal escurrido total en el río Carcarañá en la sección ubicada en Cruz Alta en la campaña de medición de día 11/06/2013.....	86
<u>Figura 66</u> : Contribución relativa de los tributarios principales al caudal total escurrido en el río Carcarañá en la localidad de Puerto Gaboto previo a su desembocadura en el río Coronda - Campaña de medición de los días 30/09/2013 y 01/10/2013.....	87
<u>Figura 67</u> : Contribución relativa de los tributarios principales al caudal total escurrido en el río Carcarañá en la localidad de Puerto Gaboto previo a su desembocadura en el río Coronda - Campaña de los días 18 y 19/11/2013 y 20/11/2013.....	88
<u>Figura 68</u> : Contribución relativa de los tributarios principales al caudal total escurrido en el río Carcarañá en la localidad de Puerto Gaboto previo a su desembocadura en el río Coronda - Campaña del 07,08 y 09 de abril de 2014. .	89
<u>Figura 69</u> : Contribución relativa de los tributarios principales al caudal total escurrido en el río Carcarañá en la localidad de Puerto Gaboto previo a su desembocadura en el río Coronda - Campaña del 09,10 y 11 de junio de 2014. .	90
<u>Figura 70</u> : Contribución relativa de los tributarios principales al caudal total escurrido en el río Carcarañá en la localidad de Puerto Gaboto previo a su desembocadura en el río Coronda - Campaña del 09,10 y 11 de Septiembre de 2014.	91
<u>Figura 71</u> : Contribución relativa de los tributarios principales en el caudal escurrido total en el río Carcarañá en la sección ubicada en Cruz Alta en la campaña de medición de día 16/10/2014.....	92

<u>Figura 72:</u> Contribución relativa de los tributarios principales en el caudal escurrido total en el río Carcarañá en la sección ubicada en la localidad de Carcarañá en la campaña de medición de los días 17 y 18 de noviembre de 2014.	92
<u>Figura 73:</u> Contraste entre los caudales estimados mediante de datos de potencia generada por la central Piedras Moras y los caudales medidos en las sección emplazadas en el Balneario de la ciudad de río Tercero y Villa Ascasubi.	93
<u>Figura 74:</u> Contraste entre los caudales erogados por el vertedero del Dique Piedras Moras y los caudales medidos en la localidad de Villa Ascasubi.	94
<u>Figura 75:</u> Evolución del caudal de los ríos Tercero (Ctalamochita) y Saladillo en la confluencia.....	94
<u>Figura 76:</u> Evolución del caudal del río Carcarañá en diferentes secciones de aforo.....	95
<u>Figura 77 :</u> Esquema típico de una curva altura de superficie libre (H) –caudal (Q)	96
<u>Figura 78:</u> Valores observados de alturas de superficie libre (H) en función del caudal escurrido (Q) para el río Tercero(Ctalamochita) en el puente de ingreso a la localidad de Villa Ascasubi. Los niveles de superficie libre estan referenciados a la escala existente en una de las pilas del puente. (ver imagen de la izquierda).....	98
<u>Figura 79:</u> Valores observados de altura de superficie libre (H) en función del caudal (Q) del río Tercero (Ctalamochita) en el Puente Alberdi de Villa María. Los niveles de superficie libre estan referenciados a la escala existente en una de las pilas del puente. (ver imagen de la izquierda).....	99
<u>Figura 80:</u> Valores observados de altura de superficie libre (H) en función del caudal (Q) para el río Tercero (Ctalamochita) en el puente Sarmiento de la localidad de Bell Ville. Los niveles de superficie libre estan referenciados a la escala existente en estribo de margen derecha del puente. (ver imagen de la izquierda).....	99
<u>Figura 81:</u> Valores observados de altura de superficie libre (H) en función del caudal(Q) del río Tercero(Ctalamochita) en el puente Surla de la localidad de Bell Ville. Los niveles de superficie libre estan referenciados a la escala existente en una de las pilas del puente. (ver imagen de la izquierda).....	100
<u>Figura 82:</u> Valores observados de altura de superficie libre (H) en función del caudal(Q) del río Tercero (Ctalamochita) en el Azud San Marcos. Los niveles de	

superficie libre estan referenciados a la escala existente en la margen izquierda del canal de aproximación del azud. (ver imagen de la izquierda).	101
<u>Figura 83:</u> Valores observados de altura de superficie libre (H) en función del caudal del río Carcaraña en el puente Ruta 15 en las cercanías de Cruz Alta. Los niveles de superficie libre estan referenciados a escalas existente en esa sección (ver imagen de la izquierda).	101
<u>Figura 84:</u> Valores observados de altura de superficie libre (H) en función del caudal (Q) del río Caracarañá en la localidad de Pueblo Andino. Los niveles de superficie libre estan referenciados a la escala existente en una de las pilas del puente. (ver imagen de la izquierda).....	102
<u>Figura 85:</u> Valores observados de altura de superficie libre (H) en función del caudal (Q) del arroyo Tortugas en el puente de la ruta nacional 9. Los niveles de superficie libre estan referenciados a un nivel localizado 4,5 metros por debajo del nivel inferior de la viga del puente. (ver imagen de la izquierda).....	103
<u>Figura 86:</u> Contraste de los valores de altura de superficie libre (H) en función del caudal (Q) registrados en la sección de Pueblo Andino – Santa Fe para esta tesis y por la SSRH.....	103
<u>Figura 87:</u> Esquema de un canal rectangular donde se representa al nivel de superficie libre registrado respecto a un nivel de referencia arbitrario (H) y el nivel caudal nulo (H_{Q0})	104
<u>Figura 88:</u> Ajuste estadístico de una curva que relaciona las alturas de superficie libre-caudal para el río Tercero (Ctalamochita) en la sección ubicada en el puente de ingreso a la localidad de Villa Ascasubi. Los valores de nivel estan referenciados a la escala existente en una de las pilas del puente. $H_{Q0} = -0,36$ m.	105
<u>Figura 89:</u> Ajuste estadístico de una curva que relaciona las alturas de superficie libre-caudal para el río Tercero (Ctalamochita) en la sección ubicada en el puente Alberdi de la localidad de Villa Maria. Los valores de nivel estan referenciados a la escala existente en una de las pilas del puente. $H_{Q0} = -0,69$ m.	105
<u>Figura 90:</u> Ajuste estadístico de una curva que relaciona las alturas de superficie libre-caudal para el río Tercero (Ctalamochita) en la sección ubicada en el puente Sarmiento de la localidad de Bell Ville. Los valores de nivel estan referenciados a la escala existente en una de las pilas del puente. $H_{Q0} = -0,14$ m.	106
<u>Figura 91:</u> Ajuste estadístico de una curva que relaciona las alturas de superficie libre-caudal para el río Tercero (Ctalamochita) en la sección ubicada en el	

puente Sturla de la localidad de Bell Ville. Los valores de nivel estan referenciados a la escala existente en una de las pilas de dicho puente. $H_{Q0} = 1,00\text{m}$	106
<u>Figura 92:</u> Ajuste estadístico de una curva que relaciona las alturas de superficie libre-caudal para el río Tercero (Ctalamochita) en el Azud San Marcos de la localidad de San Marcos Sud. Los valores de nivel estan referenciados a la escala existente en dicho azud. $H_{Q0} = -0,08\text{ m}$	106
<u>Figura 93:</u> Curva de altura de superficie libre-caudal para el río Carcarañá en la seccion ubicada en el puente de ruta 15 de la localidad de Cruz Alta. Los valores de nivel estan referenciados a la escala existente en una de las pilas de dicho puente. $H_{Q0} = -0,60\text{ m}$	107
<u>Figura 94:</u> Ajuste estadístico de una curva que relaciona las alturas de superficie libre-caudal para el río Carcarañá en la seccion ubicada en la localidad de Pueblo Andino. Los valores de nivel estan referenciados a la escala existente en una de las pilas del puente. $H_{Q0} = -0,77\text{ m}$	107
<u>Figura 95:</u> Ajuste estadístico de una curva que relaciona las alturas de superficie libre-caudal para el arroyo Tortugas en el puente de ingreso a la localidad homonima. Los niveles de superficie libre estan referenciados a un nivel localizado 4,5 metros por debajo del nivel inferior de la viga del puente. $H_{Q0} = -0,22\text{ m}$	107
<u>Figura 96:</u> Azud San Marcos (A) caudal 13,56 m ³ /s (B) cuadal 232,75 m ³ /s. Se puede observar que para el caudal extremo el azud se encuentra ahogado y su funcionamiento hidraulico difiere.	108
<u>Figura 97:</u> Escala ubicada en el puente Alberdi de Villa Maria. Se puede observar que el “cero” de la escala se encuentra aproximadamente a 60 cm del lecho en esa pila, lo cual indica que existen situaciones en donde el flujo escurre con niveles de superficie libre por debajo del cero de la escala.....	111
<u>Figura 98:</u> Hidrogramas de crecida del río Tercero (Ctalamochita) en Piedras Moras, Villa Maria y Bell Ville.....	112
<u>Figura 99:</u> Evolución de la conductividad en [mS/cm] para diferentes tramos de los ríos Tercero (Ctalamochita), Saladillo y Carcarañá durante la campaña del 11/06/2013.....	119
<u>Figura 100:</u> Evolución de la conductividad en [mS/cm] para diferentes tramos de los ríos Tercero (Ctalamochita), Saladillo y Carcarañá durante los días 09 y 10 de septiembre de 2013.....	119

<u>Figura 101</u> : Evolución de la conductividad en [mS/cm] para diferentes tramos de los ríos Tercero (Ctalamochita), Saladillo y Carcarañá durante los días 30 de septiembre y 01 de octubre de 2013.	120
<u>Figura 102</u> : Evolución de la conductividad en [mS/cm] para diferentes tramos de los ríos Tercero (Ctalamochita), Saladillo, Carcarañá y arroyo Tortugas durante los días 19 y 20 de noviembre de 2013.....	121
<u>Figura 103</u> : Evolución de la conductividad en [mS/cm] para diferentes tramos de los ríos Tercero (Ctalamochita), Saladillo, Carcarañá y arroyo Tortugas durante los días 08 y 09 de Abril de 2014.....	121
<u>Figura 104</u> : Evolución de la conductividad en [mS/cm] para diferentes tramos de los ríos Tercero (Ctalamochita), Saladillo, Carcarañá y arroyo Tortugas durante los días 09, 10 y 11 de Junio de 2014	122
<u>Figura 105</u> : Evolución de la conductividad en [mS/cm] para diferentes tramos de los ríos Tercero (Ctalamochita), Saladillo, Carcarañá y arroyo Tortugas durante los días 08, 09 y 10 de Septiembre de 2014.....	123
<u>Figura 106</u> : Contraste entre la conductividad medida 11,5km aguas abajo de la confluencia de los ríos Tercero (Ctalamochita) y Saladillo y la conductividad calculada a través de un balance de masas. La línea roja corresponde a la línea de correspondencia perfecta.	124
<u>Figura 107</u> : Contraste entre la conductividad medida en la localidad de Cruz Alta ubicada a pocos kilómetros de la desembocadura del arroyo Tortugas en el río Carcarañá y la conductividad calculada a través de un balance de masas. La línea roja corresponde a la línea de correspondencia perfecta.....	124
<u>Figura 108</u> : Curvas conductividad vs caudal determinadas para diferentes secciones del sistema de estudio. Donde Q[m ³ /s] y C [mS/cm]	126
<u>Figura 109</u> : Columna de tamices utilizados para realizar el ensayo granulometría en este trabajo.	129
<u>Figura 110</u> : Probeta con solución de suelo, agua y floculante, y el hidrómetro en su interior.....	130
<u>Figura 111</u> : Curva granulométrica del río Tercero (Ctalamochita) – Sección puente Alberdi (Villa María).....	130
<u>Figura 112</u> : Muestra de suelo del río Tercero (Ctalamochita) – Sección puente Alberdi (Villa María).	131
<u>Figura 113</u> : Curva granulométrica del Río Saladillo – Sección puente ruta 6 (Monte Buey).....	132
<u>Figura 114</u> : Muestra de suelo del río Saladillo – Sección puente ruta 6 (Monte Buey).....	132

<u>Figura 115</u> : Curva granulométrica del arroyo Tortugas – Sección Tortugas....	134
<u>Figura 116</u> : Muestra de suelo del arroyo Tortugas – Sección Tortugas.....	134
<u>Figura 117</u> : Curva granulométrica del río Carcarañá – Sección puente ruta 12 (Inrville).	135
<u>Figura 118</u> : Muestra de suelo del río Carcarañá – Sección puente ruta 12 (Inrville).	136
<u>Figura 119</u> : Curva granulométrica del río Carcarañá – Sección puente ruta 15 (Cruz Alta).	137
<u>Figura 120</u> : Muestra de suelo del río Carcarañá – Sección puente ruta 15 (Cruz Alta).	137
<u>Figura 121</u> : Curva granulométrica del río Carcarañá – Sección Parque Sarmiento (Carcarañá).	139
<u>Figura 122</u> : Muestra de suelo del río Carcarañá – Sección Parque Sarmiento (Carcarañá).	139
<u>Figura 123</u> : Curva granulométrica del río Carcarañá – Sección Pueblo Andino.	140
<u>Figura 124</u> : Muestra de suelo del río Carcarañá – Sección Pueblo Andino.	141
<u>Figura 125</u> : Curva granulométrica del río Carcarañá – Sección Puerto Gaboto.	142
<u>Figura 126</u> : Curva granulométrica del río Carcarañá – Sección Puerto Gaboto.	142
<u>Figura 127</u> : Comparación entre las curvas granulométricas de los ríos Carcarañá, Tercero (en Villa María), Saladillo y arroyo Tortugas.....	143
<u>Figura 128</u> : Comparación entre las curvas granulométricas a lo largo de diferentes secciones de aforo a lo largo del río Carcarañá.	143
<u>Figura 129</u> : Las tres etapas de mezcla de un contaminante en un río (Fischer et al, 1979).....	147
<u>Figura 130</u> : Diagrama esquemático que muestra el efecto de la dispersión por corte en la mezcla longitudinal de un contaminante (Rutherford, 1994).	148
<u>Figura 131</u> : Inyección de trazador (Carr y Rehmann, 2007)	150
<u>Figura 132</u> : Perfil de velocidades en función del coeficiente alfa ($\alpha = \beta$).....	155
<u>Figura 133</u> : Distribución asimétrica de velocidades, con $\alpha < \beta$	155
<u>Figura 134</u> : Geometría del Cauce en función del coeficiente rho.	156
<u>Figura 135</u> : Comparación entre valores de velocidades medias en la vertical registradas en una transecta obtenida al promediar múltiples transectas, realizadas en sección sobre el río Tercero (Ctalamochita) en el balneario de la localidad homonima, campaña de medición del día 11/06/2012.	157

<u>Figura 136</u> : Comparación entre batimetrías registradas en una transecta obtenida al promediar múltiples transectas, realizadas en sección sobre el río Tercero (Ctalamochita) en el balneario de la localidad homonima, campaña de medición del día 11/06/2012	158
<u>Figura 137</u> : Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,821$ (derecha) y perfil de fondo con $q = 1,455$ (izquierda) para Río Tercero (Ctalamochita) en el balneario de la ciudad homónima, 11/06/2012.....	159
<u>Figura 138</u> : Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,112$ (derecha) y perfil de fondo con $q = 1,582$ (izquierda) para Río Tercero (Ctalamochita) en el balneario de la ciudad homónima, 10/09/2012.....	159
<u>Figura 139</u> : Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,457$ (derecha) y perfil de fondo con $q = 2,072$ (izquierda) para Río Tercero (Ctalamochita) en el balneario de la ciudad homónima, 12/11/2012.....	159
<u>Figura 140</u> : Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,180$ (derecha) y perfil de fondo con $q = 1,212$ (izquierda) para Río Saladillo (ruta 6), 11/06/2013.....	159
<u>Figura 141</u> : Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,172$ (derecha) y perfil de fondo con $q = 1,404$ (izquierda) para Río Saladillo (ruta 6), 11/09/2013.....	160
<u>Figura 142</u> : Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 2,244$ (derecha) y perfil de fondo con $q = 3,070$ (izquierda) para Río Carcarañá (Carcarañá), 30/09/2013...	160
<u>Figura 143</u> : Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,800$ (derecha) y perfil de fondo con $q = 1,192$ (izquierda) para Río Carcarañá (Cruz Alta), 30/09/2013..	160
<u>Figura 144</u> : Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,247$ (derecha) y perfil de fondo con $q = 1,087$ (izquierda) para Río Saladillo (ruta 6), 30/09/2013.....	160
<u>Figura 145</u> : Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,149$ (derecha) y perfil de fondo con $q = 1,898$ (izquierda) para Río Saladillo (ruta 6), 19/11/2013.....	161
<u>Figura 146</u> : Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,411$ (derecha) y perfil de fondo con $q = 10,745$ (izquierda) para Río Carcarañá (Carcarañá), 19/11/2013.	161
<u>Figura 147</u> : Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,457$ (derecha) y perfil de fondo con $q = 14,837$ (izquierda) para Río Carcarañá (Inriville), 19/11/2013...	161
<u>Figura 148</u> : Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,519$ (derecha) y perfil de fondo con $q = 5,061$ (izquierda) para arroyo Tortugas (Tortugas – Santa Fe), 20/11/2013.....	161
<u>Figura 149</u> : Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,821$ (derecha) y perfil de fondo con $q = 1,455$ (izquierda) para el Río Tercero (Ctalamochita) (Bell Ville), 10/06/2014.....	162

<u>Figura 150:</u> Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,709$ (derecha) y perfil de fondo con $q = 7,432$ (izquierda) para el para Río Carcarañá (Inrville), 10/06/2014.	162
<u>Figura 151:</u> Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,709$ (derecha) y perfil de fondo con $q = 7,432$ (izquierda) para el para Río Saladillo (Ruta 6), 10/06/2014.	162
<u>Figura 152</u> Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 2,057$ y $\beta = 1,763$ (derecha) y perfil de fondo con una funcion polinómica (izquierda) para río Tercero (Ctalamochita) en el balneario de la ciudad homonima, 11/06/2012.	163
<u>Figura 153:</u> Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,352$ y $\beta = 1,200$ (derecha) y perfil de fondo con una funcion polínómica (izquierda) para el río Tercero (Ctalamochita) en el balneario de la ciudad homónima(10/09/2012).....	164
<u>Figura 154:</u> Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,451$ y $\beta = 1,546$ (derecha) y perfil de fondo con una funcion polinómica (izquierda) para el río Tercero (Ctalamochita) en el balneario de la ciudad homónima(12/11/2012).....	164
<u>Figura 155:</u> Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,102$ y $\beta = 1,259$ (derecha) y perfil de fondo con una funcion polinómica (izquierda) para el río Saladillo (ruta 6) (11/06/2013).....	164
<u>Figura 156:</u> Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,172$ y $\beta = 1,172$ (derecha) y perfil de fondo con una funcion polinómica (izquierda) para el río Saladillo (ruta 6) (10/09/2013).....	164
<u>Figura 157:</u> Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 2,244$ y $\beta = 2,244$ (derecha) y perfil de fondo con una funcion polinómica (izquierda) para el río Carcarañá (Carcarañá) (30/09/2013).	165
<u>Figura 158:</u> Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 2,180$ y $\beta = 2,309$ (derecha) y perfil de fondo con $q = 1,192$ para río Carcarañá (Cruz alta), 30/09/2013.....	165
<u>Figura 159:</u> Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,242$ y $\beta = 1,391$ (derecha) y perfil de fondo con una funcion polinómica (izquierda) para el río Saladillo (ruta 6) (30/09/2013).....	165
<u>Figura 160:</u> Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,324$ y $\beta = 1,608$ (derecha) y perfil de fondo con $q = 10,745$ (izquierda) para el río Carcarañá (Carcarañá) (19/11/2013).....	165
<u>Figura 161:</u> Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,712$ y $\beta = 1,464$ (derecha) y perfil de fondo (izquierda) con funciones polinómica para río Carcarañá (Inrville), 19/11/2013.....	166
<u>Figura 162:</u> Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,483$ y $\beta = 1,882$ (derecha) y perfil de fondo con $q = 5,061$ (izquierda) para el arroyo Tortugas (Tortugas – Santa Fe) (19/11/2013).....	166

<u>Figura 163:</u> Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,662$ y $\beta = 1,763$ (derecha) y perfil de fondo con funciones polinómicas (izquierda) para el río Tecero (Ctalamochita) -Bell Ville (10/06/2014).	166
<u>Figura 164:</u> Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,953$ y $\beta = 1,637$ (derecha) y perfil de fondo con funciones polinómicas (izquierda) para el río Carcarañá (Inriville) (10/06/2014).	166
<u>Figura 165</u> Ajuste de perfil de velocidades (derecha) y perfil de fondo (izquierda) con funciones polinómicas para el río Tercero (Ctalamochita) en el balneario de la ciudad homonima, 11/06/2012.	167
<u>Figura 166:</u> Ajuste de perfil de velocidades con una función polinómica (derecha) y perfil de fondo con $q = 1,192$ para río Carcarañá (Cruz alta), 30/09/2013.....	167
<u>Figura 167:</u> Ajuste de perfil de velocidades (derecha) y perfil de fondo (izquierda) con funciones polinómicas para el río Saladillo (ruta 6) (19/11/2013).	167
<u>Figura 168:</u> Ajuste de perfil de velocidades (derecha) y perfil de fondo (izquierda) con funciones polinómicas para río Carcarañá (Inriville), 19/11/2013.....	167
<u>Figura 169:</u> Ajuste de perfil de velocidades perfil de fondo con funciones polinómicas (izquierda) para el río Saladillo (Ruta 6) (10/06/2014).	168
<u>Figura 170:</u> Comparación entre los coeficientes de dispersión obtenidos mediante las ecuaciones empíricas y los obtenidos mediante la ecuación integral de Fischer (1979) en base a una caracterización hidrodinámica detallada	169
<u>Figura 171:</u> Coeficientes de dispersión longitudinal (D) de diferentes secciones del río Carcarañá y sus tributarios obtenidos mediante la resolución de la ecuación integral detallada con mejores aproximaciones (MA) en contraste con los resultados reportados por Rutherford (1994).....	170
<u>Figura 172:</u> Johann Hermanek	176
<u>Figura 173:</u> Parámetros hidráulicos intervinientes	176
<u>Figura 174:</u> Esquema de cálculo de líneas de ribera en la Provincia de Córdoba, según lo establece el decreto N° 448	178
<u>Figura 175:</u> Localización del tramo del sistema fluvial de estudio en la ciudad de Bell Ville – Córdoba.....	179
<u>Figura 176:</u> Perfil longitudinal del tramo de estudio en la ciudad de Bell Ville.	179

<u>Figura 177</u> : Campo de velocidades medias longitudinales obtenidos en la sección ubicada aguas abajo del puente Sarmiento – Bell Ville (a) 05/03/14 (b) 06/03/14 (c) 08/04/14 (d) 10/06/14.....	181
<u>Figura 179</u> : Cauce principal y Planicies de inundación en el tramo de estudio.	185
<u>Figura 179</u> : Parámetros intervinientes en el cálculo de n compuesto	186
<u>Figura 180</u> : Modelo Hidráulico Hec-RAS provisto por la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba.....	187
<u>Figura 181</u> : Modelo Hidráulico Unidimensional Hec-RAS con las modificaciones realizadas por los autores de este trabajo.....	188
<u>Figura 182</u> : Sección inundada aguas abajo del puente Sarmiento obtenida con el modelo unidimensional para la condición 1: Caudal = 256 m ³ /s.....	188
<u>Figura 183</u> : Sección inundada aguas abajo del puente Sarmiento obtenida con el modelo unidimensional para la condición 2: Caudal = 245 m ³ /s.....	189
<u>Figura 184</u> : Sección inundada aguas abajo del puente Sarmiento obtenida con el modelo unidimensional para la condición 3. Caudal = 112 m ³ /s.....	190
<u>Figura 185</u> : Sección inundada aguas abajo del puente Sarmiento obtenida con el modelo unidimensional para la condición 4: Caudal = 29 m ³ /s.....	190
<u>Figura 186</u> : Contraste entre los parámetros modelado y los medidos en campo. (a) Velocidades (b) Profundidades (c) Áreas. La línea a 45 ^a indica correspondencia perfecta.....	191

INDICE DE TABLAS

<u>Tabla 1</u> : Características ADCP RiverSurveyor S5 utilizado en este trabajo (Manual Sontek 2010).....	39
<u>Tabla 2</u> : Características técnicas de la sonda multiparamétrica Horiba U-10.....	56
<u>Tabla 3</u> : Resultados obtenidos en las campañas de aforo.	81
<u>Tabla 4</u> : Parámetros calibrados de las curvas altura-caudal en diferentes secciones del sistema fluvial del río Carcarañá considerando H _{Q0} es nulo.....	104
<u>Tabla 5</u> : Parámetros de la ecuacion 1 calibrados en diferentes secciones del sistema fluvial del río Carcarañá.....	108
<u>Tabla 6</u> : Conductividad y temperatura en diferentes secciones de aforo.	116
<u>Tabla 7</u> : Tamices normalizados necesarios para realizar el ensayo de granulometría.....	127
<u>Tabla 8</u> : Sistema de Clasificación de Suelos Unificado (USCS).....	128

<u>Tabla 9</u> : Método de análisis mecánico mediante tamices aplicado al río Tercero (Ctalamochita) – Sección puente Alberdi (Villa María).	130
<u>Tabla 10</u> : Método del hidrómetro aplicado al río Saladillo – Sección puente ruta 6 (M.B.).	131
<u>Tabla 11</u> : Método de análisis mecánico mediante tamices aplicado al río Saladillo – Sección puente ruta 6 (Monte Buey).	132
<u>Tabla 12</u> : Método del hidrómetro aplicado al arroyo Tortugas – Sección Tortugas.	133
<u>Tabla 13</u> : Método de análisis mecánico mediante tamices aplicado al arroyo Tortugas – Sección Tortugas.	133
<u>Tabla 14</u> : Método del hidrómetro aplicado al Río Carcarañá – Sección puente ruta 12 (Inrville).	134
<u>Tabla 15</u> : Método de análisis mecánico mediante tamices aplicado al Río Carcarañá – Sección puente ruta 12 (Inrville).	135
<u>Tabla 16</u> : Método del hidrómetro aplicado al Río Carcarañá – Sección puente ruta 15 (Cruz Alta).	136
<u>Tabla 17</u> : Método de análisis mecánico mediante tamices aplicado al Río Carcarañá – Sección puente ruta 15 (Cruz Alta).	137
<u>Tabla 18</u> : Método del hidrómetro aplicado al Río Carcarañá – Sección Parque Sarmiento (Carcarañá).	138
<u>Tabla 19</u> : Método de análisis mecánico mediante tamices aplicado al Río Carcarañá – Sección Parque Sarmiento (Carcarañá).	138
<u>Tabla 20</u> : Método del hidrómetro aplicado al Río Carcarañá – Sección Pueblo Andino.	139
<u>Tabla 21</u> : Método de análisis mecánico mediante tamices aplicado al Río Carcarañá – Sección Pueblo Andino.	140
<u>Tabla 22</u> : Método del hidrómetro aplicado al Río Carcarañá – Sección Puerto Gaboto.	141
<u>Tabla 23</u> : Método de análisis mecánico mediante tamices aplicado al Río Carcarañá – Sección Puerto Gaboto.	141
<u>Tabla 24</u> : Coeficiente de rugosidad de Manning del Río Tercero (Ctalamochita)– Sección puente Alberdi (Villa María).	144
<u>Tabla 25</u> : Coeficiente de rugosidad de Manning del Río Carcarañá – Sección puente ruta 12 (Inrville).	145
<u>Tabla 26</u> : Coeficiente de rugosidad de Manning del Río Carcarañá – Sección Parque Sarmiento (Carcarañá).	145
<u>Tabla 27</u> : Valores de los coeficientes de la ecuación 20(Seo y Baek, 2004)	153

<u>Tabla 28</u> : Valores de coeficiente de dispersión obtenidos mediante diferentes ecuaciones empíricas.....	156
<u>Tabla 29</u> : Estimación del coeficiente de dispersión longitudinal en base a la ecuación integral de Fischer (1979).	158
<u>Tabla 30</u> : Estimación del coeficiente de dispersión longitudinal en base a la ecuación integral propuesta por Fischer (1979) con un ajuste de perfiles de velocidad α distinto de β y ajuste polinómico del perfil de profundidades.....	163
<u>Tabla 31</u> : Estimación del coeficiente de dispersión longitudinal en base a la ecuación integral propuesta por Fischer (1979) con un mejor ajuste de perfiles de velocidad y fondo.....	168
<u>Tabla 32</u> : Formulas de resistencia al flujo	175
<u>Tabla 33</u> : Valores de los coeficientes de la ecuación 24 calibrados para distintos rangos de tirantes medios (D) del flujo donde V y H_{med} se expresan en [m/s] y [m], respectivamente.....	176
<u>Tabla 34</u> : Variables hidrológicas e hidráulicas relevadas durante todas las campañas de medición en una sección del río Tercero (Ctalamochita) localizada inmediatamente aguas abajo del puente Sarmiento.....	180
<u>Tabla 35</u> : Cotas de la superficie libre en las secciones localizadas en los puentes Sarmiento y Sturla y la pendiente media en el tramo delimitado entre ambos puentes.	180
<u>Tabla 36</u> : Estimaciones realizadas con la formulación de Hermanek utilizando el promedio de los valores de pendiente de superficie libre y de pendiente de fondo. Los errores relativos se calculan como (valor estimado - valor observado) / valor observado.	182
<u>Tabla 37</u> : Estimaciones realizadas con la formulación de Hermanek utilizando el valor de pendiente media de fondo en el tramo. Los errores relativos se calculan como (valor estimado - valor observado) / valor observado.	183
<u>Tabla 38</u> : Estimaciones realizadas con la Fórmula de Manning utilizando un coeficiente de rugosidad único en toda la sección y valores de pendiente de superficie libre media en todo el tramo. Los errores relativos se calculan como (valor estimado - valor observado) / valor observado.	183
<u>Tabla 39</u> : Estimaciones realizadas con la Fórmula de Manning utilizando un coeficiente de rugosidad único en toda la sección y valores de pendiente de fondo media en todo el tramo. Los errores relativos se calculan como (valor estimado - valor observado) / valor observado.....	184
<u>Tabla 40</u> : Estimaciones realizadas con la Fórmula de Manning utilizando un coeficiente de rugosidad compuesto (teniendo en cuenta su variabilidad en el	

cauce y en la planicie de inundación) y valores de pendiente de fondo media en todo el tramo. Los errores relativos se calculan como (valor estimado - valor observado) / valor observado. 185

Tabla 41: Parámetros Hidráulicos aguas abajo del puente Sarmiento obtenida con el modelo unidimensional para la condición 1: Caudal = 256 m³/s..... 189

Tabla 42: Parámetros Hidráulicos aguas abajo del puente Sarmiento obtenida con el modelo unidimensional para la condición 2: Caudal = 245 m³/s..... 189

Tabla 43: Parámetros Hidráulicos aguas abajo del puente Sarmiento obtenida con el modelo unidimensional para la condición 3: Caudal = 112 m³/s..... 190

Tabla 44: Parámetros Hidráulicos aguas abajo del puente Sarmiento obtenida con el modelo unidimensional para la condición 4 = 29 m³/s 191

INTRODUCCIÓN

La cuantificación y caracterización del escurrimiento superficial en un sistema fluvial es requerida, entre otras cosas, para realizar un manejo sustentable del recurso hídrico (evaluando los efectos benéficos del agua) y para mitigar el riesgo hídrico (considerando los aspectos negativos del agua) a través del diseño de medidas estructurales y no estructurales requeridas para contener o salvar los cursos fluviales y para mitigar el riesgo hídrico en ese sistema fluvial.

En lo que se refiere al manejo sustentable del recurso hídrico, hasta no hace mucho tiempo, tal recurso era considerado renovable e ilimitado. En la actualidad, debido a la explotación irracional no sustentable del recurso, este concepto ha cambiado y ahora, es considerado un recurso natural finito no renovable; finito porque solo el 1% del agua disponible en el planeta es apta para uso humano y no renovable porque su degradación puede ser irreversible. Este nuevo concepto está de acuerdo con lo enunciado por “La Declaración de Dublín sobre el Agua y el Desarrollo Sostenible”, (CIAMA, 1992) la cual especifica que “El agua dulce es un recurso finito y vulnerable, esencial para sostener la vida, el desarrollo y el medio ambiente”. Frente a este nuevo paradigma se propone el “**manejo sustentable del recurso**”, que consiste en *“realizar un manejo adecuado del recurso hídrico, con el objeto de satisfacer las necesidades de las generaciones presentes, sin comprometer el derecho de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades”*. Para llevar a cabo un manejo sustentable del recurso, se requiere una cuantificación y caracterización precisa su disponibilidad, y de la calidad requerida para evitar la degradación irreversible del mismo. Esto se lleva a cabo, a través de un estricto monitoreo de la cantidad y calidad de los escurrimientos en todo el sistema fluvial, y en los efluentes que son arrojados al sistema

Por otra parte, en lo que se refiere al diseño de medidas estructurales (infraestructura hídrica) y no estructurales (medidas de gestión y disposiciones legales y reglamentarias) necesarias para contener o salvar cursos de agua y para mitigar el riesgo hídrico, se define como: el diseño consistente con los principios del desarrollo global sustentable, el cual prevé un desarrollo que satisface las necesidades presentes, sin comprometer la capacidad de futuras generaciones de satisfacer sus propias necesidades (World Commission on Environment and Development, 1987). En este marco el diseño de estas medidas, demanda un estudio integral que contemple los siguientes aspectos:

(a) Diseño hidrológico que consiste en la definición precisa de las variables hidrológicas de diseño (por ejemplo: caudal); (b) Diseño hidráulico óptimo que contemple la compleja interacción de los flujos turbulentos con el lecho, márgenes, vegetación, infraestructura hídrica existente o nueva, etc.). Un sobredimensionamiento de las medidas genera un impacto innecesario sobre el medio ambiente y es antieconómico. En tanto que si se subestiman, pueden fallar con resultados catastróficos con un impacto aun mayor para la sociedad y el medio ambiente, tanto por la pérdida de vidas humanas como de bienes públicos y privados. Entre las medidas no estructurales, habitualmente requeridas para mitigar el riesgo hídrico, como las disposiciones legales y reglamentarias, dentro las cuales se puede mencionar la definición de las líneas de ribera.

El objetivo del presente trabajo de investigación, es lograr una cuantificación y caracterización del escurrimiento a superficie libre en el sistema fluvial del Río Carcarañá, a efectos de generar información necesaria para el manejo sustentable del recurso hídrico en ese sistema fluvial y así permitir el diseño de medidas estructurales y no estructurales, a fin de mitigar el riesgo hídrico ante eventos extremos. Con ese propósito se proponen los objetivos específicos que se detallan a continuación: (a) Capacitación en el uso de técnicas experimentales para la cuantificación y caracterización hidrodinámica de flujos a superficie libre en sistemas fluviales; (b) Cuantificación del escurrimiento superficial en distintas secciones de los principales tributarios del sistema fluvial del río Carcarañá. Se incluye en este objetivo el desarrollo, sobre la base de las mediciones realizadas, de relaciones nivel de superficie libre – caudal escurrido (H-Q) para distintas secciones de los principales tributarios. Estas relaciones serán útiles para la sistematización en el monitoreo de caudales escurridos en épocas de crecidas y estiaje; (c) Caracterización de parámetros complementarios, relevados durante las campañas, entre los cuales se incluyen parámetros físicos del fluido (conductividad y temperatura), granulometría y coeficiente de rugosidad de Manning; (e) Evaluación experimental, para diferentes secciones del sistema fluvial de estudio, de los coeficientes que definen los patrones de mezcla de efluentes (por ejemplo el coeficiente de dispersión longitudinal). Esta evaluación experimental se realiza sobre la base de caracterizaciones hidrodinámicas del flujo, obtenidas con nuevas tecnologías de mediciones de velocidades de flujo. (f) Realizar una evaluación crítica de la actual metodología para la determinación de líneas de ribera en la provincia de

Córdoba y proponer una metodología adecuada para delimitar áreas inundables.

CAPÍTULO I

MARCO REFERENCIAL DEL TRABAJO



Capítulo I

MARCO REFERENCIAL DEL TRABAJO

1.1. Descripción general de la cuenca estudiada

Para este estudio se ha seleccionado la cuenca del río Carcarañá que ocupa un área aproximada de 50.000km² (Figura 1) y se extiende sobre el centro-sudeste de la provincia de Córdoba y el sur de la provincia de Santa Fe. El río Carcarañá nace en la provincia de Córdoba por la confluencia de los ríos Tercero o Ctlamochita (del cual es de directa continuación) y Saladillo (nombre del curso inferior del río Cuarto). Luego de recibir los aportes del arroyo Tortugas, ingresa en la provincia de Santa Fe, a la que cruza de oeste a este desembocando, en cercanías de la localidad de Puerto Gaboto, en el río Coronda, que a su vez lo hace en el río Paraná (Figura 1). La subcuenca del río Tercero (Ctalamochita) (Figura 2), uno de los principales tributarios del río Carcarañá, constituye un sistema de alimentación pluvial con régimen permanente. Los principales afluentes que aportan a la subcuenca del río Tercero (Ctalamochita) (Figura 1) enunciados de norte a sur, son el río Santa Rosa, arroyo Amboy, río Grande, río Quillinzo y río de La Cruz o de los Sauces. Los de mayor recorrido son el Grande, el Santa Rosa y el de la Cruz, de los cuáles el primero es el tributario más importante y está conformado por los arroyos Durazno, Manzano y las Letanías.



Figura 1: Cuenca del río Carcarañá

La cuenca alta del río Tercero (Ctalamochita) es explotada hidroeléctricamente a través de dos sistemas (Figura 3). Por un lado, el complejo río Grande, conformado por los embalses Cerro Pelado y arroyo Corto; y por el otro, el sistema llamado río Tercero, constituido por los

embalses: río Tercero, Ingeniero Cassaffousth, Ingeniero Benjamín Reolín y Piedras Moras. Este último actúa como regulador y condiciona el caudal escurrido en el río Tercero (Ctalamochita) y en el río Carcarañá. A partir de la localidad de Almafuerte (Córdoba), el río toma características de llanura hasta la confluencia con el río Saladillo.

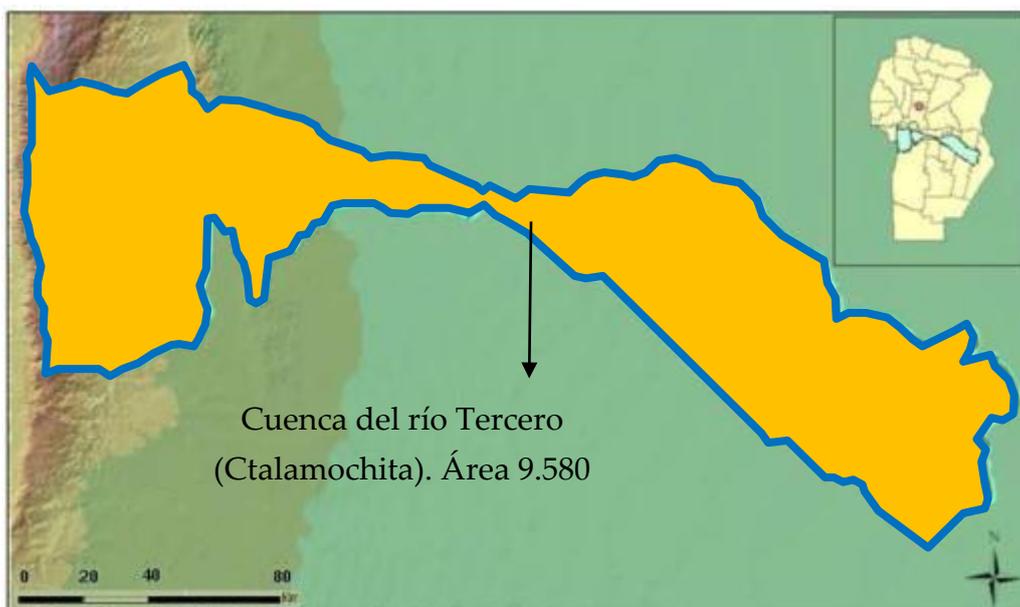


Figura 2: Cuenca del río Tercero –Ctalamochita- (Lenarduzzi 2013)



Figura 3: Complejos hidroeléctricos ubicados en la cuenca alta del río Tercero (Ctalamochita).

La subcuenca del río Saladillo (nombre del curso inferior del río Cuarto – Chocancharava-), otro de los tributarios principales de la cuenca del Carcarañá, tiene como principales afluentes a los ríos Barrancas, San Bartolomé, de la Tapia y Piedra Blanca (Figura 1). El río Cuarto, desde su nacimiento se dirige hacia el sudeste pasando por la localidad de Río Cuarto (Córdoba), ubicada sobre su margen derecha. Hasta la próxima localidad, La Carlota (Córdoba), el río

Cuarto (Chocancharava) sigue en dirección oeste-este. Quince kilómetros aguas abajo de dicha localidad dobla al noreste donde empieza a formarse la laguna Los Olmos que, tras el ensanchamiento del cauce y por la escasa pendiente, se transforma en bañados (aproximadamente a 60 Km de La Carlota) Luego de este recorrido toma el nombre de Saladillo, el cual mantiene hasta la desembocadura en el río Tercero (Ctalamochita). Los Bañados del río Saladillo están inmersos en la zona más productiva para la actividad agropecuaria de la provincia de Córdoba. Debido a un aumento de las precipitaciones en el año 2001, en los años sucesivos se realizaron en todo el sur provincial canalizaciones para mitigar el efecto de las inundaciones con lo que estos bañados sufrieron el efecto de ser atravesados por dos grandes canales, el canal del río Cuarto y el canal de La Brava. Dichas canalizaciones provocaron una disminución significativa del área original de los bañados, por lo cual el río Saladillo aporta en la actualidad importantes caudales al río Carcarañá (Brandolin et al. 2013).

La subcuenca del arroyo Tortugas es una importante cuenca de aporte a la cuenca baja del río Carcarañá. Este arroyo fue canalizado para transportar el agua proveniente de desagües pluviales urbanos y del escurrimiento superficial en campos de la región centro-este de la provincia de Córdoba y del oeste de la provincia de Santa Fe (Figura 4), por lo cual presenta en determinadas épocas del año caudales importantes.

Algunos arroyos que se encuentran entre los ríos Tercero (Ctalamochita) y Cuarto (Chocancharava) se pierden en dirección oeste-este y son de carácter arreicos. Entre esta serie de arroyos que se esparcen en cañadas y bañados, hay cuatro que son los más destacados y ellos son: el arroyo de las Peñas que se une al de las Tapias, el arroyo Tegua, el arroyo del Carnerillo y el arroyo Chucul.

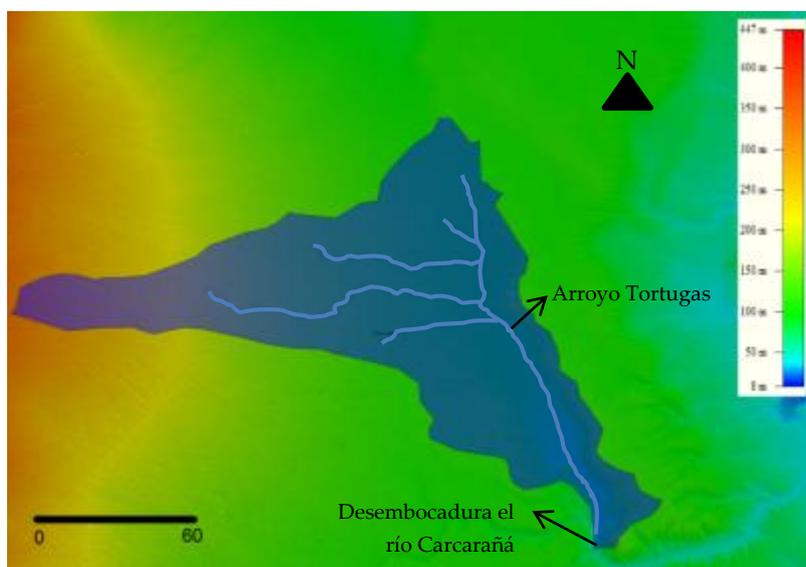


Figura 4: Cuenca del arroyo Tortugas

1.2. Problemática existente

1.2.1 Manejo sustentable del Recurso

En la cuenca del río Carcarañá se localizan importantes poblaciones, y de su escurrimiento superficial se abastece de agua potable a aproximadamente 350.000 personas, que además utilizan este recurso para generación de energía hidroeléctrica, recreación y vertido de efluentes. Este uso intensivo del recurso, sumado a la tendencia mundial de aumento en el consumo del agua debido a la aparición de nuevas necesidades (Figura 5), a la marcada variabilidad de las disponibilidades de volúmenes escurridos y profundidades de flujo en las épocas de aguas altas (crecidas) y aguas bajas (estiaje), requieren una muy seria planificación. Por otra parte, debido al gran tamaño de la cuenca, los eventos hidrometeorológicos que ocurren en la región afectan de distinta forma a las diferentes subcuencas de la misma, lo que influye de manera notable en el caudal que aporta cada tributario y por ende en el comportamiento general del sistema. Esta problemática compleja puede ser resuelta mediante un manejo sustentable del recurso con enfoque integral y una planificación detallada, para lo cual se requiere una gran cantidad de información que cuantifique y caracterice la evolución espacial y temporal del recurso en el sistema fluvial de estudio. En la actualidad, la disponibilidad de esta información es escasa en toda la cuenca del río Carcarañá y esta situación se repite habitualmente en todo el territorio de la República Argentina, presentando falencias importantes como ser la falta de sistematización en la toma del dato e imposibilidad de medición en épocas de crecidas y estiaje, haciendo sumamente dificultosa la tarea de calibración de modelos hidrológicos usados en el desarrollo de proyectos de manejo del recurso.

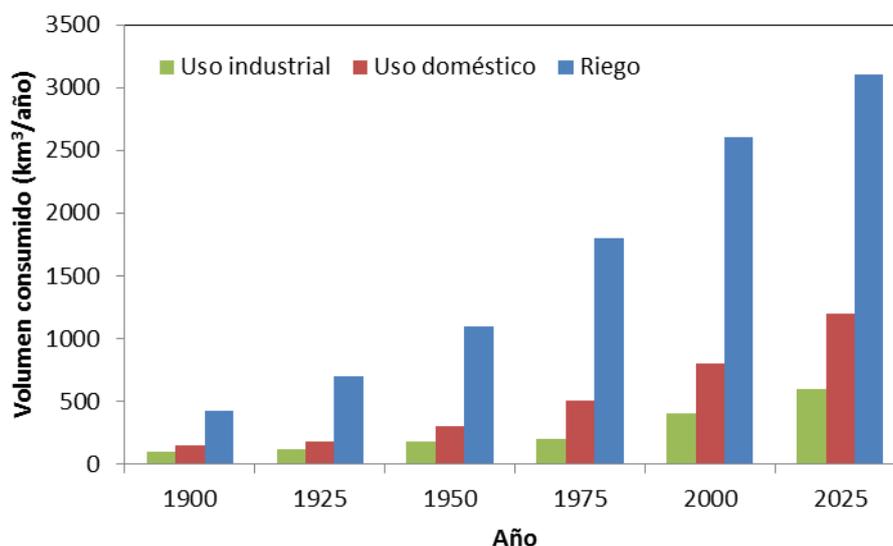


Figura 5: Usos estimados del agua a nivel mundial. Fuente: <http://iessonferrerdgh1e07.blogspot.com.ar/>

Otra problemática relacionada al manejo sustentable del recurso en la cuenca de estudio (y en particular al deterioro irreversible de ese recurso) 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), 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 (Figura 6). Luego el río Tercero (Ctalamochita) pasa por el balneario de la ciudad y en la región que drena aguas abajo se localizan una curtiembre, un matadero y en el límite urbano, la planta de tratamientos de líquidos cloacales. Los estudios precedentes de calidad de agua llevadas a cabo en el río Tercero (Ctalamochita), indican diferentes niveles de contaminación relacionados con los efluentes industriales y cloacales que se vierten (Oviedo Zabala et al, 2009). Se observa que cuando descende el caudal de agua en el río, no se produce una adecuada dilución de los efluentes cloacales e industriales vertidos. Para evaluar la dilución de los efluentes en el río para distintas condiciones de flujo (aguas altas, normales y bajas) es necesario determinar los coeficientes que definen los patrones de mezcla (por ejemplo el coeficiente de dispersión longitudinal). La determinación de estos coeficientes mediante determinaciones experimentales en campo con trazadores generalmente es costosa y compleja de obtener, por lo que se requieren investigar metodologías alternativas para su estimación sobre la base de caracterizaciones hidrodinámicas del flujo obtenidas con nuevas tecnologías de mediciones de velocidades de flujo.



Figura 6: Planta petroquímica ATANOR en la localidad de Río Tercero

1.2.2 *Diseño de medidas no estructurales para mitigar el riesgo hídrico*

El diseño de medidas no estructurales para mitigar el riesgo hídrico para mitigar el riesgo hídrico requiere del análisis de información hidrológica e hidráulica de eventos extremos para cada uno de los distintos tributarios de la cuenca del río Carcarañá. Esta información es escasa en general en toda la cuenca y debido a esta situación distintas medidas diseñadas en la cuenca presentan una fuente de incertidumbre importante. El evento extraordinario de crecida registrado en el río Tercero (Ctalamochita) en los meses de febrero, marzo y abril del año 2014 demostró falencias importantes en el diseño de medidas no estructurales en particular para la delimitación de las líneas de ribera, lo cual ocasionó que se inundaran extensas áreas urbanas y periurbanas de localidades ribereñas aun para caudales menores a los de diseño, produciendo graves daños a propiedades públicas y privadas (Figura 7). Frente a esta problemática surge la necesidad de evaluar la metodología vigente para el diseño de estas medidas no estructurales incorporando modificaciones que tengan en cuenta las características particulares del sistema fluvial analizado.



Figura 7: Inundación en la ciudad de Bell Ville en el mes de Marzo de 2014

1.3. Estudios antecedentes

El río Tercero (Ctalamochita), uno de los principales tributarios del río Carcarañá, además de ser una importante fuente para el suministro de agua potable en la zona sur y este de la provincia de Córdoba, es utilizado como cuerpo receptor para disposición final de las aguas residuales industriales y de estaciones depuradoras de efluentes cloacales (Cossavella et al., 2003) por lo que es importante llevar a cabo un seguimiento integral del recurso en esa subcuenca para garantizar su disponibilidad y calidad.

Moreyra (2008) realizó un estudio sistemático sobre las distintas características hidrogeológicas de la cuenca del río Tercero (Ctalamochita) para

correlacionar la calidad del agua en el río con las características físico-químicas de la cuenca antes mencionada. Además este autor incorporó un relevamiento detallado de la cuenca del Canal Desviador Bell Ville, debido a que es un punto de relativa importancia por los deficientes niveles detectados en la calidad del agua en ese canal. La autodepuración en el río Tercero (Ctalamochita) se hace lenta y, en tramos, el agua no es apta para la vida acuática, es impropia para uso recreativo y los procesos de potabilización se tornan costosos (Larrosa, 2008; Moreyra, 2008). Saldaño (2010) presentó una contribución al desarrollo de un modelo de calidad de agua para el río Tercero (Ctalamochita). Para ello se requirió el procesamiento de datos de campañas de muestreo de calidad de agua del río y de los efluentes, como así también de los aforos, que datan desde el año 2004 al 2010. Se plantearon escenarios de modelación variando caudales del río y/o concentraciones de efluentes, a fin de determinar el caudal mínimo aceptable, comparando los resultados obtenidos en la simulación con niveles guía de acuerdo al uso esperado del recurso.

Por otra parte, Bedogni (2011) realizó un estudio relacionado a la cuantificación de los caudales ecológicos en el río Tercero (Ctalamochita) a la altura de la ciudad de Villa María (Córdoba). En conceptos generales, su determinación nace de la necesidad de conservar la vida acuática en los sistemas hídricos, asegurando un caudal mínimo de agua que permita la supervivencia de las especies. Ese estudio abarcó desde recopilación y verificación de datos existentes, hasta la generación de nuevos datos mediante aforos de secciones para la simulación del río. El instrumental utilizado para dicho aforo fueron micromolinetes y el perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP) para la cuantificación de velocidades de flujo y caudales. Finalmente, Lenarduzzi (2013) realizó la caracterización hidrodinámica experimental en un tramo del río Tercero (Ctalamochita), incluido en el Balneario río Tercero de la ciudad homónima, con el fin de determinar parámetros hidráulicos que permitan monitorear el seguimiento de la calidad ambiental de ese tramo. Para la determinación de los parámetros hidráulicos se utilizó un Perfilador de Corriente Acústico Doppler específico para aguas someras (RiverSurveyor S5 YSI/Sontek ADCP). A partir del análisis de registros y procesamiento de los datos medidos se determinó la batimetría del tramo y se calcularon, para cada sección de medición los parámetros hidráulicos globales (caudal, velocidad media del flujo, profundidad media, etc.) como así también la evolución en las direcciones transversal y vertical del vector de velocidad del flujo. A partir de esta última información se realizaron para el tramo estudiado estimaciones del

coeficiente de mezcla transversal y longitudinal. Los resultados obtenidos permiten mejorar la comprensión de los procesos de mezcla del río y mejorar la exactitud en las predicciones de transporte de contaminantes.

A pesar de los esfuerzos de monitoreo mencionados previamente realizados sobre secciones o tramos específicos de los tributarios y en el mismo río Carcarañá, no existen antecedentes de monitoreos integrales del sistema que involucren determinaciones de caudales escurridos superficialmente, parámetros hidráulicos globales y coeficientes que caractericen los patrones de mezcla en todo el sistema para distintas condiciones de flujo (estiaje o periodos de aguas altas). En la actualidad se cuenta solamente con dos estaciones activas de la Red Hidrometeorológica Nacional dentro de la superficie de la cuenca del río Carcarañá:

a) Estación UME PAY (Lat.32° 13' 00,00"; Long.64° 43' 60,00"), ubicada sobre el río Grande (cuenca alta del río Tercero – Ctalamochita-), aguas arriba de las explotaciones hidroeléctricas del complejo río Grande. Los registros de esta estación proveen información relevante para el manejo de los embalses del sistema, pero el comportamiento hidrológico observado en ella no es representativo del comportamiento integrado de la cuenca en su conjunto incluyendo la cuenca baja.

b) Estación PUEBLO ANDINO (Lat.32° 40' 24,00"; Long.60° 51' 57,40"), que se encuentra sobre el río Carcarañá, cuenta con datos de altura, caudal medio diario, caudal medio diario máximo, caudal medio diario mínimo, caudal medio mensual, caudal máximo instantáneo y caudal mínimo instantáneo para el periodo 1980 – 2014.

La Secretaría de Recursos Hídricos del Gobierno de la Provincia de Córdoba, la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba (FCEfyN – UNC) y la Universidad Nacional de Rosario vienen realizando desde el año 2012 en forma periódica monitoreos de calidad de agua y aforos para cuantificar y caracterizar la cuenca, lo cual luego ayudará a elaborar un plan de acción para lograr llevar a cabo un manejo sustentable de la cuenca. En el marco de este monitoreo conjunto se desarrolló la presente tesis de Maestría.

1.4. Metodología

Durante el desarrollo de esta tesis, en primer lugar se realizó una recopilación de antecedentes e información del sistema de estudio y se determinó la problemática existente lo cual ha sido documentado en las secciones precedentes de este capítulo. Posteriormente el autor de esta tesis

realizó un entrenamiento en el uso de distintas técnicas experimentales específicas para el desarrollo de esta tesis cumplimentando de esta forma el primer objetivo específico propuesto. Las principales técnicas y metodologías experimentales utilizadas se detallan en el Capítulo 2. En particular el entrenamiento se focalizó en el uso de tecnología hidroacústica en sistemas fluviales con condiciones de escurrimiento en crecidas (aguas altas) y estiaje (aguas bajas).

A partir del conocimiento de las técnicas de medición, del sistema en estudio, y del marco teórico, se realizaron la cuantificación y caracterización hidrodinámica de flujos superficiales en diferentes secciones de la cuenca del río Carcarañá. La localización y descripción general de las secciones donde se realizaron las mediciones se detallan en el Capítulo 3. Los resultados de la cuantificación y caracterización hidrodinámica realizadas en las secciones seleccionadas de los tributarios del sistema fluvial estudiado para las distintas condiciones de flujo se presentan en el Capítulo 4. Entre los resultados detallados se incluyen las relaciones nivel de superficie libre – caudal escurrido para distintas secciones de los principales tributarios cumplimentando de esta forma el segundo objetivo específico. Además, se caracterizaron los parámetros complementarios relevados durante las campañas de medición, los cuales permiten una caracterización más detallada del sistema. Los mismos son: conductividad, temperatura, granulometría y coeficiente de rugosidad de Manning. Dicha evaluación se detalla en el capítulo 5 y cumple el tercer objetivo específico.

En base a la caracterización hidrodinámica detallada del flujo realizada con tecnología hidroacústica en distintas secciones del sistema fluvial para distintas condiciones de escurrimiento se procedió a estimar el coeficiente de dispersión longitudinal y se compararon los resultados obtenidos por la misma con mediciones realizadas en diferentes ríos del mundo y con ecuaciones empíricas propuestas por diversos autores. Este análisis, que cumple el cuarto objetivo propuesto en esta tesis, se detalla en el capítulo 6.

En el capítulo 7 se detalla la evaluación realizada de metodologías vigentes en la provincia de Córdoba para el diseño de líneas de ribera en el sistema fluvial de estudio. Esta evaluación se realizó sobre la base de información recopilada durante las crecientes observadas en el evento de crecida extraordinario registrado en el río Tercero (Ctalamochita) en los meses de febrero, marzo y abril del año 2014. A partir de las falencias observadas se proponen modificaciones a las reglamentaciones vigentes que tengan en cuenta

CAPÍTULO I – MARCO REFERENCIAL DEL TRABAJO

las características particulares del sistema fluvial analizado y las condiciones de flujo presentes en los últimos eventos hidrológicos extraordinarios observados en la provincia de Córdoba. Así se cumplimenta el quinto objetivo específico de esta tesis. Finalmente, en el Capítulo 8, se detallan las principales conclusiones a las que se arribaron a lo largo del estudio, y en capítulo 9 se plantean las recomendaciones pertinentes para trabajos futuros.

CAPÍTULO II

TÉCNICAS EXPERIMENTALES UTILIZADAS



Capítulo II

TÉCNICAS EXPERIMENTALES UTILIZADAS

2.1. Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP)

2.1.1 Introducción

El uso de Perfiladores de Corriente Acústico Doppler (por sus siglas en inglés, ADCP) desde plataformas móviles es una moderna técnica experimental utilizada por hidrógrafos e ingenieros para la medición de caudales y obtención del campo tridimensional de flujo en ríos, estuarios, canales, etc. con una gran resolución espacial y errores menores al 5%.

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 8 se muestra el esquema de funcionamiento del ADCP. Para minimizar el nivel de ruido presente en la 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 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).

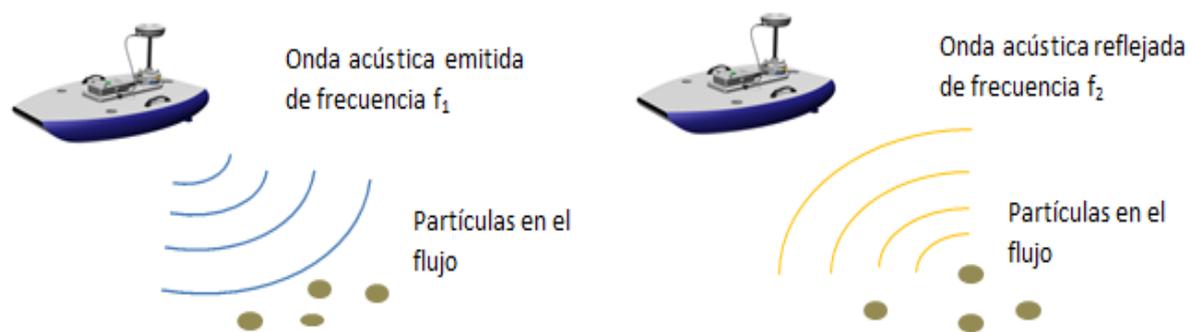


Figura 8: Esquema de funcionamiento del ADCP

En un comienzo los ADCPs fueron desarrollados para mediciones de caudales en ríos cuya profundidad mínima fuera de 1,5 metros, lo cual imposibilitaba el uso de esta técnica en ríos de baja profundidad. Gracias a los desarrollos efectuados en los últimos 10 años, en la actualidad existen ADCPs que permiten realizar aforos en ríos de baja profundidad, típicos de la región semiárida de la República Argentina.

2.1.2 Descripción del instrumento

Para el sistema fluvial analizado en esta tesis, se utilizó un Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP) “River Surveyor S5” (número de serie S501387) fabricado por la compañía YSI/Sontek para aguas poco profundas. En la *Tabla 1* se presenta un resumen de las especificaciones técnicas de este equipo.

Tabla 1: Características ADCP RiverSurveyor S5 utilizado en este trabajo (Manual Sontek 2010).

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

El instrumento se puede configurar y operar desde una computadora personal portátil o bien con un teléfono celular, ambos dispositivos capaces de registrar los datos medidos. La configuración de registro del ADCP RiverSurveyor S5 y la visualización de los resultados obtenidos se realiza con el programa computacional RiverSurveyor Live. Específicamente se utiliza actualmente el software RiverSurveyor Live v.3.60 y firmware RiverSurveyor v3.0.0, de acuerdo a las recomendaciones sugeridas por YSI/Sontek. Una de las principales características del firmware RiverSurveyor v1.0.0 es la incorporación del algoritmo “SmartPulse” el cual, en base a la profundidad, velocidad y niveles de turbulencia del flujo, adapta el esquema de pulso acústico para esas condiciones con el fin de proveer la máxima resolución de datos de velocidad, con tamaños de celda tan pequeños como 2 cm. La selección del esquema óptimo se realiza automáticamente.

El dispositivo de medición no posee movilidad propia, motivo por el cual es necesario colocar el ADCP en una plataforma móvil capaz de transportarlo a través de la sección sobre la que se realizará la medición. El bote utilizado en las campañas de aforo reportadas en este trabajo, se muestra en la Figura 9. En esa

figura se muestran además dispositivos complementarios instalados en la plataforma móvil durante los aforos como por ejemplo el módulo de procesamiento y comunicación (utilizando el sistema bluetooth) y un geoposicionador satelital (GPS) con su respectiva antena.

El instrumental en su parte inferior posee un conjunto de cuatro micro controladores, que generan cuatro haces de rayos acústicos que se encuentran inclinados 25° con respecto a la vertical. Gracias a estos micro controladores puede medirse la velocidad en tres direcciones (el sistema de cuatro rayos provee información redundante en una dirección, generalmente la vertical) trabajan con señales acústicas con una frecuencia de 3,0 MHz, enviando pulsos en todas direcciones. Además, el ADCP posee un dispositivo adicional que genera pulsos acústicos con una frecuencia menor (1,0 MHz) lo que le permite tener un mayor alcance en profundidad. Su función es medir las profundidades y obtener la batimetría y topografía del fondo de la sección. Ambos elementos se muestran en la Figura 10.

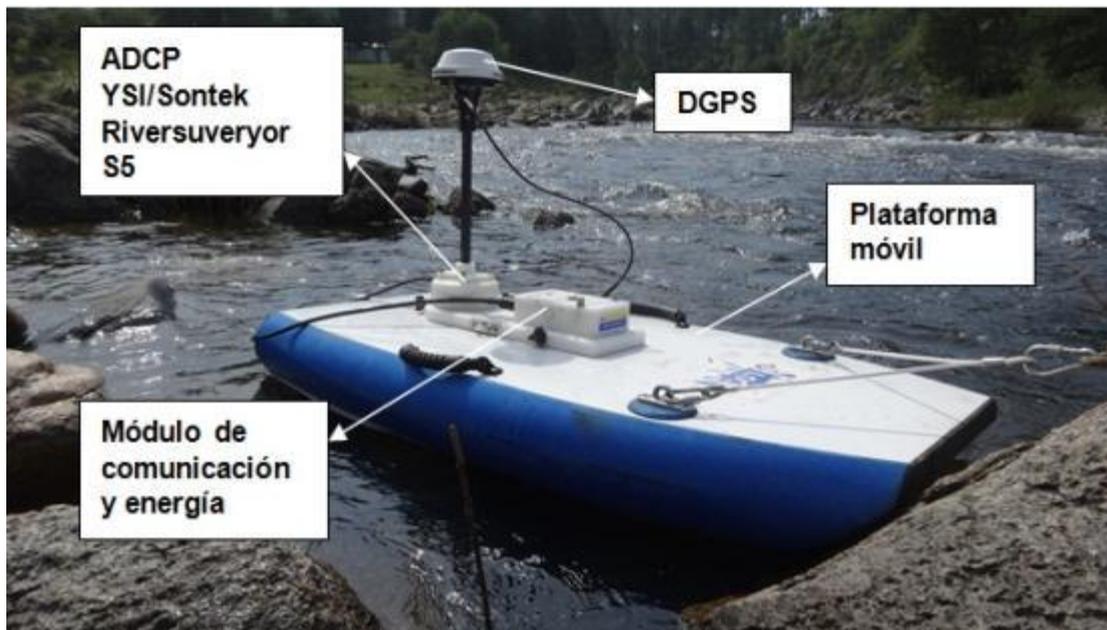


Figura 9: Plataforma Móvil con ADCP YSI/SonTek S5 y todos sus componentes.

Además del ADCP propiamente dicho (Figura 10), se requieren de otros accesorios para llevar a cabo las mediciones (Figura 11). Ellos son:

- Módulo de energía y comunicación (Figura 12), o “PCM” por sus siglas en inglés (Power and Communications Module), el cual posee dos funciones básicas: proporcionar una alimentación de energía al ADCP mediante una batería recargable, y permitir comunicaciones remotas del equipo con una

computadora o con un teléfono celular a través de un enlace con ondas de radio.

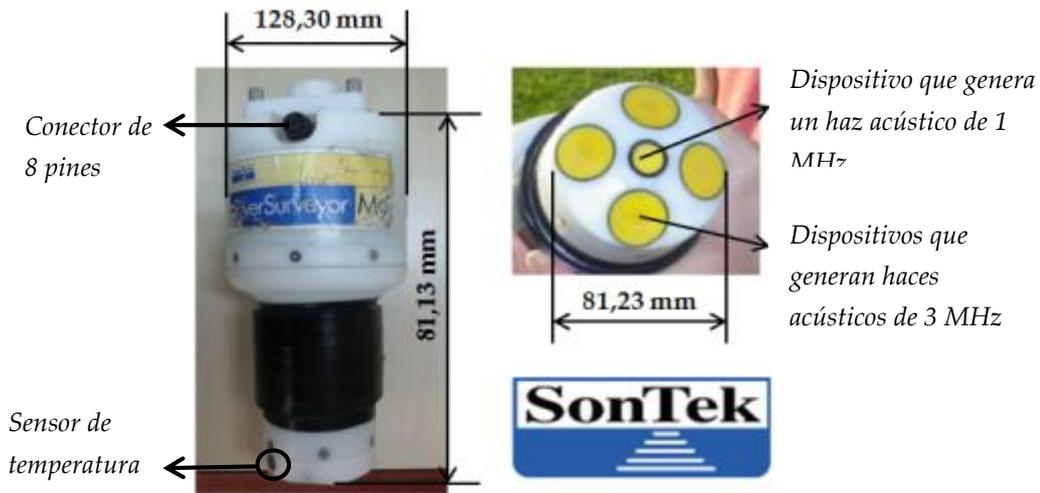


Figura 10: Características del Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP) YSI/SonTek S5

- Dispositivo Bluetooth de tecnología avanzada y largo alcance, de tal forma de que se permita la comunicación remota con el equipo receptor de la señal (en el caso del instrumento disponible en el Laboratorio de Hidráulica - FCEFyN, una computadora portátil). Al operar con una computadora, puede lograrse un alcance de hasta 100 metros con la señal, mientras que con los teléfonos celulares regulares pueden lograrse alcances de hasta 60 metros aproximadamente.
- Geoposicionador Satelital Diferencial (DGPS), el cual se coloca en la misma plataforma móvil sobre la cual se encuentra el ADCP, y permite contar con un sistema alternativo de referenciación, el cual es muy útil cuando existe fondo móvil o cualquier otra característica (por ejemplo efectos debido a la presencia de turbulencia e incorporación de aire) que no permita referenciar la medición con respecto al fondo (Bottom Track). El dispositivo DGPS se conecta también al PCM.
- Una computadora portátil o dispositivo móvil, capaz de soportar el programa computacional RiverSurveyor Live v.3.60 y el soporte RiverSurveyor v3.00 del instrumental, para ejecutar y correr el programa que recibe, ordena y muestra los datos registrados por el ADCP en tiempo real, permitiendo realizar un seguimiento de los resultados de manera simultánea con la medición misma.
- Fichas de adaptación que permitan la conexión de todos los dispositivos anteriormente mencionados. Deben permitir conexiones estancas y seguras, ya que muchos de estos dispositivos se colocan en el agua.

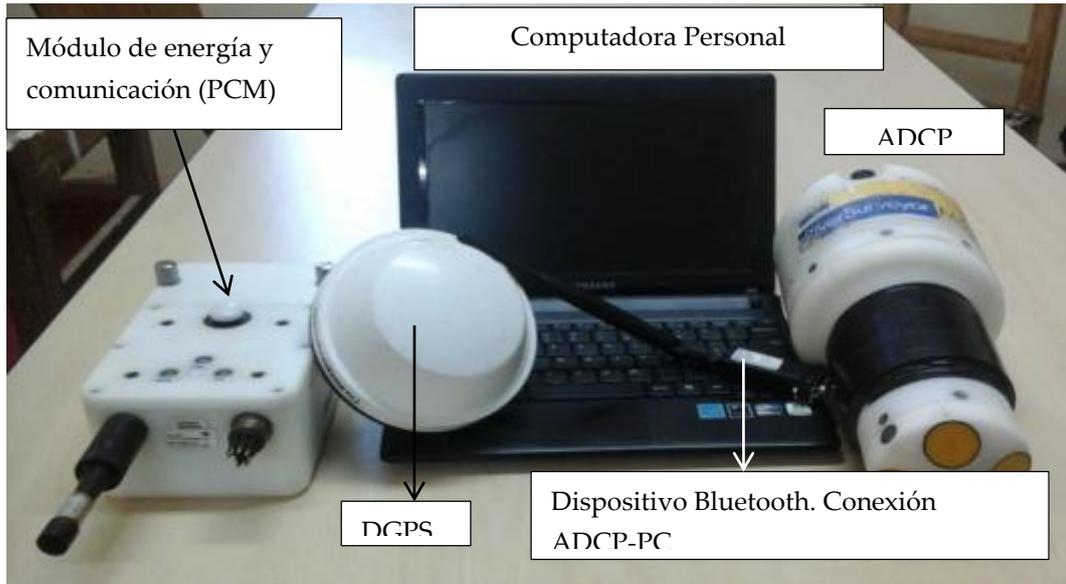


Figura 11: Elementos necesarios para realizar mediciones con ADCP

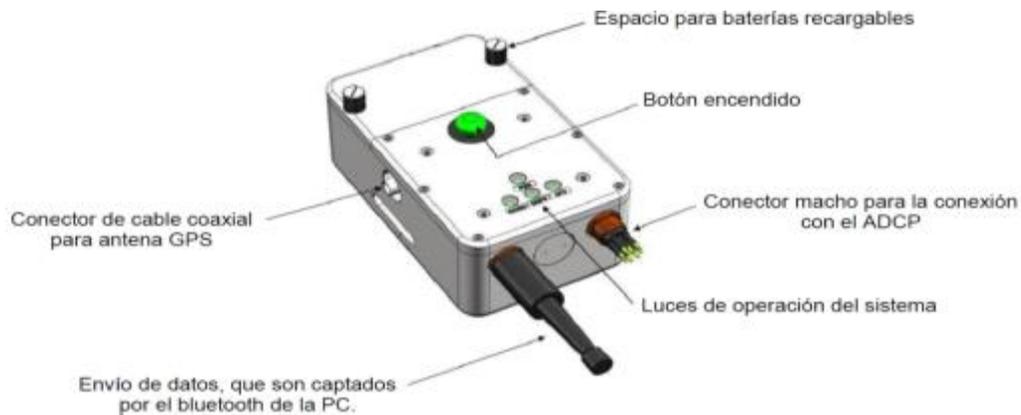


Figura 12: Módulo de energía y comunicación (extraído del folleto RiverSurveyor - Sontek).

2.1.3 Metodología de medición con ADPC desde plataformas móviles.

Al momento de realizar mediciones con ADCP se deben llevar a cabo ciertos procedimientos los cuales son fundamentales para la obtención de datos confiables. En este apartado se explican dichos procedimientos, los cuales están basados por un lado en fundamentos teóricos y por el otro lado en la experiencia obtenida durante las mediciones en campo. Es importante destacar que estas metodologías ayudan y orientan al operario a obtener datos fiables y de calidad, pero no reemplazan su criterio basado en el conocimiento de la técnica de medición y el sistema fluvial a aforar. Es por esto que es fundamental la capacitación de los operarios que realizan las mediciones. En el transcurso del desarrollo del trabajo descrito en este informe, el autor se ha capacitado significativamente en el uso de esta técnica tanto en condiciones de aguas normales como en crecida.

2.1.3.1 Definición del objeto de estudio.

En primer lugar se debe definir los objetivos de las mediciones con ADCP (cuantificación de caudales, patrones de flujo medio, turbulencia, etc.) ya que de ello dependerá la metodología de medición seleccionada. En este estudio los objetivos son cuantificar los caudales escurridos en cada sección y obtener una caracterización hidrodinámica (campo de flujo medio) detallada de las mismas.

2.1.3.2 Selección del sitio de medición

La selección de una adecuada sección de medición es un factor clave para la obtención de datos de buena calidad. Muchas veces los problemas de medición con ADCP pueden solucionarse cambiando únicamente el lugar de aforo (Muller y Wagner, 2009). A pesar de que seleccionar un sitio medición parece un proceso sencillo, cabe destacar que en realidad es un proceso arduo que insume una gran cantidad de tiempo. Es por ello que a continuación se detallan una serie de pautas con respecto a la forma, ubicación, velocidades, etc, que debe tener la sección para evitar pérdidas de tiempo y obtener una medición adecuada.

- Ubicación: La sección transversal debe estar ubicada en tramos rectos con flujo uniforme sin vórtices y turbulencia excesiva. Se recomienda evitar secciones donde ocurran fluctuaciones de flujo de baja frecuencia, por ejemplo en la margen interna de una curva, aguas abajo de una confluencia, etc.
- Forma: Al seleccionar una sección de medición, la forma de la misma:
 - Debe tratar de asemejarse a secciones rectangulares, trapezoidales o parabólicas.
 - No debe tener cambios bruscos de profundidad (Simpson, 2002)
 - El fondo del cauce debe poseer baja rugosidad (valores altos de rugosidad generan mucho oleaje y turbulencia en la sección) y poca vegetación (la cual no permite la penetración de la onda acústica)
 - La profundidad máxima de la sección debe ser menor que el límite máximo de profundidad a la cual el equipo registra datos (en este estudio la profundidad máxima debía ser menor a 15 m).
 - La profundidad en las márgenes debe ser tal que permita el registro de dos o más celdas, para de este modo poder estimar correctamente los caudales no medidos en ambas márgenes.
- Velocidad del flujo: La velocidad del flujo siempre debe ser mayor a la velocidad del bote para tener una medición adecuada. Se debe evitar realizar mediciones en cauces cuyas velocidades sean menores a 0,1 m/s (Oberger et al. 2005), ya que requieren un gran control de la velocidad de

movimiento de la plataforma móvil para poder aforarlas adecuadamente. Por el otro lado se deben evitar secciones con velocidades mayores a la capacidad de registro del equipo y elevada turbulencia, la cual genera flujos no uniformes, no cumpliéndose el principio de homogeneidad de los ADCP.

- *Otros factores:* Se deben evitar secciones que posean elementos tales como estructuras de acero, puentes con entramado de este material, etc, los cuales generan fuertes interferencias magnéticas al instrumento. Si se utiliza DGPS como sistema de referencia, evitar zonas con interferencia tales como densa presencia de vegetación, márgenes elevadas o puentes y construcciones.

En la Figura 13 (a) se ha esquematizado y ejemplificado una mala sección de medición. El ejemplo corresponde a una sección del río Tercero (Ctalamochita) ubicada en el puente que une la localidad homónima con la ciudad de Despeñaderos. En la Figura 13 (b) se presenta una sección de medición óptima para realizar el aforo junto a un ejemplo de este tipo sección en el río Saladillo en las cercanías del puente de la ruta provincial 6.

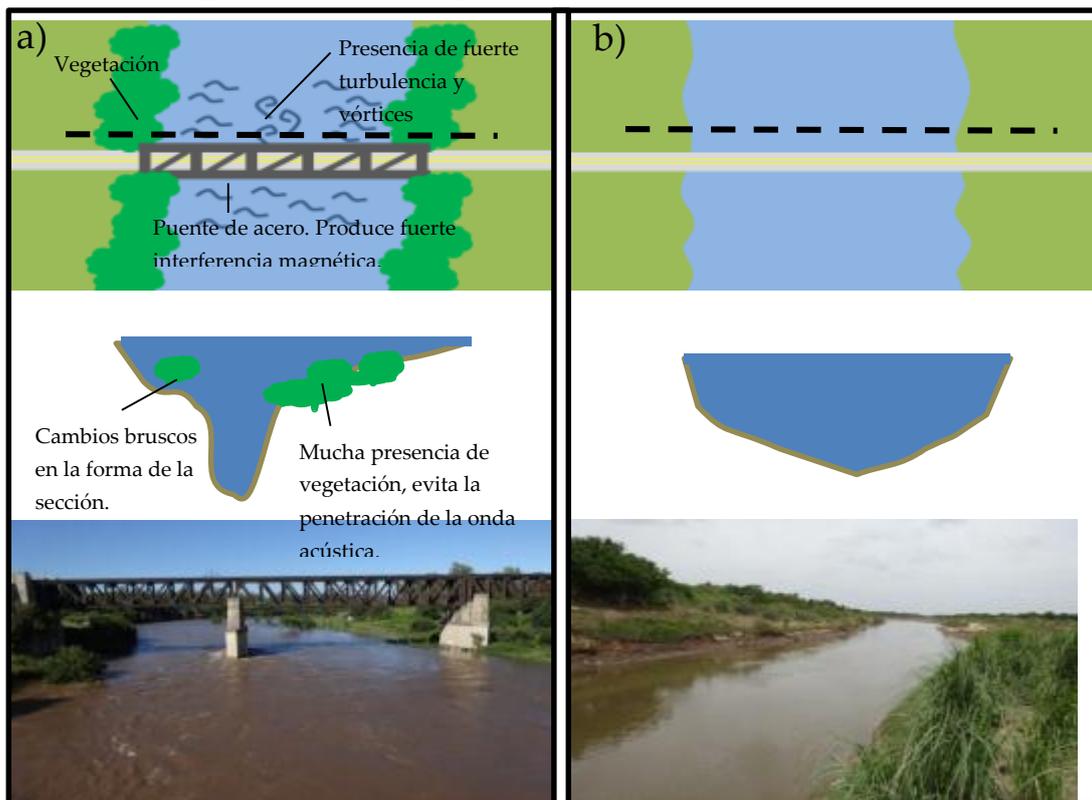


Figura 13:(a) Esquema y ejemplo de una mala sección de medición. El ejemplo corresponde a una sección sobre el río Tercero (Ctalamochita) en el puente que une la localidad homónima con Despeñaderos. (b) Esquema y ejemplo de una sección de medición óptima. El ejemplo corresponde a una sección del río Saladillo ubicada en las cercanías del puente de la ruta provincial 6.

Puede ocurrir muchas veces que la medición deba realizarse en sitios que no cumplen estos requisitos. En estos casos la calidad de los datos obtenidos puede no ser la óptima. Sin embargo el personal que realiza la medición debe utilizar su criterio para decidir si la medición es satisfactoria o no. Es muy importante en estos casos reportar el grado de incertidumbre de los resultados a través de parámetros como el coeficiente de variación (COV)

2.1.3.3 Procedimientos previos a la medición

Previamente a realizar el aforo se deben realizar algunas pruebas y configurar algunos parámetros. En esta sección se presentan una serie de recomendaciones y procedimientos a tener en cuenta al momento de realizar estos trabajos previos a la medición.

Antes de salir de campaña se recomienda realizar:

- ***Prueba de funcionamiento y presencia de todos los adaptadores y cables necesarios para poner en funcionamiento el instrumento:*** Se debe verificar que todos los cables y adaptadores necesarios se encuentren presentes y estén en correcto estado. La conexión entre el instrumento y la computadora portátil se hace a través de una antena Bluetooth la cual se conecta a la PC mediante un adaptador USB a RS232. El problema que aparece aquí es que solo unos pocos de estos adaptadores que se encuentran en el mercado funcionan de manera correcta al conectar los ADCPs. Por tal motivo es recomendable, previo a las mediciones, corroborar el buen funcionamiento del mismo.
- ***Revisar el correcto funcionamiento de la computadora a utilizar para el registro de datos:*** Se debe revisar que el programa de registro de datos (RiverSurveyor Live en el caso de ADCP's YSI/Sontek o WinRiver en el caso de ADCP's RDI) funcione correctamente y no presente fallas. Además se debe revisar que la PC tenga batería con carga completa y suficiente espacio de almacenamiento para guardar los datos. Se recomienda encender la PC antes de salir de campaña para corroborar su correcto funcionamiento.
- ***Elegir sitios de medición:*** Para seleccionar un buen sitio de medición se requiere una inspección in-situ, pero se puede hacer una primera selección de sitios utilizando herramientas como Google Earth que permiten ver los rasgos más sobresalientes de las diferentes secciones (vegetación, presencia de obras con alta influencia magnética, etc.)
- ***Obtener la declinación magnética de cada sitio de medición:*** Este parámetro es fundamental si usamos como sistema de referencia del instrumento el GPS. La declinación magnética varía con el sitio medición y

la fecha. Para obtenerla ingresamos a www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/#declination e ingresando la fecha y coordenadas del sitio se obtiene la declinación magnética.

- **Verificación de disponibilidad y funcionamiento de herramientas complementarias:** Se debe verificar que estén disponibles en correcto estado cintas métricas, destornilladores, pinzas, etc. necesarios durante la medición.

Antes de comenzar la medición

- **Configurar el reloj interno:** este procedimiento es de suma utilidad a la hora de analizar los resultados. Una correcta configuración del reloj interno que poseen los ADCP permitirá poder relacionar las mediciones con las anotaciones de campo a fin de identificar causas de errores en las mediciones como así también poder relacionar las mismas a, por ejemplo, variaciones hidrométricas en escalas ubicadas en las cercanías de las zona relevada.
- **Velocidad del sonido:** Las variaciones de la velocidad del sonido en la profundidad no afectan las velocidades horizontales del flujo (Teledyne RD Instruments, 1996), pero sí a las velocidades verticales y a la profundidad. Por el momento, los ADCP comerciales no tienen la capacidad de corregir las mediciones por cambio en la velocidad del sonido en la vertical. Dado que la temperatura y la salinidad (parámetros de entrada definidos por el usuario o medidos por los instrumentos) son los principales factores que controlan la velocidad del sonido en la columna de agua, deben ser evaluados previamente antes de comenzar las mediciones.
- **Temperatura del agua:** Los ADCPs poseen sensores para la medición de la temperatura del agua en la cercanía de los transductores. Esta variable es la más importante en la ecuación para calcular la velocidad del sonido (Urlick, 1993). Errores de 5 grados Celsius (°C) en la medición de la temperatura puede causar errores sistemático del 2 % en la medición del caudal (Oberg et al. 2005). Es por esto que las temperaturas medidas por los ADCPs debe ser comparada con mediciones independientes realizadas por el operario previo al comienzo de las mediciones (Figura 14). Si las temperaturas difieren considerablemente (± 2 °C) o si falla el sensor del ADCP, el software da la posibilidad de incluir la temperatura manualmente hasta que el sensor del ADCP sea reparado.

- **Salinidad:** La salinidad es otra variable importante en el cálculo de la velocidad del sonido cuando este se propaga en la columna de agua. Esta variable debe ser determinada previamente al comienzo de las mediciones utilizando instrumental adicional (Figura 14). Ésta generalmente varía de cero partes por mil (ppm) a 35 ppm para agua de océanos.



Figura 14: Sonda multiparamétrica para el relevamiento de diferentes parámetros entre los cuales se encuentra la salinidad y temperatura.

- **Calibración de la brújula:** la calibración de la brújula interna de los ADCPs es recomendable para toda medición, pero es obligatorio cuando: (a) se utiliza GPS como sistema de referencia, (b) cuando se utiliza el método de lazo para corregir los errores de caudales producto de la presencia de fondo móvil (Muller y Wagner, 2006) o, (c) cuando la dirección de la velocidad del flujo es importante. Si bien existen procedimientos especiales para cada instrumento, a continuación se presentan algunos pasos comunes a todos:
 - Realizar la calibración de la brújula lo más cercano posible al sitio donde se va a realizar la medición. De este modo se asegura que las condiciones con las que fue calibrado el instrumento sean las mismas que las presentes en la sección de medición.
 - Al calibrar la brújula se deben realizar dos giros completos del instrumental en un minuto, es decir que la velocidad de rotación debe ser de 5 grados por segundo (Figura 15). Dependiendo del modelo puede o no requerir cabeceo. En el caso del ADCP YSI/Sontek S5 que posee el grupo de trabajo CETA-UNC, se requiere hacer dos vueltas con cabeceo. Si el sitio de medición tiene muchas olas la calibración se debe realizar haciendo cabeceos altos, en caso contrario el cabeceo debe ser bajo.

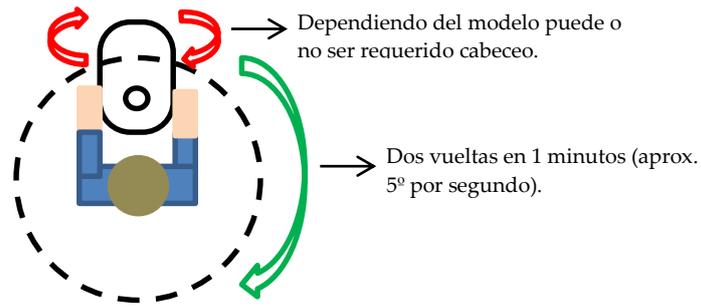


Figura 15: Esquema de movimientos a realizar para la calibración de la brújula del ADCP

- **Configuración del instrumento:** Los parámetros a configurar al momento de realizar la medición son: Distancia de monitoreo, modo de medición, sistema de referencia, profundidad del transductor, métodos de extrapolación de velocidades de fondo, superficie y márgenes y la declinación magnética (Figura 16). La forma en que se deben cargar los parámetros en el programa computacional depende de cada fabricante y modelo de ADCP. Es importante que la configuración de los parámetros lo haga una persona entrenada y capacitada en el uso de ADCP, de esta forma se logra reflejar las condiciones hidrológicas del sitio y optimizar la calidad de los resultados (Lipscomb, 1995).
- **Test de fondo móvil:** La determinación de la presencia de fondo móvil es de crucial importancia cuando no se dispone de sistema GPS o cuando las condiciones del sitio impiden su utilización.

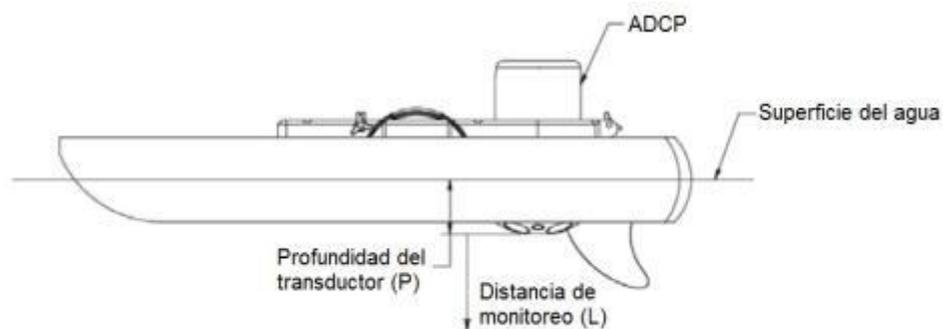


Figura 16: Esquema de un ADCP con las distancias que deben ser cargadas en el programa de registro de datos al momento de realizar la medición.

2.1.3.4 Procedimientos requeridos durante la medición de caudal

La metodología para llevar a cabo mediciones de caudal varía según las condiciones de flujo presentes en el río. De tal modo que los procedimientos para aforar flujos estacionarios son diferentes que para aquellos no estacionarios. Tanto es así que en este apartado se presentan una serie de recomendaciones para medir

caudales en ambos tipos de flujo, como así también los problemas típicos observados en la medición de campo.

2.1.3.4.1 Operación de la plataforma móvil

Según las condiciones del flujo y las características de la sección transversal, se puede optar por realizar la medición desde las márgenes, desde puente, mediante un bote o cable carril (Figura 17). En todos los casos se debe tratar de llegar lo más cercano posible a las márgenes (debe haber como mínimo 3 celdas de velocidad para extrapolar correctamente el caudal no medido cercano a las márgenes) y tratar siempre de efectuar las transectas por el mismo recorrido. Como se ha mencionado en apartados anteriores, la velocidad de la plataforma móvil debe ser menor que la velocidad del flujo. En todos los casos anteriores salvo el caso en que la medición se realice desde bote, es sencillo controlar la velocidad de la embarcación.



Figura 17: Diferentes formas de operación de la plataforma móvil (A) desde puente (B) Desde las márgenes (C) Desde cable-carril (D) Desde bote. El modo de operación dependerá de las características del flujo y la sección.

2.1.3.4.2 Condiciones de flujo

Si el flujo es estacionario y las mediciones se realizan a través de una plataforma móvil, el USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos) recomienda realizar un número par de transectas (al menos dos) con un tiempo de exposición

de 720 segundos (12 minutos). El tiempo de exposición del instrumento se define como el tiempo en que el instrumento se encuentre registrando datos y no contempla el tiempo entre recorridos, tiempo de calibración o tiempo de testeo. Se debe hacer un número par de mediciones para eliminar errores por efectos direccionales. El tiempo de exposición indicado implica que en algunos casos es necesario hacer 4 o más transectas (recordar que los recorridos deben ser pares para eliminar efectos direccionales). En los ríos de la Provincia de Córdoba, dadas sus características, en general se realizan durante los 720 segundos entre cuatro y seis transectas.

En el caso de flujo no estacionario, el cual es producto de una onda de crecida o debido a que la sección se ubica aguas abajo de una obra de control, o en una zona de mareas, las variaciones de caudal entre recorridos serán muy significativas. Es por ello que en estos casos los criterios mencionados anteriormente no son aplicables. En el caso de tener que aforar un flujo de estas características se debe realizar una transecta, y en el caso que las condiciones de flujo lo permitan, realizar un transecta nuevamente en dirección opuesta para evitar errores direccionales.

2.1.3.4.3 Problemas en la calidad de los datos

Al realizar mediciones con ADCP, el operador del instrumental debe ir verificando en la computadora que los datos registrados sean correctos. Si durante la medición aparece un error crítico, se debe comenzar nuevamente la transecta y descartar la errónea (es recomendable anotar en la libreta de campaña el nombre de la transecta a descartar y el motivo). Entre la lista de problemas más comunes se mencionan:

- *Pérdida de datos por elevados niveles de turbulencia presente en el flujo.* Frente a este tipo de problemas el operador observará en la pantalla una pérdida notable de celdas de medición. (Figura 18)

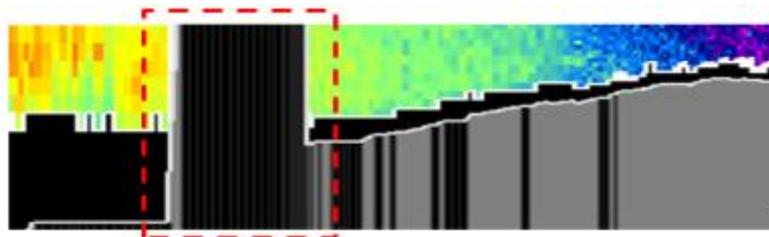


Figura 18: Pérdida de celdas producida por los altos niveles de turbulencia presente en el flujo.

- *Pérdida de datos por errores de comunicación entre el ADCP y la computadora.* En este caso el programa computacional alertará al operador

que ha habido pérdida de datos por falta de comunicación, por lo que indica descargar los resultados directamente de la memoria del ADCP una vez finalizada la medición.

- ***Pérdida de del sistema de referencia de fondo (Bottom Track)*** debido a que la profundidad del flujo es mayor que la profundidad máxima de registro de instrumento (Figura 19).

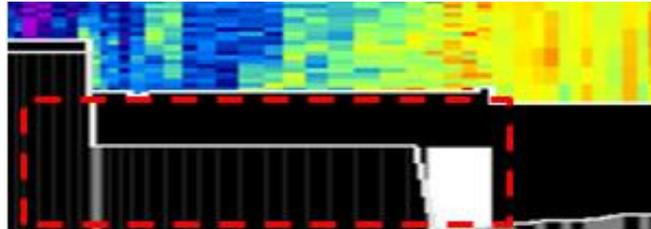


Figura 19: *Perdida de detección del lecho del río (Bottom-Track) debido a que la profundidad del flujo es mayor que la máxima profundidad de registro del instrumento.*

- ***Señal de GPS baja.*** En el caso de que se esté utilizando GPS como sistema de referencia del instrumento, una señal débil o mala de GPS afectará notablemente los valores de caudal y velocidades obtenidos. El programa RiverSurveyor Live para ADCPs YSI/Sontek, muestra la calidad de señal de GPS mediante un valor numérico en donde “1” es calidad excelente.
- ***Errores producidos por elevada velocidad de la plataforma móvil:*** Si la plataforma móvil se mueve a una velocidad mayor que la del flujo, esto producirá errores en la medición de las velocidades del flujo y por lo tanto en la medición de caudal. La solución a este problema es mover la plataforma móvil a una menor velocidad que la del flujo. Esto se logra generalmente moviendo el ADCP desde las márgenes con una cuerda.
- ***Incorrecta configuración de los parámetros requeridos por el instrumento.*** Un error muy común de este tipo suele ser confundir el separador decimal “,” por “.” o viceversa. El separador decimal que utiliza el equipo dependerá de la configuración regional que posea el mismo.

2.1.3.4.4 *Estimación de la distancia en las márgenes*

La extrapolación de caudales en las cercanías de las márgenes, se debe a la imposibilidad del instrumento de obtener celdas de velocidad válidas debido a la baja profundidad del flujo o a la imposibilidad de acceder cerca de las márgenes debido a la presencia de ramas, rocas, etc. Para que el programa computacional realice una extrapolación correcta del escurrimiento en las cercanías de las márgenes se debe realizar una medición precisa de la distancia del instrumento a la margen. Para ello se pueden utilizar distanciómetros láser o acústicos, cintas métricas, etc. A su vez, la marcación a través de boyas al comienzo y fin de la

sección, resulta adecuado para tener mediciones consistentes de las distancias a los márgenes y permite medir sobre la misma sección para los diferentes recorridos. Si no se dispone de boyas se pueden elegir elementos de referencia en la sección como algún escombros, roca, tronco, etc (Figura 20). En los casos donde las márgenes son paredes verticales de gran pendiente, el ADCP no debe acercarse demasiado a estas (por más que haya celdas y profundidad) para evitar los efectos de interferencia acústica “Side Lobe”, ya que los haces acústicos están inclinados 25° con la vertical. Además de la distancia a la margen, el programa computacional requiere la velocidad media en el primer y último perfil de medición para poder realizar la extrapolación, es por ello que para obtener un valor preciso de la misma, se aconseja permanecer entre 5 a 10 segundos al comienzo y finalización de cada transecta. Si la velocidad en las cercanías de las márgenes es alta, se obtendrá una gran incertidumbre en la extrapolación. Actualmente se están realizando investigaciones para poder cuantificar y determinar estas incertidumbres.



Figura 20: En las secciones de medición muchas veces se pueden encontrar elementos (escombros, postes, rocas, etc.) que se pueden utilizar como referencia para referenciar el instrumento y obtener una medición precisa de las márgenes.

2.1.3.4.5 Anotaciones de campo durante la medición

Es recomendable al momento de realizar tareas de gabinete, tener todo tipo de anotaciones realizadas antes, durante y después de la campaña. Entre los datos más importantes a registrar se tienen:

- Toda anomalía observada durante la medición.
- Patrones en el flujo inusuales como por ej. recirculaciones.
- Operarios que realizaron la medición.
- Transectas erróneas a descartar.
- Condiciones climáticas.
- Mediciones de temperatura, conductividad, salinidad, etc.
- Elementos de referencia en la sección (escalas, niveles respecto algún punto fijo, etc.).

2.1.4 Programas computacionales

2.1.4.1 Programa computacional utilizado para definir la configuración del registro, visualización y procesamiento básico de datos registrados con ADCP: RiverSurveyor Live.

2.1.4.1.1 Introducción

Mediante el programa computacional RiverSurveyor Live (Figura 21), se realiza la configuración del registro, la recepción y visualización (en tiempo real y diferido) de los datos para el modelo de ADCP que se dispone en el Laboratorio de Hidráulica de la FCEFyN-UNC (YSI/SonTek S5) mediante una interfaz gráfica amigable y sencilla. A través de este programa, se pueden procesar y analizar los datos mediante las diferentes herramientas de análisis incluidas. Además es posible visualizar los resultados obtenidos durante la medición en forma de tablas, gráficos e imágenes, facilitando el análisis de los mismos. El programa, además cuenta con la posibilidad de exportar los datos a otros programas (por ej. Matlab o Excel) para un análisis más complejo y detallado. Actualmente RiverSurveyor Live es compatible con el algoritmo SmartPulse HD, incluido en los ADCP's de SonTek, el cual permite obtener el campo de velocidades con una definición de celda de 2 cm.

Al día de la fecha el programa se encuentra en su versión 3.60 (únicamente disponible para el sistema operativo Microsoft Windows), la que fue lanzada el 2 de febrero de 2013. Las mejoras que incluye esta versión respecto a las anteriores son:

- Incremento a 3 cifras significativas para el área de la sección, la velocidad media y el caudal.
- Incorporación de la velocidad y profundidad máxima medida al reporte resumen de la medición.
- Soporte al firmware GPS Hemisphere. El cual incluye 5 indicadores de calidad de GPS-CGA en vez de 4.

En la actualidad dado el gran desarrollo de los teléfonos celulares, existe una versión del programa para estos dispositivos, la que está únicamente disponible para Windows Phone.

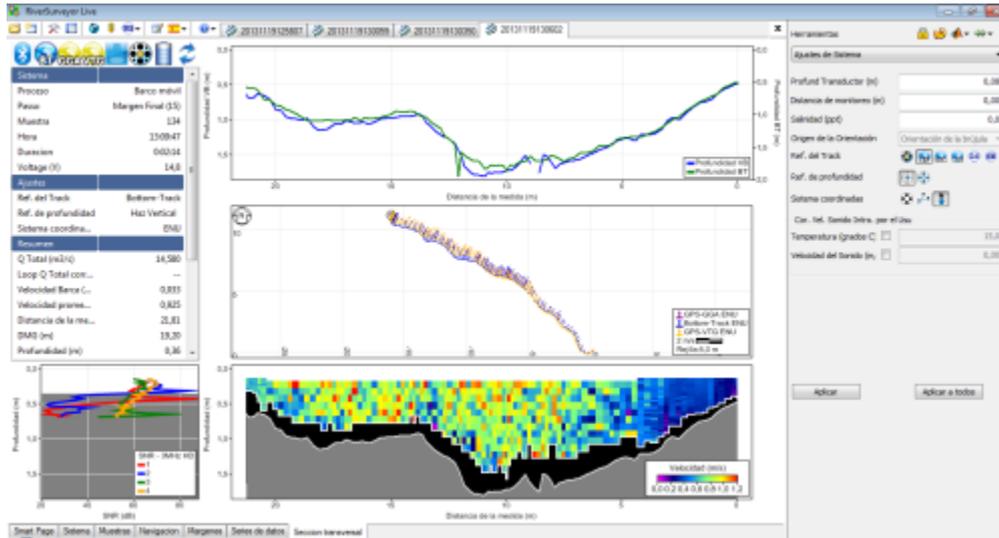


Figura 21: Interfaz del Programa RiverSurveyor Live 3.60

2.1.4.1.2 Programa computacional para el post-procesamiento de los datos registrados con ADCP: VMT (Velocity Mapping Tool)

Al realizar una transecta con ADCP, se registra el campo de velocidades y batimetría en una determinada sección para un tiempo dado. Esta medición presenta fluctuaciones debido a los patrones medios de flujo presentes, a los procesos turbulentos y al ruido Doppler. Para disminuir el error producido por los motivos mencionados anteriormente, se deben realizar varias transectas y promediar las mismas. Como se mencionó anteriormente deben realizarse como mínimo dos transectas con un tiempo de medición superior a 720 segundos para que la medición presente resultados aceptables. El promediado de varias transectas no es sencillo ya que las trayectorias y localización donde se realiza el registro de los perfiles de velocidad no coinciden para las distintas transectas.

Para calcular los campos medios de velocidad se procede al análisis de los mismos con VMT, según su nombre en inglés, Velocity Mapping Tool (Figura 22). VMT es un programa computacional desarrollado en Matlab para el procesamiento y visualización de los datos recopilados a lo largo de múltiples transectas en ríos u otros cuerpos de agua. VMT permite un rápido procesamiento, visualización y análisis de una serie de conjuntos de datos medidos con ADCP, e incluye utilidades para exportar datos de ADCP a archivos compatibles con ArcGIS, Tecplot y Google Earth. El programa computacional puede ser utilizado para explorar patrones de movimiento del fluido tridimensional a través de varios métodos para el cálculo de los flujos secundarios. El programa también incluye capacidades para el análisis del retorno acústico y los datos batimétricos del ADCP. La interfaz gráfica de usuario (GUI) mejora la funcionalidad del programa y proporciona fácil acceso a los datos. Además, las funciones de graficado en tres

dimensiones permiten una visualización rápida del campo de la velocidad del flujo y los datos de batimetría.

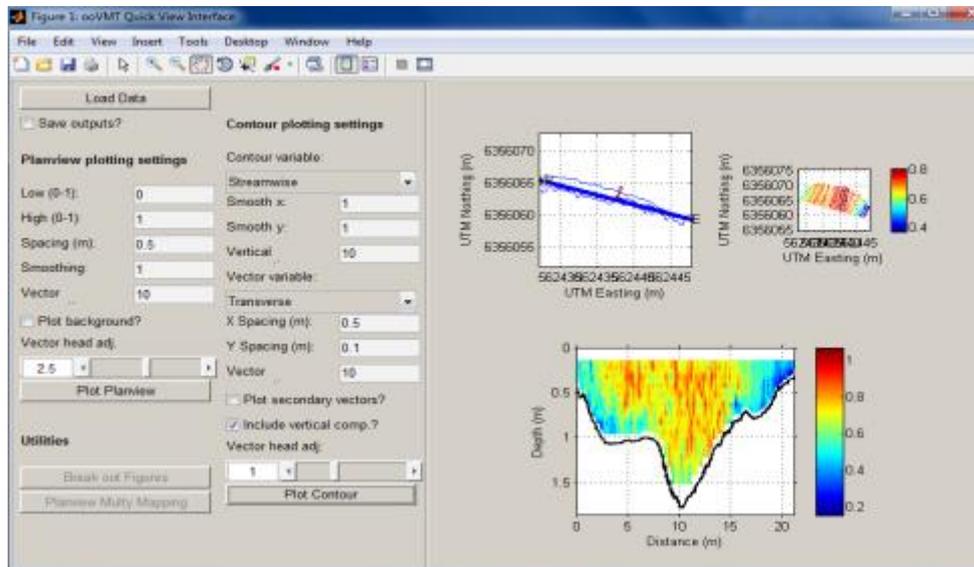


Figura 22: Interfaz gráfica de VMT

2.2. Sonda Multiparamétrica

Para la determinación de la temperatura y conductividad en los distintos cursos de agua durante las diferentes campañas de medición se utilizó una sonda multiparamétrica marca Horiba modelo U-10 (Figura 23) con 25 m de cable, perteneciente al Laboratorio de Hidráulica de la FCEFYN de la UNC.

Dicha sonda presenta precisión de laboratorio (Tabla 2) y la facilidad de operación mediante un pulsador para medición de la calidad del agua en el campo. Se pueden medir seis parámetros: pH, temperatura, oxígeno disuelto, conductividad electrolítica, turbidez y salinidad. El sensor mide al ser sumergido directamente en el agua, eliminando la necesidad de recoger muestras.



Figura 23: Sonda multiparamétrica Horiba U-10

CAPÍTULO II – TÉCNICAS EXPERIMENTALES UTILIZADAS

Tabla 2: Características técnicas de la sonda multiparamétrica Horiba U-10

ESPECIFICACIONES	
Parámetro	Rango de mediciones
pH	0 a 14
Conductividad	0 a 100 mS/cm
Turbidez	0 a 800 NTU
Oxígeno Disuelto	0 a 19,9 mg/l
Temperatura	0 a 50°C
Salinidad	0 a 4%



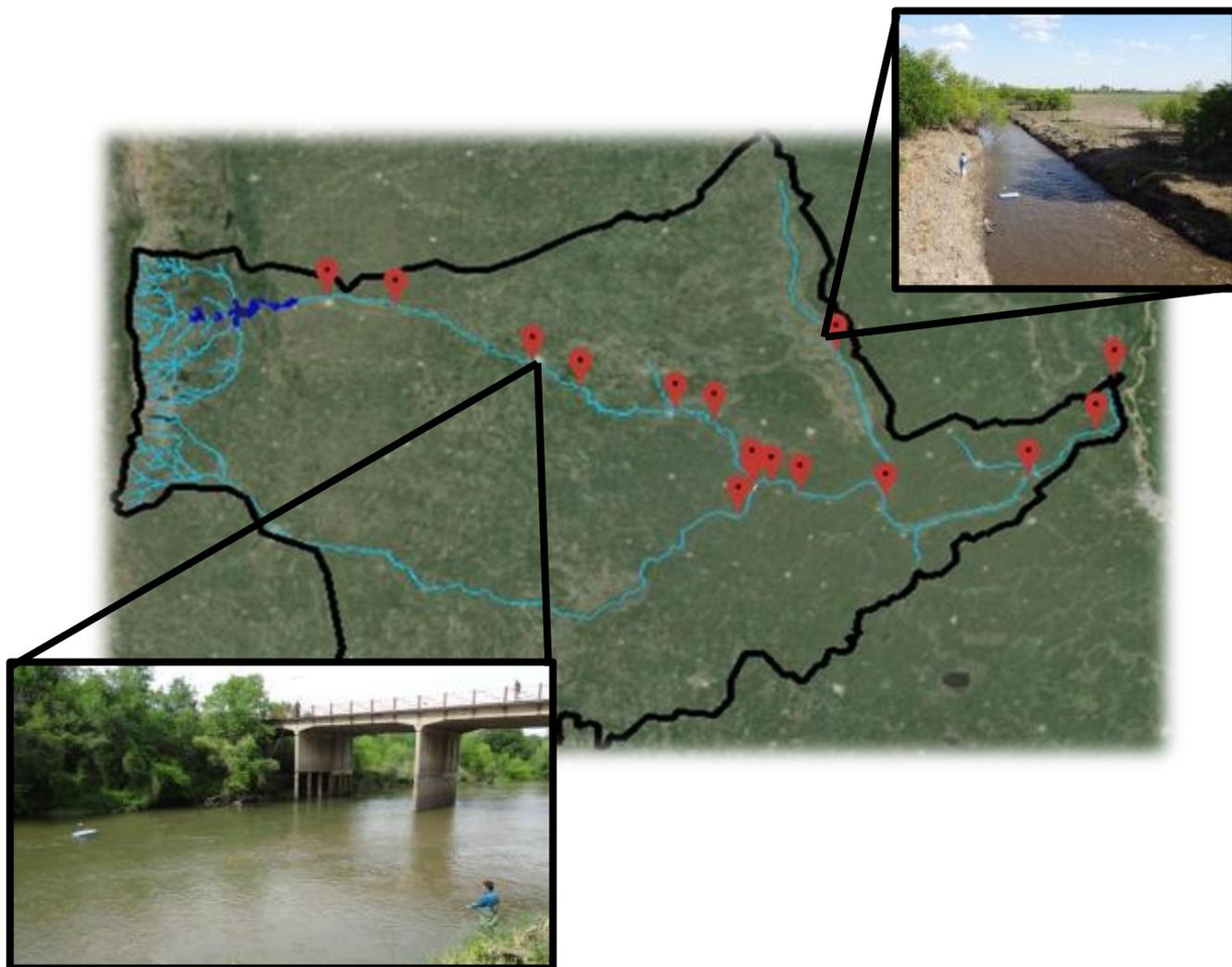
Universidad
Nacional
de Córdoba



FCEFN
Facultad de Ciencias
Exactas, Físicas y Naturales

CAPÍTULO III

LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS SITIOS DE MEDICIÓN



Capítulo III

LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN SITIOS DE MEDICIÓN

3.1. Introducción

A lo largo de los años 2012, 2013 y 2014, en un esfuerzo conjunto entre tres instituciones de las Provincias de Córdoba y Santa Fe (CETA de la Universidad Nacional de Córdoba, CIFASIS CCT Rosario y la Secretaría de Recursos Hídricos del Gobierno de la Provincia de Córdoba) se realizaron diferentes campañas de aforo para cuantificar y caracterizar experimentalmente caudales superficiales en distintas secciones transversales seleccionadas en los principales tributarios y en el río Carcarañá, en su escurrimiento tanto en la Provincia de Córdoba como en la provincia de Santa Fe, hasta su desembocadura en el río Coronda en las cercanías de la localidad de Puerto Gaboto

La selección adecuada de los sitios de medición es clave para realizar una completa y representativa caracterización del sistema de estudio. En este trabajo, la selección de los sitios se llevó a cabo mediante un proceso iterativo, en el cual se tuvo en cuenta: a) Los aportes relativos que recibe el sistema durante el transcurso de las campañas de medición, b) La accesibilidad a los mismos, ya sea desde ambos márgenes, o bien desde un puente, de tal forma que el recorrido del equipo sea lo más uniforme posible, c) Secciones presenten un flujo libre de turbulencias y otros efectos producidos por obstáculos naturales o antropogénicos, por lo que se seleccionaron tramos lo más rectos posibles, lejos de pilas de puentes, y otras interferencias que puedan afectar la medición.

Al momento de escribir esta tesis, se ha caracterizado el flujo un total de 16 secciones de medición (Figura 24) (7 secciones en el río Tercero – Ctlamochita, 2 en el río Saladillo, 6 en el río Carcarañá y una en el arroyo Tortugas), realizándose un total de 76 aforos.

3.2. Localización de las secciones de medición

En el río Tercero (Ctalamochita), los caudales erogados en la central hidroeléctrica emplazada en el embalse Piedras Moras proveen en cada campaña de medición la condición de borde superior para el sistema estudiado. La primera sección aforada en el programa de monitoreo se encuentra en la ciudad de río Tercero precisamente en el Balneario municipal de la localidad homónima (Figura 25 y Figura 26). La siguiente sección aforada se encuentra ubicada la localidad de Villa Ascasubi, en el puente de ingreso a la misma

(Figura 27 y Figura 28). La posterior sección de aforo se ubica en el puente de la ruta nacional 158 en proximidades de la ciudad de Villa María (Figura 29 y Figura 30). Además en esta ciudad se realizaron mediciones en el puente Alberdi (Figura 31 y Figura 32) ya que el flujo en inmediaciones del puente sobre la ruta nacional 158 presenta características particulares en condiciones de aguas altas y medias que no son óptimas para el uso del ADCP. Otras secciones de medición sobre el río Tercero (Ctalamochita) se ubican en las localidades de Cárcano (Figura 33 y Figura 34); Bell Ville con secciones de medición en el azud homónimo (Figura 35 y Figura 36) y el puente Sarmiento de dicha localidad (Figura 37 y Figura 38); San Marcos Sud (Figura 39 y Figura 40); y también a pocos metros de la confluencia con el río Saladillo (Figura 41 y Figura 42).



Figura 24: Secciones de aforo de la cuenca del río Carcarañá

En lo que respecta al río Saladillo, la primera sección se encuentra en el cruce con la ruta provincial 6 (Córdoba), aguas arriba de la confluencia de este río con el río Tercero (Ctalamochita) (Figura 43 y Figura 44). La segunda sección de aforo está ubicada a pocos metros de dicha confluencia (Figura 45 y Figura 46)

También se realizaron aforos de caudal en siete secciones sobre el río Carcarañá: a pocos metros de la confluencia entre los ríos Tercero (Ctalamochita) y Saladillo (Figura 47 y Figura 48), 11,5km aguas abajo de dicha confluencia en Inrville (Córdoba) (Figura 49 y Figura 50), en el puente sobre ruta provincial 12 también en la misma localidad (Figura 51 y Figura 52), en Cruz Alta (Córdoba) sobre el puente de la ruta provincial 15 (Figura 53 y Figura 54), y en la provincia de Santa Fe, en las localidades de Carcarañá, en el parque de dicha localidad (Figura 55 y Figura 56) y en el puente de la ruta 9 en el

ingreso de la misma; Pueblo Andino (Figura 59 y Figura 60) y Puerto Gaboto (Figura 61 y Figura 62)

La última sección de aforo se encuentra en el arroyo Tortugas sobre el puente de ingreso a la localidad homónima en el límite de las provincias de Córdoba y Santa Fe (Figura 63 y Figura 64).



Figura 25: Sección de aforo en el río Tercero (Ctalamochita) ubicada en el balneario de la ciudad homónima.



Figura 26: Sección de aforo en el río Tercero (Ctalamochita) ubicada en el balneario de la ciudad homónima.



Figura 27: Sección de aforo en el puente de ingreso a la localidad de Villa Ascasubi.



Figura 28: Imagen del puente sobre el río Tercero (Ctalamochita) en la localidad de Villa Ascasubi.



Figura 29: Imagen de la sección de aforo en el río Tercero (Ctalamochita) ubicada en el cruce con ruta 158 (Villa María).



Figura 30: Imagen de la sección de aforo en el río Tercero (Ctalamochita) ubicada en el cruce con ruta 158 (Villa María).

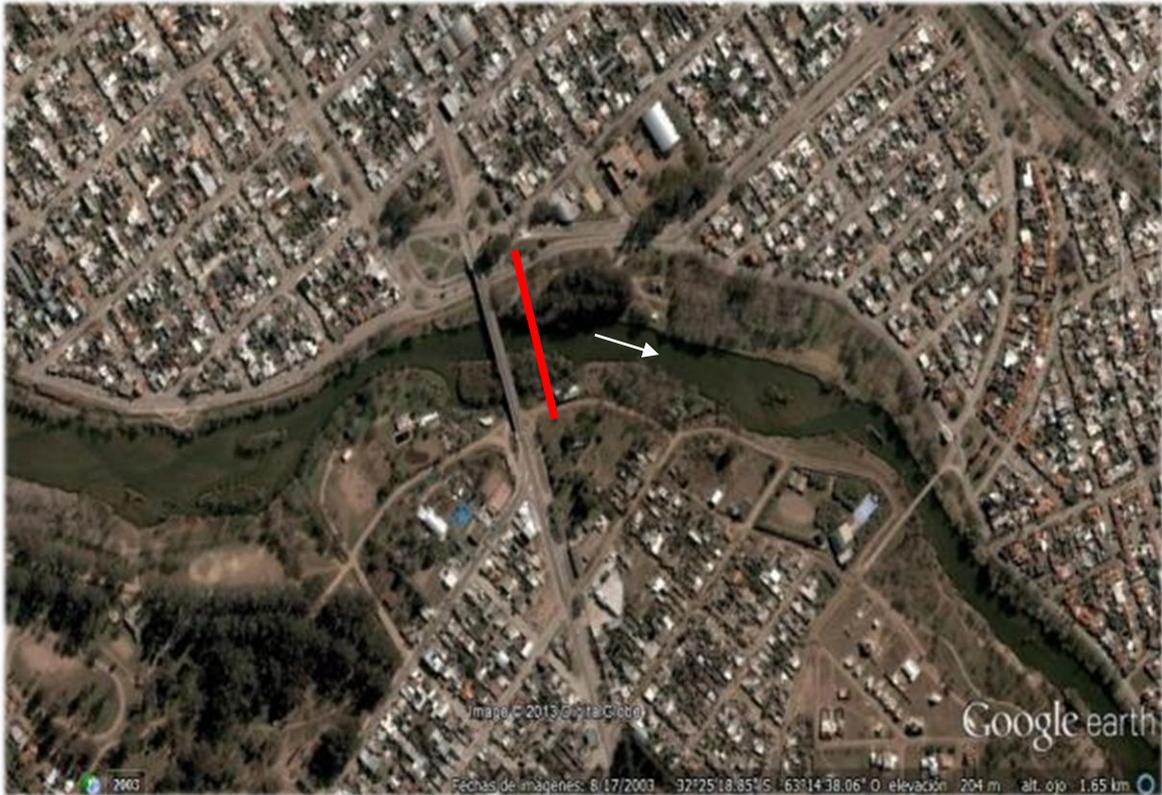


Figura 31: Sección de aforo en el río Tercero (Ctalamochita) ubicada en el puente Alberdi (Villa María).



Figura 32: Imagen de la Sección de aforo en el río Tercero (Ctalamochita) ubicada en el puente Alberdi (Villa María).

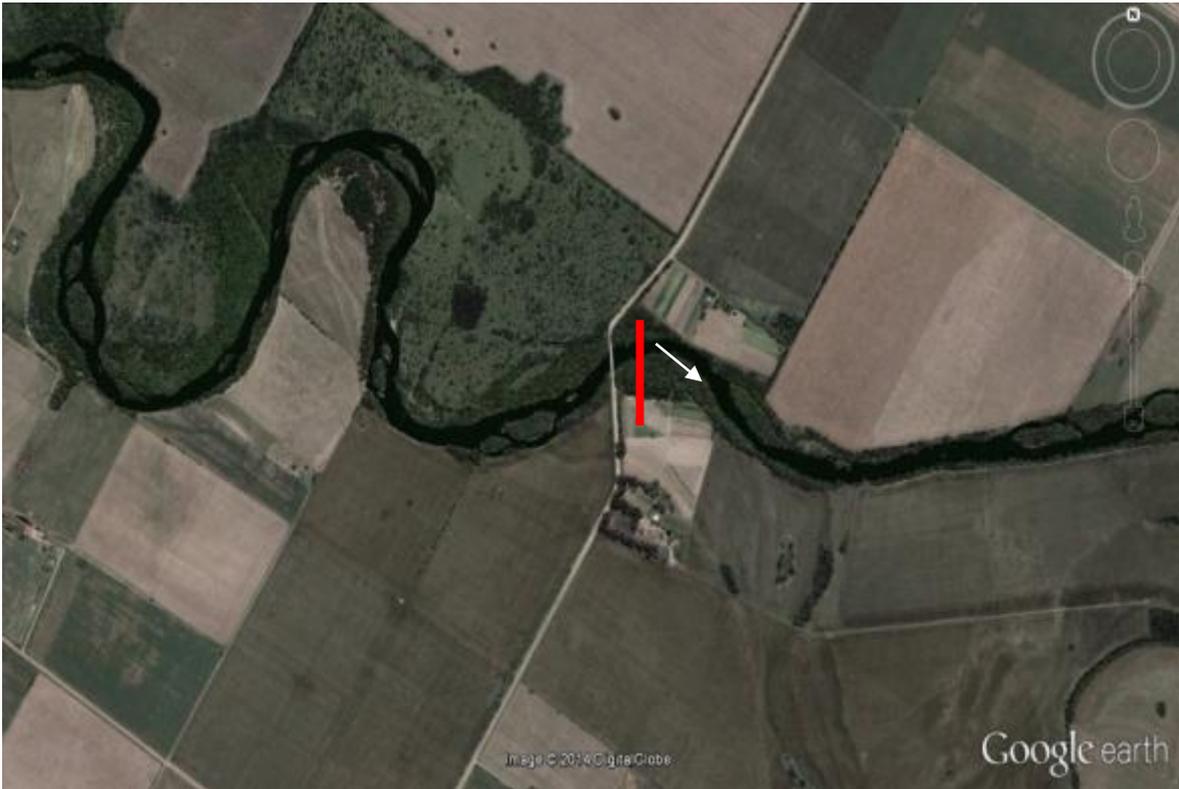


Figura 33: Sección de aforo en puente Cárcano en la localidad de Ramón J. Cárcano.



Figura 34: Imagen del puente Cárcano sobre el río Tercero (Ctalamochita) en la localidad de Ramón J. Cárcano.



Figura 35: Sección de aforo en el río Tercero (Ctalamochita) ubicada en el azud Bell Ville.



Figura 36: Sección de aforo en el río Tercero (Ctalamochita) ubicada en el azud Bell Ville.



Figura 37: Sección de aforo en puente Sarmiento de la localidad de Bell Ville.



Figura 38: Imagen del Puente Sarmiento sobre el río Tercero (Ctalamochita) de la ciudad de Bell Ville.



Figura 39: Sección de aforo en el río Tercero (Ctalamochita) ubicada en el azud San Marcos.



Figura 40: Sección de aforo en el río Tercero (Ctalamochita) ubicada en el azud San Marcos.



Figura 41: Sección de aforo en el Río Tercero (Ctalamochita) ubicada en la confluencia con el río Saladillo.



Figura 42: Sección de aforo en el río Tercero (Ctalamochita) ubicada en la confluencia con el río Saladillo.



Figura 43: Sección de aforo en el río Saladillo ubicada en el cruce con la ruta provincial 6.



Figura 44: Sección de aforo en el río Saladillo ubicada en el cruce con la ruta provincial 6.



Figura 45: Sección de aforo en el Río Saladillo ubicada en la confluencia con el río Tercero (Ctalamochita).



Figura 46: Sección de aforo en el río Saladillo ubicada en la confluencia con el río Tercero (Ctalamochita).



Figura 47: Sección de aforo en el río Carcaraña ubicada en la confluencia entre los ríos Tercero (Ctalamochita) y Saladillo.



Figura 48: Sección de aforo en el río Carcaraña ubicada en la confluencia entre los ríos Tercero (Ctalamochita) y Saladillo.

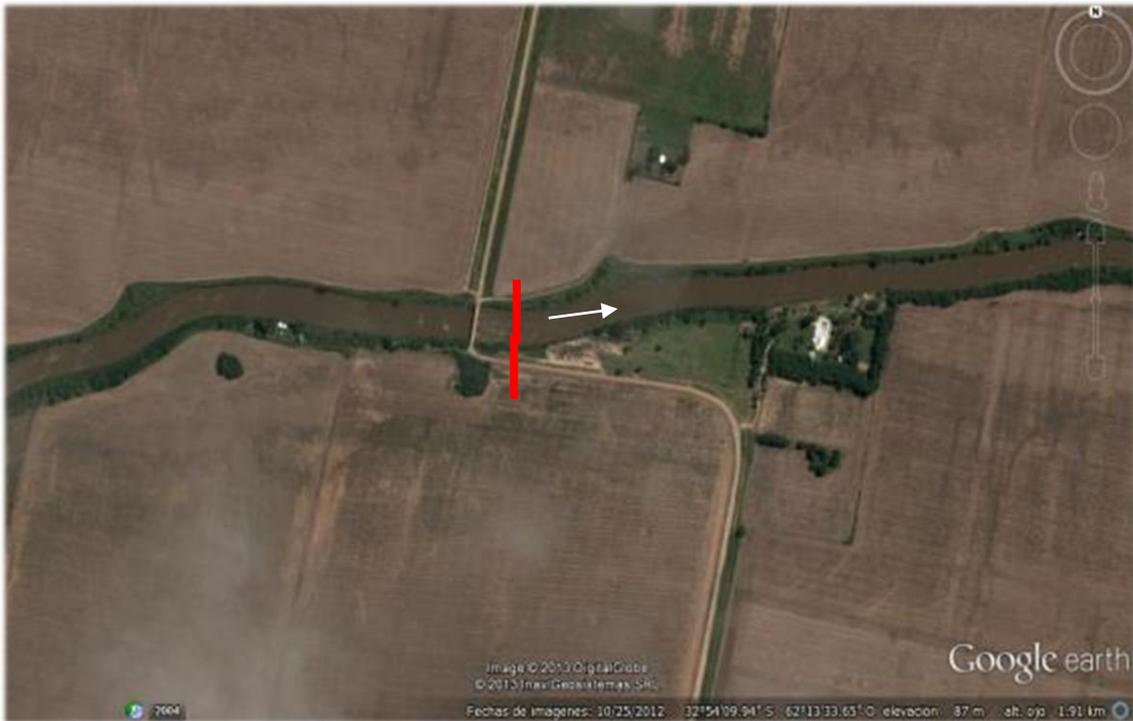


Figura 49: Sección de aforo sobre el río Carcarañá ubicada a 11,5km aguas abajo de la confluencia en cercanías de la localidad de Inrville.



Figura 50: Sección de aforo sobre el río Carcarañá ubicada a 11,5km aguas abajo de la confluencia en cercanías de la localidad de Inrville.

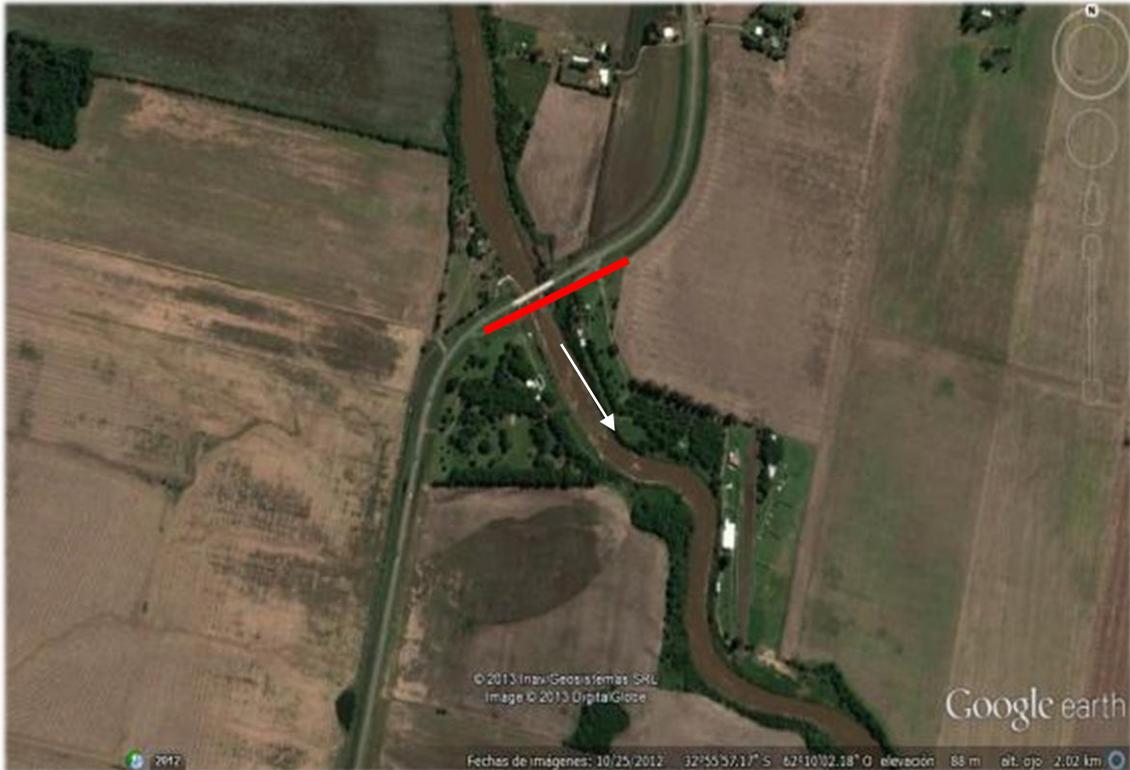


Figura 51: Sección de aforo sobre el río Carcarañá ubicada en el cruce con ruta provincial 12 en cercanías de la localidad de Inriville.



Figura 52: Sección de aforo sobre el río Carcarañá ubicada en el cruce con ruta provincial 12 en cercanías de la localidad de Inriville.



Figura 53: Sección de aforo en el río Carcarañá ubicada en el cruce con la ruta provincial 15 (Santa Fe) en proximidades de la localidad de Cruz Alta.



Figura 54: Sección de aforo en el río Carcarañá ubicada en el cruce con la ruta provincial 15 (Santa Fe) en proximidades de la localidad de Cruz Alta.

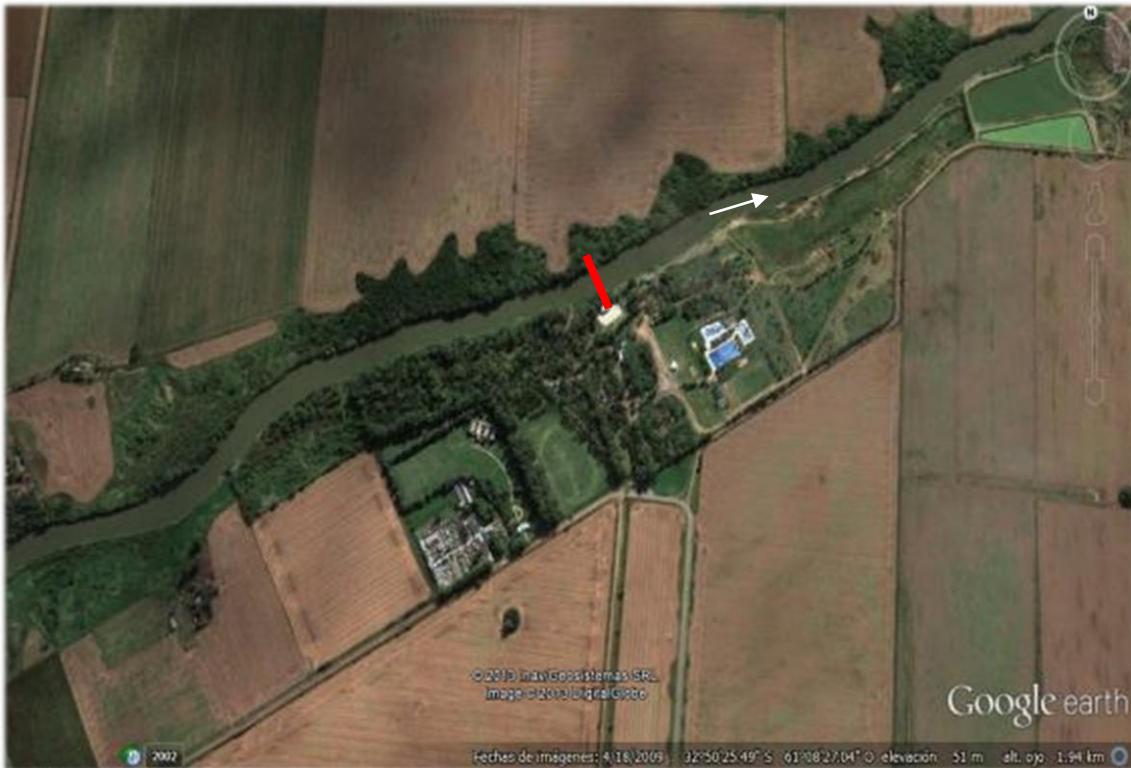


Figura 55: Sección de aforo en el río Carcarañá ubicada en el Parque Sarmiento de la localidad de Carcarañá.



Figura 56: Sección de aforo en el río Carcarañá ubicada en el Parque Sarmiento de la localidad de Carcarañá.

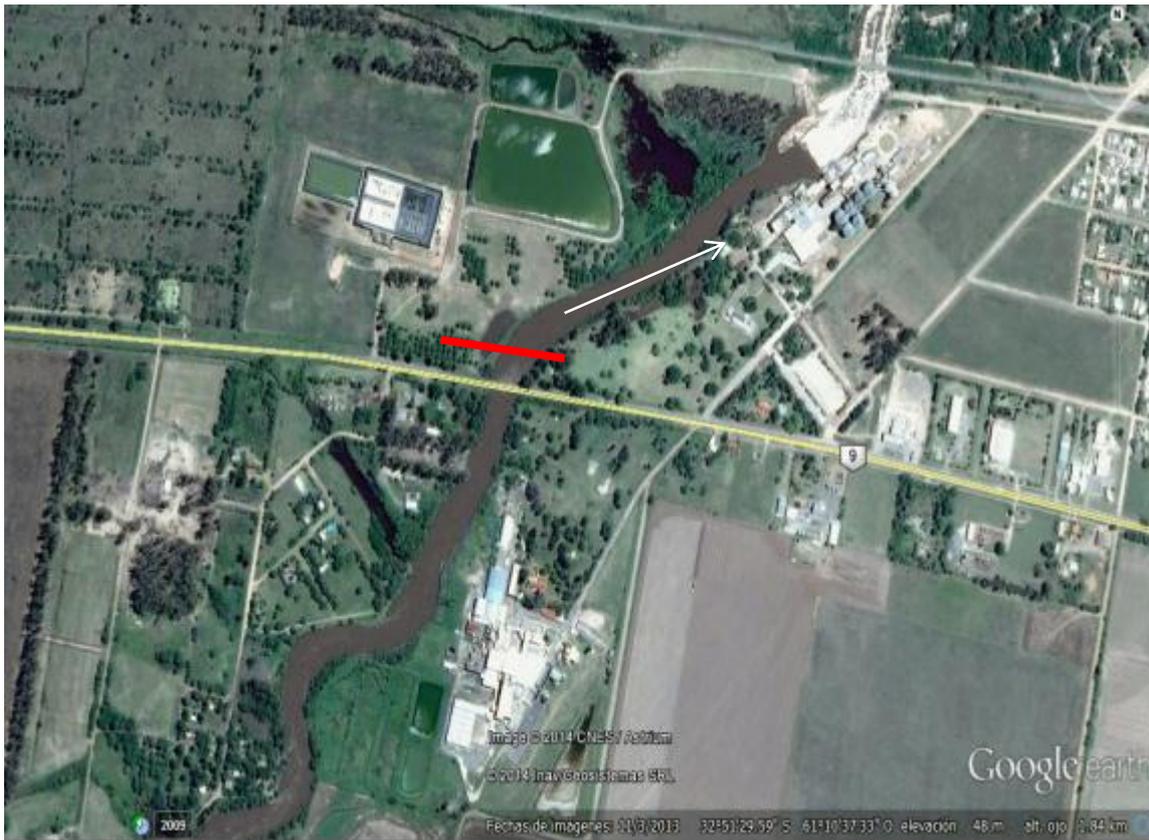


Figura 57: Sección de aforo en el río Carcarañá en el cruce con la ruta nacional 9 en la localidad de Carcarañá.



Figura 58: Sección de aforo en el río Carcarañá en el cruce con la ruta nacional 9 en la localidad de Carcarañá.



Figura 59: Sección de aforo en el río Carcarañá ubicada en la ciudad de Pueblo Andino.



Figura 60: Sección de aforo en el río Carcarañá ubicada en la ciudad de Pueblo Andino.

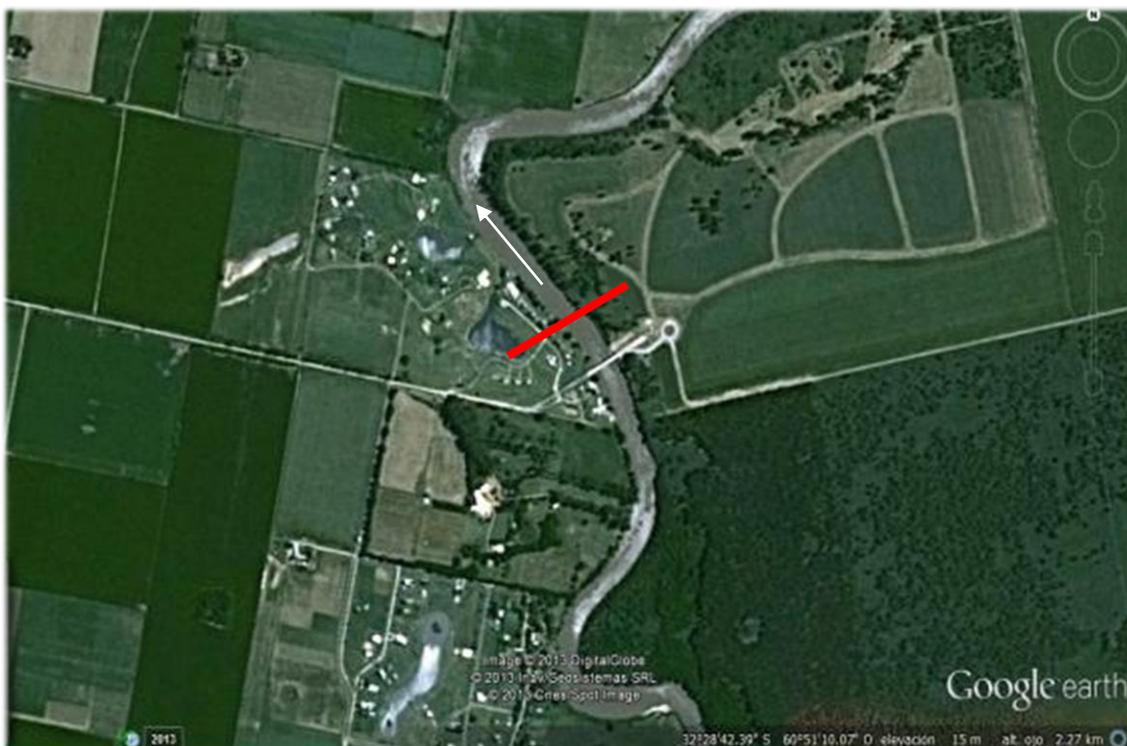


Figura 61: Sección de aforo en el río Carcarañá ubicada en proximidades de la localidad de Puerto Gaboto.



Figura 62: Sección de aforo en el río Carcarañá ubicada en proximidades de la localidad de Puerto Gaboto.

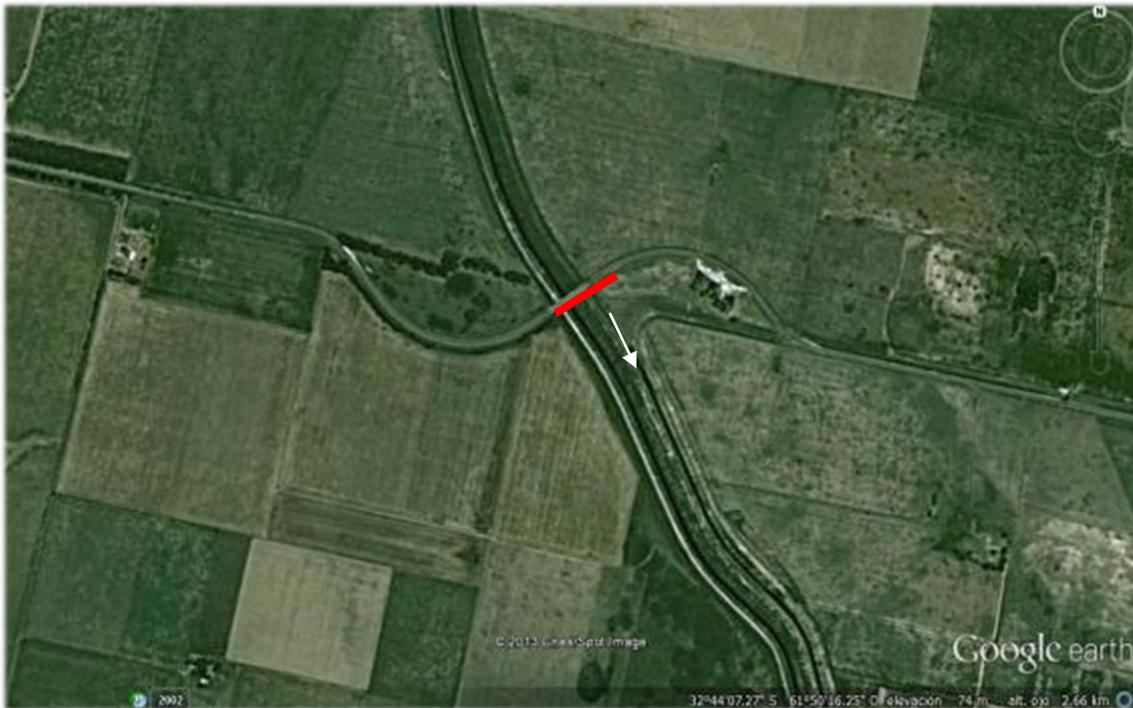


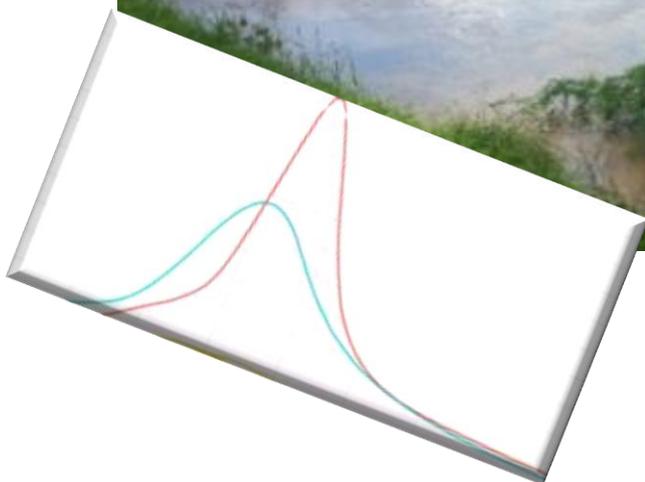
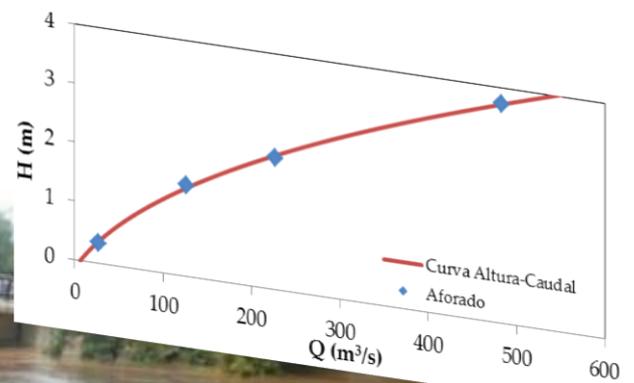
Figura 63: Sección de aforo en el arroyo Tortugas ubicada en proximidades de la localidad homónima.



Figura 64: Sección de aforo en el arroyo Tortugas ubicada en proximidades de la localidad homónima.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS DE LA CUANTIFICACION Y CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DEL FLUJO



Capítulo IV

**RESULTADOS DE LA CUANTIFICACIÓN Y
CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DEL FLUJO**

4.1. Introducción

Finalizadas las mediciones en campo en las secciones detalladas en el capítulo anterior, se procede al procesamiento de los datos sirviendo de apoyo para esta tarea las herramientas computacionales provistas por el programa RiverSuveyor Live detallado en el capítulo II. En primer lugar se determinan los caudales escurridos y los principales parámetros hidráulicos relevados (por ejemplo, nivel de superficie libre) en cada campaña de monitoreo para las secciones de cada tributario. Luego se presenta una caracterización de los escurrimientos relativos de todos los tributarios de la cuenca para diferentes condiciones hidrológicas y las curvas Altura de superficie libre - caudal escurrido (H-Q) para las diferentes secciones. Estos resultados son fundamentales y requeridos para para llevar a cabo un plan de gestión con el objetivo de lograr un manejo sustentable del recurso hídrico.

4.2. Resultados de caudales obtenidos durante las campañas

En la *Tabla 3* se muestran los caudales superficiales aforados y los parámetros hidráulicos más importantes de las diferentes secciones transversales monitoreadas en el río Carcarañá y sus principales tributarios (ríos Tercero -Ctalamochita- y Saladillo, y arroyo Tortugas).

Tabla 3: Resultados obtenidos en las campañas de aforo.

Camp.	Sección Aforo	Fecha	Ancho (m)	Prof. Med. (m)	Prof. Máx. (m)	Vel. Med. (m/s)	Vel. Max. (m/s)	Q (m ³ /s)
1	Río Tercero, (Ctalamochita) Balneario	11/06/2012	32,70	0,62	1,03	0,84	1,48	17,22
	Erogación P. Moras*	11/06/2012	-	-	-	-	-	18,93
2	Río Tercero (Ctalamochita), Balneario	10/09/2012	32,80	0,57	1,07	0,80	1,73	14,79
	Erogación P. Moras*	10/09/2012	-	-	-	-	-	16,09
3	Río Tercero (Ctalamochita), Balneario	12/11/2012	35,05	0,61	1,06	0,86	1,88	18,51
	Erogación P. Moras*	12/11/2012	-	-	-	-	-	18,74
4	Río Tercero (Ctalamochita), Confluencia	17/12/2012	44,16	2,06	2,56	0,48	1,32	43,65
	Río Saladillo, Confluencia	17/12/2012	34,95	2,56	3,22	1,01	1,74	90,60
	Erogación P. Moras*	17/12/2012	-	-	-	-	-	25,51
5	Río Tercero (Ctalamochita), Balneario	04/03/2013	40,43	0,69	1,53	0,84	2,41	23,38
	Erogación P. Moras*	04/03/2013	-	-	-	-	-	24,27

CAPÍTULO IV – RESULTADOS DE LA CUANTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN
HIDRODINÁMICA DEL FLUJO

Camp.	Sección Aforo	Fecha	Ancho (m)	Prof. Med. (m)	Prof. Máx. (m)	Vel. Med. (m/s)	Vel. Max. (m/s)	Q (m ³ /s)
6	Río III –Ctalamochita-, Confluencia	14/05/2013	40,48	1,17	1,42	0,57	1,43	26,94
	Río Saladillo, Confluencia	14/05/2013	33,52	1,55	2,55	0,34	0,99	17,66
	Erogación P. Moras*	14/05/2013	-	-	-	-	-	22,66
7	Río Tercero –Ctalamochita-, Balneario	28/05/2013	41,97	0,70	1,71	0,61	2,23	17,87
	Erogación P. Moras*	28/05/2013	-	-	-	-	-	18,29
8	Erogación P. Moras*	11/06/2013	-	-	-	-	-	18,31
	Río Tercero (Ctalamochita), Va, María -Puente Ruta 158	11/06/2013	23,23	0,94	1,47	0,75	1,98	20,00
	Río Saladillo, Puente Ruta 6	11/06/2013	23,01	0,98	1,91	0,66	1,37	14,84
	Río Carcarañá, Inrville	11/06/2013	57,98	0,86	1,43	0,78	1,81	38,97
	Río Carcarañá, Cruz Alta	11/06/2013	56,42	1,35	2,40	0,65	1,86	49,77
9	Erogación P. Moras*	13/08/2013	-	-	-	-	-	19,32
	Río Tercero (Ctalamochita), Confluencia	13/08/2013	41,29	0,91	1,24	0,52	1,13	19,85
	Río Saladillo, Confluencia	13/08/2013	33,13	1,29	2,05	0,25	0,91	10,50
	Río Carcarañá, Confluencia	13/08/2013	59,11	1,07	1,95	0,51	1,30	30,66
10	Erogación P. Moras*	09/09/2013	-	-	-	-	-	16,14
	Río Tercero (Ctalamochita), Balneario	09/09/2013	36,19	0,67	1,02	0,68	1,68	16,54
	Río Saladillo, Puente Ruta 6	10/09/2013	21,71	0,86	1,67	0,49	1,16	9,21
	Río Carcarañá, Inrville	10/09/2013	57,73	0,78	1,28	0,62	1,58	27,71
11	Erogación P. Moras*	30/09/2013	-	-	-	-	-	13,38
	Río Saladillo, Puente ruta 6 (Monte Buey)	30/09/2013	22,7	0,94	1,85	0,65	1,42	13,75
	Río Carcarañá, Inrville	30/09/2013	60,24	0,82	1,31	0,6	1,54	29,31
	Río Carcarañá, Cruz Alta	30/09/2013	47,28	1,12	2,17	0,63	1,57	33,53
	Río Carcarañá, Parque Sarmiento	30/09/2013	42,75	1,5	2,20	0,5	1,52	32,32
	Río Carcarañá, Pueblo Andino	01/10/2013	45,65	1,63	2,60	0,43	1,25	31,84
	Río Carcarañá, Puerto Gaboto	01/10/2013	56,37	1,98	3,43	0,31	0,99	34,48
12	Erogación P. Moras*	19/11/2013	-	-	-	-	-	13,62
	Río Tercero (Ctalamochita), Puente Alberdi (Villa María)	19/11/2013	27,57	0,51	0,84	0,704	1,40	9,64
	Río Saladillo, Puente ruta 6	19/11/2013	22,4	1,06	1,81	0,62	1,49	14,75
	Río Carcarañá, Puente ruta 12 (Inrville)	19/11/2013	36,42	0,93	1,38	0,83	1,92	28,02
	Río Carcarañá, Cruz Alta	19/11/2013	58,47	1,6	2,66	0,69	2,00	64,98
	Río Carcarañá, Parque Sarmiento	19/11/2013	48,39	2,02	2,77	0,75	1,43	72,97
	Río Carcarañá, Pueblo Andino	20/11/2013	49,15	2,43	3,30	0,62	1,44	73,93
	Río Carcarañá, Puerto Gaboto	20/11/2013	58,75	3,01	4,16	0,44	1,28	77,6
	Arroyo Tortugas, Tortugas	20/11/2013	16,21	2,08	2,56	0,71	1,63	23,93

CAPÍTULO IV – RESULTADOS DE LA CUANTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN
HIDRODINÁMICA DEL FLUJO

Camp.	Sección Aforo	Fecha	Ancho (m)	Prof. Med. (m)	Prof. Máx. (m)	Vel. Med. (m/s)	Vel. Max. (m/s)	Q (m³/s)
13	Erogación P. Moras*	17/12/2013	-	-	-	-	-	11,11
	Río Tercero (Ctalamochita), azud Bell Ville	17/12/2013	28,99	1,02	1,58	0,34	1,14	10,06
	Río Tercero (Ctalamochita), azud San Marcos	17/12/2013	26,81	1,83	2,94	0,28	1,06	13,56
14	Erogación P. Moras**	27/02/2014	-	-	-	-	-	490,00
	Río Tercero (Ctalamochita), Villa Ascasubi	27/02/2014	211,91	1,73	4,27	1,314	3,16	482,67
	Río Tercero (Ctalamochita) - Puente Alberdi, Villa María	27/02/2014	108,03	2,4	5,85	1,263	3,12	325,95
15	Erogación P. Moras**	05/03/2014	-	-	-	-	-	310,00
	Río Tercero (Ctalamochita) - Puente Alberdi, Villa María	05/03/2014	114,34	2,1	5,90	1,269	2,97	299,36
	Río Tercero (Ctalamochita) - Puente Cárcano, Cárcano	05/03/2014	103,06	3,4	6,56	0,785	2,16	274,81
	Río Tercero (Ctalamochita) - Puente Sarmiento, Bell Ville	05/03/2014	44,51	5,9	8,15	1,125	2,70	256,65
	Río Tercero (Ctalamochita) - San Marcos Sud	05/03/2014	37,435	4,3	7,73	1,446	2,42	232,75
	Río Tercero (Ctalamochita), Villa Ascasubi	06/03/2014	111,7	1,32	3,81	1,546	3,17	226,66
	Río Tercero (Ctalamochita) - Puente Alberdi, Villa María	06/03/2014	103,92	2,04	5,87	1,351	3,03	288,01
	Río Tercero (Ctalamochita) - Puente Sarmiento, Bell Ville	06/03/2014	43,135	5,44	8,12	1,072	2,41	245,62
16	Erogación P. Moras**	07/04/2014	-	-	-	-	-	126,00
	Río Tercero (Ctalamochita), Villa Ascasubi	07/04/2014	72,401	1,19	2,49	1,455	2,98	126,11
	Río Tercero (Ctalamochita) - Puente Alberdi, Villa María	08/04/2014	37,459	2,22	3,088	1,456	2,55	121,22
	Río Tercero (Ctalamochita) - Puente Sarmiento, Bell Ville	08/04/2014	33,739	3,07	4,689	1,09	3,66	112,84
	Río Saladillo - Puente Ruta 6	08/04/2014	27,525	2,70	3,786	1,208	2,05	89,813
	Río Carcarañá, Puente ruta 12 (Inriville)	08/04/2014	47,533	2,76	3,647	1,569	2,63	206,38
	Río Carcarañá, Cruz Alta	08/04/2014	73,613	3,35	5,161	1,119	2,18	276,45
	Río Carcarañá, Carcarañá	08/04/2014	66,724	5,72	8,399	0,845	2,38	323,22
	Río Carcarañá, Pueblo Andino	09/04/2014	57,486	4,86	6,494	1,235	2,81	344,89
	Río Carcarañá, Puerto Gaboto	09/04/2014	63,369	5,41	6,906	1,108	2,61	379,89
	Arroyo Tortugas, Canal Pcupal	09/04/2014	19,067	2,36	3,319	0,954	1,67	43,014
Arroyo Tortugas, Canal Secundario	09/04/2014	15,917	1,35	2,124	0,582	1,74	12,591	
17	Erogación P. Moras*							24,43
	Río Tercero (Ctalamochita), Villa Ascasubi	09/06/2014	34,329	1,32	1,515	1,007	1,83	26,21
	Río Tercero (Ctalamochita) - Puente Alberdi, Villa María	10/06/2014	33,144	1,23	1,339	0,956	1,93	25,64

CAPÍTULO IV – RESULTADOS DE LA CUANTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN
HIDRODINÁMICA DEL FLUJO

Camp.	Sección Aforo	Fecha	Ancho (m)	Prof. Med. (m)	Prof. Máx. (m)	Vel. Med. (m/s)	Vel. Max. (m/s)	Q (m ³ /s)
17	Río Tercero (Ctalamochita) - Puente Sarmiento, Bell Ville	10/06/2014	25,101	1,22	1,894	0,947	2,00	29,10
	Río Saladillo - Puente Ruta 6	10/06/2014	25,654	1,63	2,672	0,918	1,87	38,48
	Río Carcarañá, Puente ruta 12 (Inrville)	10/06/2014	41,691	1,60	2,158	1,12	2,26	74,61
	Río Carcarañá, Cruz Alta	10/06/2014	62,228	1,79	3,094	0,785	1,77	87,57
	Río Carcarañá, Puente Ruta 9	10/06/2014	60,765	4,33	6,691	0,356	1,11	93,79
	Río Carcarañá, Pueblo Andino	11/06/2014	50,954	2,59	3,664	0,753	1,71	99,38
	Río Carcarañá, Puerto Gaboto	11/06/2014	60,877	4,17	5,896	0,413	1,09	104,72
	Arroyo Tortugas. C. Pcipal Arroyo Tortugas, Canal Secundario	11/06/2014	15,757	0,65	1,213	0,657	1,58	6,765
		11/06/2014	6,694	0,49	0,686	0,294	0,85	0,977
18	Erogación P. Moras	08/09/2014	-	-	-	-	-	28,000
	Río Tercero (Ctalamochita) Va. Ascasubi	08/09/2014	33,317	0,805	1,542	1,053	2,15	28,240
	Río Tercero (Ctalamochita) - Puente Alberdi, Villa María	09/09/2014	34,774	0,745	1,190	0,880	1,81	22,814
	Río Tercero (Ctalamochita) - Puente Sarmiento, Bell Ville	09/09/2014	24,812	1,154	1,806	0,875	1,82	25,062
	Río Saladillo - Puente Ruta 6	09/09/2014	22,922	1,274	2,202	0,640	1,47	18,699
	Río Carcarañá, Puente ruta 12 (Inrville)	09/09/2014	40,383	1,269	1,833	0,891	2,03	45,656
	Río Carcarañá, Cruz Alta	09/09/2014	57,902	1,447	2,512	0,691	1,75	57,878
	Río Carcarañá, Puente Ruta 9	10/09/2014	58,577	4,414	6,268	0,227	1,02	55,115
	Río Carcarañá, Pueblo Andino	10/09/2014	48,115	2,225	3,042	0,606	1,32	64,859
	Río Carcarañá, Puerto Gaboto	10/09/2014	59,118	3,941	5,748	0,277	1,04	64,568
Arroyo Tortugas. C. Pcipal	10/09/2014	14,021	0,785	1,126	0,254	1,23	2,803	
19	Erogación P. Moras*	16/10/2014						24,400
	Río Tercero - Puente Sarmiento, Bell Ville	16/10/2014	24,308	1,27	1,73	0,881	1,83	24,145
	Río Saladillo - Puente Ruta 6	16/10/2014	23,671	1,46	2,44	0,739	1,68	25,534
	Río Carcarañá, Puente ruta 12 (Inrville)	16/10/2014	42,041	1,38	2,07	0,941	2,25	56,630
	Río Carcarañá, Cruz Alta	16/10/2014	60,072	1,34	2,68	0,744	1,75	65,696
20	Erogación P. Moras*							18,000
	Río Tercero (Ctalamochita) Va. Ascasubi	17/11/2014	34,799	0,63	1,29	0,762	1,99	16,945
	Río Tercero (Ctalamochita) - Puente Alberdi, Villa María	18/11/2014	34,903	0,58	1,05	0,843	1,62	17,216

CAPÍTULO IV – RESULTADOS DE LA CUANTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN
HIDRODINÁMICA DEL FLUJO

Camp.	Sección Aforo	Fecha	Ancho (m)	Prof. Med. (m)	Prof. Máx. (m)	Vel. Med. (m/s)	Vel. Max. (m/s)	Q (m ³ /s)
	Río Tercero (Ctalamochita) - Puente Sarmiento, Bell Ville	18/11/2014	22,237	1,09	1,64	0,822	1,98	20,039
	Río Saladillo - Puente Ruta 6	18/11/2014	22,496	1,13	2,08	0,501	1,28	12,750
20	Río Carcarañá, Puente ruta 12 (Inriville)	18/11/2014	41,310	1,11	1,71	0,779	2,13	35,837
	Río Carcarañá, Cruz Alta	18/11/2014	54,770	1,20	2,26	0,635	1,71	41,781
	Río Carcarañá, Puente Ruta 9	18/11/2014	54,646	3,53	5,62	0,231	1,03	44,588

**Estimado a partir de la potencia diaria generada*

***Dato erogado proporcionado por la Secretaria de Recursos Hídricos de la Pcia. De Córdoba*

4.3. Contribución de los distintos tributarios al escurrimiento total del río Carcarañá

Durante las diferentes campañas de aforo que se realizaron abarcando el sistema en forma integral (Nº 8, Nº 11, Nº 12, Nº 16, Nº 17 y Nº 18), se determinó la contribución de cada uno de los tributarios del río Carcarañá para las diferentes condiciones de flujo existentes. En las campañas del 11 de junio de 2013 (campaña 8) y 16 de octubre de 2014 (campaña 19) realizadas en época de estiaje se determinó el aporte de cada uno de los tributarios, como así también la evolución del caudal del río Carcarañá hasta la localidad de Cruz Alta en el límite de las Provincias de Córdoba y Santa Fe. En las campañas realizadas los días 29 y 30 de septiembre y 1 de octubre de 2013 (campaña 11); 18, 19 y 20 de noviembre del 2013 (campaña 12); 07, 08 y 09 de abril de 2014 (campaña 16); 09, 08 y 10 de Junio de 2014 (Campaña 17) y 07, 08 y 09 de septiembre de 2014 (campaña 18) se extendió este estudio (a excepción de la campaña del 17 y 18 de noviembre de 2014 -Campaña 20- que se aforo hasta la localidad de Carcarañá) hasta la desembocadura del río Carcarañá en el río Coronda, tributario del río Paraná. Cabe aclarar que todas estas campañas, salvo la de los días 07,08 y 09 de abril de 2014 (campaña 16), se realizaron en época de estiaje.

4.3.1 Campaña Nº 8 (11 de junio de 2013)

En esta campaña se observó que el río Tercero (Ctalamochita) no ha recibido aportes significativos desde su nacimiento hasta la confluencia con el río Saladillo, por lo cual se puede deducir que el escurrimiento superficial de este río en épocas de estiaje depende en gran medida de lo erogado por el embalse Piedras Moras. Luego de la confluencia de los ríos Tercero (Ctalamochita) y Saladillo se verificó que a 11,5 km aguas abajo de la misma, en la localidad de Inriville, la suma de los caudales de ambos tributarios poseía

una diferencia pequeña con respecto al caudal medido en ese sitio, por lo cual se puede decir que no se han registrado aportes significativos. Entre las secciones de Inrville y Cruz Alta se observó un importante incremento de caudal en muy poca distancia. Esto se debe al aporte puntual del arroyo Tortugas pocos kilómetros aguas arriba de la sección de Cruz Alta. En la Figura 65 se observa la contribución relativa al escurrimiento superficial en la sección de Cruz Alta de los diferentes tributarios del río Carcarañá.

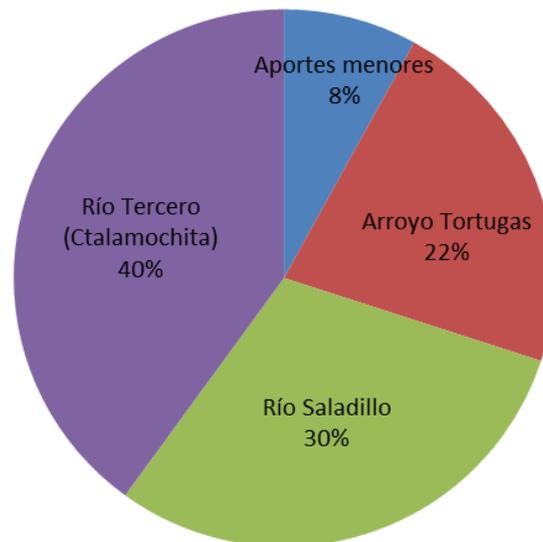


Figura 65: Contribución relativa de los tributarios principales en el caudal escurrido total en el río Carcarañá en la sección ubicada en Cruz Alta en la campaña de medición de día 11/06/2013.

4.3.2 Campaña N°11 (30 de septiembre y 1 de octubre de 2013)

Al igual que la campaña anterior se observó que el río Tercero o Ctalamochita no había recibido aportes significativos a lo largo de su recorrido ya que el caudal erogado por la central Piedras Moras era semejante a lo obtenido por diferencia entre los caudales del río Carcarañá en la sección ubicada en Inrville y el río Saladillo en la sección ubicada en las cercanías de la localidad homónima.

En el río Carcarañá en la sección ubicada en la localidad de Cruz Alta se observa un aporte significativo producido por el arroyo Tortugas. Aguas abajo de esta sección, al igual que el río Tercero o Ctalamochita, el río Carcarañá no presenta ningún aporte ni extracción significativa, lo cual se pudo verificar con las mediciones que se realizaron en las tres localidades de la provincia de Santa Fe: Carcarañá, Pueblo Andino y Puerto Gaboto. Para un nivel de confianza de 95% los caudales aforados en dichos puntos son estadísticamente similares al obtenido en Cruz Alta. En la Figura 66 se muestra la contribución relativa al

CAPÍTULO IV – RESULTADOS DE LA CUANTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DEL FLUJO

escurrimiento superficial en la localidad de Puerto Gaboto (Santa Fe) de los diferentes tributarios del río Carcarañá.

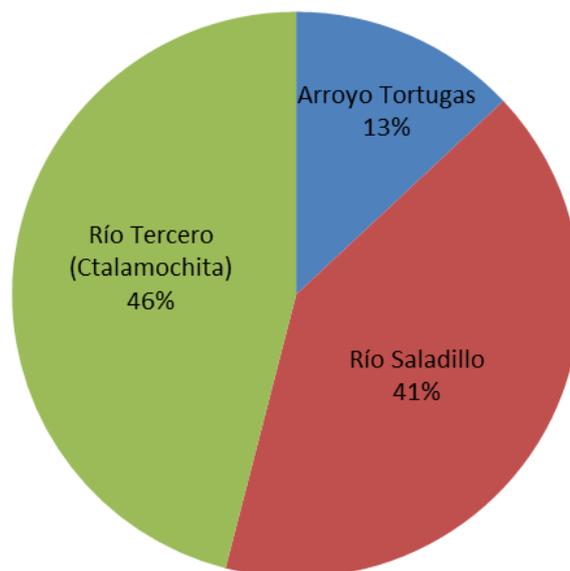


Figura 66: Contribución relativa de los tributarios principales al caudal total escurrido en el río Carcarañá en la localidad de Puerto Gaboto previo a su desembocadura en el río Coronda - Campaña de medición de los días 30/09/2013 y 01/10/2013.

4.3.3 Campaña N°12 (19 y 20 de noviembre de 2013)

Durante esta campaña, el caudal del río Tercero o Ctalamochita no varió significativamente desde su nacimiento hasta la confluencia con el río Saladillo. El río Carcarañá en la sección ubicada en la localidad de Inrville (11,5km aguas abajo de la confluencia con el río Saladillo), registró un caudal cuya diferencia con la suma de los caudales de los ríos Tercero o ríos Ctalamochita y Saladillo es no significativo. En la sección del río Carcarañá ubicada en la localidad de Cruz Alta se observó un aumento de caudal muy significativo, debido al aporte producido por el arroyo Tortugas. Los días anteriores a la campaña se registraron importantes lluvias en la zona central y norte de Córdoba, lo que explica el considerable caudal que escurre por este arroyo. En las sucesivas secciones de aforo a lo largo del río Carcarañá se pueden observar pequeñas variaciones de caudal debido al aporte de desagües pluviales de la cuenca.

En esta campaña se pudo comparar el caudal aforado por el grupo de trabajo en la sección ubicada en la localidad de Pueblo Andino (73,93 m³/s) con el caudal medido por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (71,20 m³/s) -http://www.hidricosargentina.gov.ar/acceso_bd.php-, donde la diferencia entre ambos valores es menor al 3%. En la Figura 67 se muestra la contribución relativa al escurrimiento superficial de los diferentes tributarios al río Carcarañá en la sección ubicada en la localidad de Puerto Gaboto (Santa Fe).

CAPÍTULO IV – RESULTADOS DE LA CUANTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DEL FLUJO

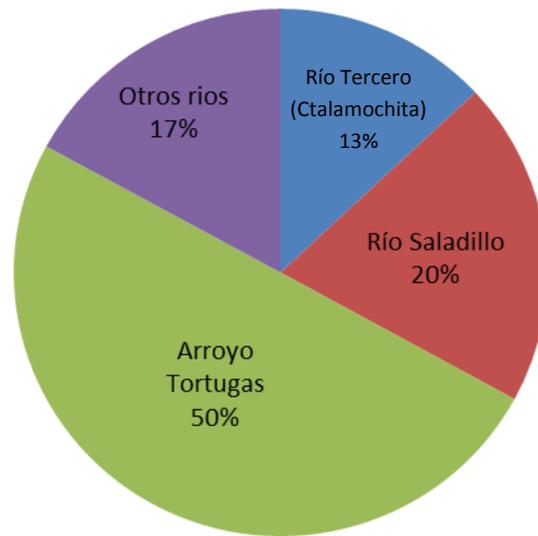


Figura 67: Contribución relativa de los tributarios principales al caudal total escurrido en el río Carcarañá en la localidad de Puerto Gaboto previo a su desembocadura en el río Coronda - Campaña de los días 18 y 19/11/2013 y 20/11/2013.

4.3.4 Campaña N° 16 (07, 08 y 09 de abril de 2014)

A diferencia de las campañas anteriores, las cuales fueron desarrolladas en épocas de estiaje, esta campaña se desarrolló en época de crecida. Los caudales registrados fueron importantes y en algunos casos históricos. En el río Tercero o Ctalamochita, los caudales aforados en las localidades de Villa Ascasubi, Villa María y Bell Ville demostraron que el río no recibe aportes ni extracciones significativas durante su recorrido, y que todo el caudal que escurre a través del proviene de la cuenca alta. Al igual que en las campañas anteriores, en la sección ubicada en la localidad de Inrville (11,5km aguas abajo de la confluencia) el caudal aforado fue semejante a la suma de los caudales de los ríos Tercero (Ctalamochita) y Saladillo. En la localidad de Cruz Alta se registró un incremento importante del caudal debido al aporte del arroyo Tortugas. Aguas abajo de esta sección, en las localidades de Carcarañá, Pueblo Andino y Puerto Gaboto, se observó que entre cada una de ellas el caudal del río Carcarañá aumentaba de forma significativa. Este aumento de caudal entre las secciones mencionadas se debe a los desagües pluviales rurales y arroyos menores (por ej. Canal Serodino – Santa Fe), los cuales presentaban importantes caudales debido a las grandes precipitaciones registradas en la provincia de Santa Fe la semana anterior a la campaña. En la Figura 68 se muestra la contribución relativa al escurrimiento superficial de los diferentes tributarios

CAPÍTULO IV – RESULTADOS DE LA CUANTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DEL FLUJO

del río Carcarañá en la sección ubicada en la localidad de Puerto Gaboto (Santa Fe).

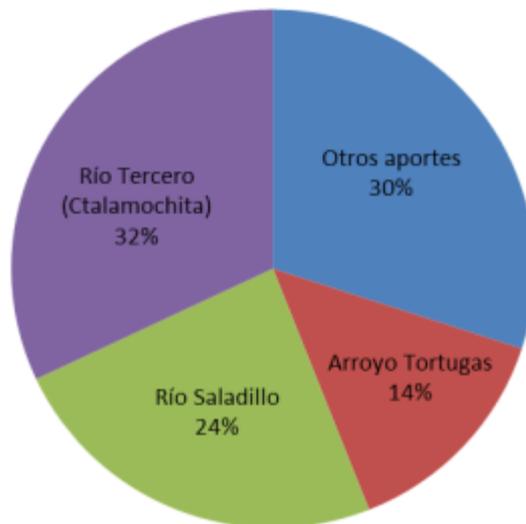


Figura 68: Contribución relativa de los tributarios principales al caudal total escurrido en el río Carcarañá en la localidad de Puerto Gaboto previo a su desembocadura en el río Coronda - Campaña del 07,08 y 09 de abril de 2014.

4.3.5 Campaña N° 17 (09, 10 y 11 de junio de 2014)

Esta campaña de aforo fue efectuada luego de un periodo extraordinario de crecidas en el sistema fluvial en los meses de febrero, marzo y abril de 2014. En el río Tercero (Ctalamochita), las mediciones efectuadas en Villa Ascasubi y Villa María demostraron que el río no presentaba variaciones significativas de caudal a lo largo de su recorrido y el caudal escurrido coincidía plenamente con lo erogado por el Dique Piedras Moras. En la ciudad de Bell Ville se registró un aumento leve del caudal del río Tercero (Ctalamochita) producto del aporte producido por los campos inundados por las fuertes precipitaciones y desbordes del río en los meses anteriores. En la localidad de Inrville, (11,5 km aguas abajo confluencia de los ríos Tercero (Ctalamochita) y Saladillo), sobre él se aforó un caudal del río Carcarañá levemente mayor que la suma de los caudales aportados por los tributarios (ríos Tercero –Ctalamochita- y Saladillo), esto se debe, al igual que el caso anterior, a las descargas provenientes de los campos inundados. En la localidad de Cruz Alta, el río Carcarañá presentó un leve aumento de caudal producido por el aporte del arroyo Tortugas, que a diferencia de campañas anteriores registró un caudal menos significativo. En las secciones de aforo ubicadas en las localidades de Carcarañá, Pueblo Andino y Puerto Gaboto, el caudal del río aumentaba levemente debido a los aportes producidos por las descargas de los campos producto de los excedentes

CAPÍTULO IV – RESULTADOS DE LA CUANTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DEL FLUJO

hídricos registrados en meses anteriores. En la Figura 69 se muestra la contribución relativa al escurrimiento superficial de los diferentes tributarios del río Carcarañá en la sección ubicada en la localidad de Puerto Gaboto (Santa Fe).

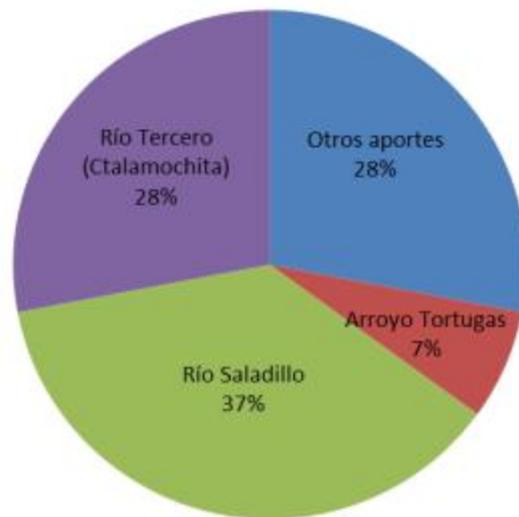


Figura 69: Contribución relativa de los tributarios principales al caudal total escurrido en el río Carcarañá en la localidad de Puerto Gaboto previo a su desembocadura en el río Coronda - Campaña del 09,10 y 11 de junio de 2014.

4.3.6 Campaña N° 18 (08, 09 y 10 de septiembre de 2014)

En esta campaña se observó que el caudal del río Tercero (Ctalamochita) decreció desde Villa Ascasubi hasta Villa María. Esto es producto de un cambio en el turbinado realizado por EPEC el día 08/09/14, el cual generó un pulso que pudo ser medido en Villa Ascasubi, pero al momento de realizar la medición (09/09/14) en Villa María, el mismo no había llegado. Entre esta sección y la confluencia con el río Saladillo, el río Tercero (Ctalamochita) no ha tenido aportes significativos. Luego de la confluencia, se verificó que a 11,5 km aguas abajo de la misma en la localidad de Inrville, la suma de los caudales de ambos tributarios poseía una diferencia pequeña con respecto al caudal medido en ese sitio, por lo cual se puede decir que no se han registrado aportes significativos. Entre las secciones de Inrville y Cruz Alta se observó un incremento de caudal en muy poca distancia. Esto se debe al aporte puntual del arroyo Tortugas y otros arroyos aledaños pocos kilómetros aguas arriba de la sección de Cruz Alta. Aguas abajo de esta sección, el río Carcarañá no presentó ningún aporte hasta la localidad Caracarañá. Entre la localidad de Caracarañá y Pueblo Andino se observó un aporte significativo al escurrimiento superficial del río Carcarañá, el cual se atribuye al canal Salto Grande. Aguas abajo de esta sección hasta la desembocadura del río Carcarañá en el río Coronda, no han registrado aportes

CAPÍTULO IV – RESULTADOS DE LA CUANTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DEL FLUJO

significativos. En la Figura 70 se muestra la contribución relativa al escurrimiento superficial de los diferentes tributarios del río Carcarañá en la sección ubicada en la localidad de Puerto Gaboto (Santa Fe).

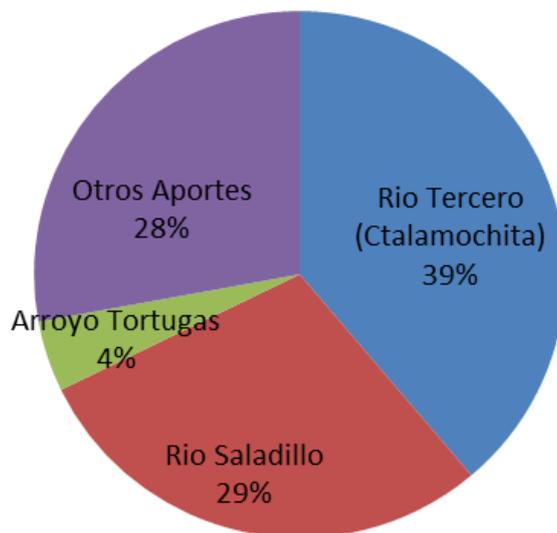


Figura 70: Contribución relativa de los tributarios principales al caudal total escurrido en el río Carcarañá en la localidad de Puerto Gaboto previo a su desembocadura en el río Coronda - Campaña del 09,10 y 11 de Septiembre de 2014.

4.3.7 Campaña N° 19 (16 de octubre de 2014)

En esta campaña se observó que el río Tercero (Ctalamochita) no ha recibido aportes significativos desde su nacimiento hasta la confluencia con el río Saladillo, por lo cual se puede afirmar que el caudal escurrido por este río depende fuertemente de lo erogado por el Dique Piedras Moras. Luego de la confluencia de los ríos Tercero (Ctalamochita) y Saladillo se verificó que a 11,5 km aguas abajo de la misma, en la localidad de Inrville, la suma de los caudales de ambos tributarios poseía una diferencia pequeña con respecto al caudal medido en ese sitio, por lo cual se puede decir que no se han registrado aportes significativos. Entre las secciones de Inrville y Cruz Alta se observó un importante incremento de caudal en muy poca distancia. Esto se debe al aporte puntual del arroyo Tortugas y otros arroyos aledaños pocos kilómetros aguas arriba de la sección de Cruz Alta. En la Figura 71 se observa la contribución relativa al escurrimiento superficial en la sección de Cruz Alta de los diferentes tributarios del río Carcarañá.

CAPÍTULO IV – RESULTADOS DE LA CUANTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DEL FLUJO

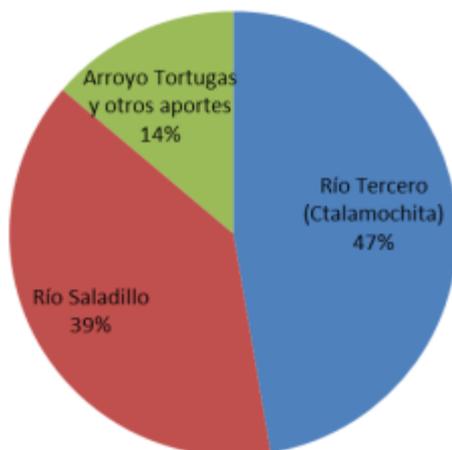


Figura 71: Contribución relativa de los tributarios principales en el caudal escurrido total en el río Carcarañá en la sección ubicada en Cruz Alta en la campaña de medición de día 16/10/2014.

4.3.8 Campaña N° 20 (17 y 18 de noviembre de 2014)

Durante esta campaña, el caudal del río Tercero o Ctalamochita no varió significativamente desde su nacimiento hasta la confluencia con el río Saladillo. El río Carcarañá en la sección ubicada en la localidad de Inrville (11,5km aguas abajo de la confluencia con el río Saladillo), registró un caudal cuya diferencia con la suma de los caudales de los ríos Tercero o ríos Ctalamochita y Saladillo es no significativo. En la sección del río Carcarañá ubicada en la localidad de Cruz Alta se observó un aumento de caudal muy significativo, debido al aporte producido por el arroyo Tortugas y arroyos aledaños. Desde esta sección hasta la localidad de Carcarañá, el río no ha tenido aportes o extracciones significativas. En la Figura 72 se muestra la contribución relativa al escurrimiento superficial de los diferentes tributarios al río Carcarañá en la sección ubicada en la localidad de Puerto Gaboto (Santa Fe).

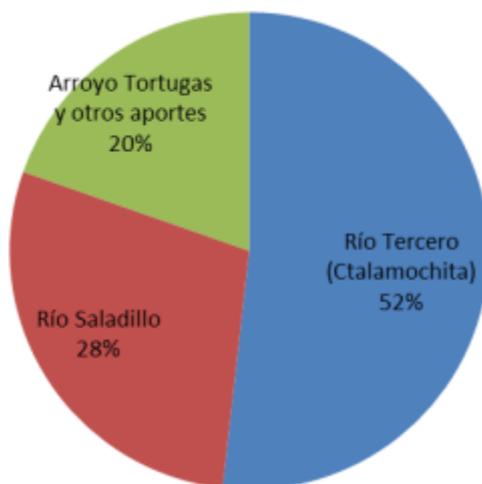


Figura 72: Contribución relativa de los tributarios principales en el caudal escurrido total en el río Carcarañá en la sección ubicada en la localidad de Carcarañá en la campaña de medición de los días 17 y 18 de noviembre de 2014.

4.3.9 Resumen de las observaciones realizadas.

Del análisis de las campañas de aforo realizadas, se deduce que el caudal superficial que escurre en las cercanías de las localidades de Río Tercero y Villa Ascasubi, está fuertemente influenciado por lo erogado por el Dique Piedras Moras, ya sea por la central hidroeléctrica o por las estructuras de evacuación de excedencia. Utilizando un extenso registro de datos de potencia diaria generada (datos desde el año 2004 hasta la actualidad) provisto por EPEC – Empresa Provincial de Energía de Córdoba-, se procedió a realizar una estimación de caudal utilizando dicha información. En la Figura 73 se contrastó los caudales estimados (utilizando los datos de potencia y asumiendo una eficiencia del 85%) y los caudales medidos en la sección emplazada en el Balneario de la ciudad de Río Tercero. 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 (siempre que no esté en funcionamiento el vertedero del embalse Piedras Moras), se puede estimar el caudal escurrido utilizando los datos de potencia. Además se contrastaron los caudales erogados por vertedero con los medidos en la localidad de Villa Ascasubi durante el evento de crecida registrado en los meses de febrero, marzo y abril del año 2014, mostrándose también una buena correspondencia (Figura 74).

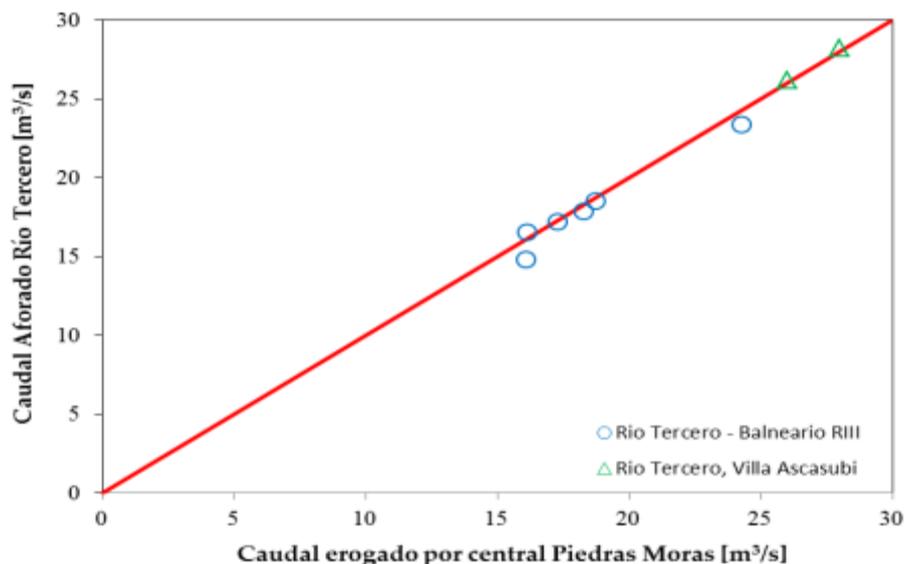


Figura 73: Contraste entre los caudales estimados mediante de datos de potencia generada por la central Piedras Moras y los caudales medidos en las sección emplazadas en el Balneario de la ciudad de río Tercero y Villa Ascasubi.

CAPÍTULO IV – RESULTADOS DE LA CUANTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN
HIDRODINÁMICA DEL FLUJO

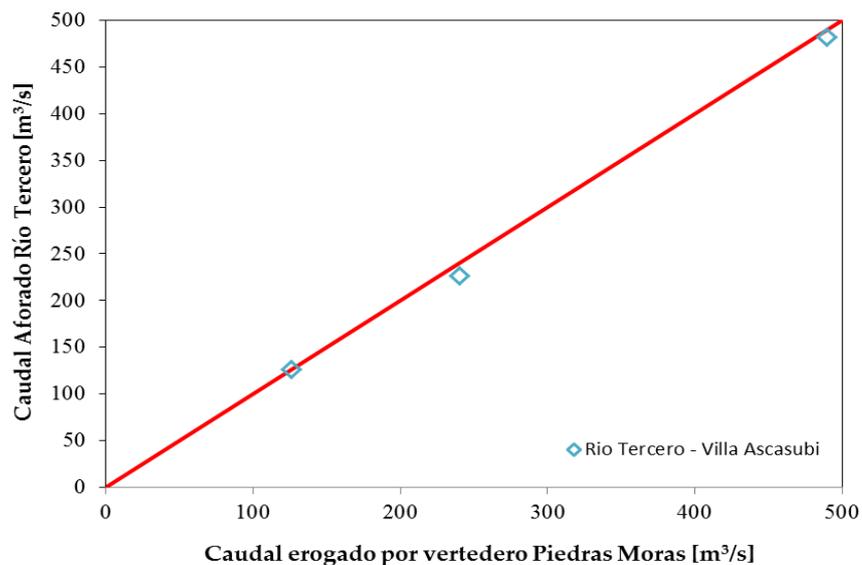


Figura 74: Contraste entre los caudales erogados por el vertedero del Dique Piedras Moras y los caudales medidos en la localidad de Villa Ascasubi.

A medida que el río Tercero (Ctalamochita) avanza en su recorrido, la influencia de los eventos hidrometeorológicos es cada vez más importante, mostrando una mayor variabilidad en los caudales aforados en épocas húmedas. La Figura 75 muestra la contribución de los principales tributarios al río Carcarañá en la confluencia de los ríos Tercero (Ctalamochita) y Saladillo. En épocas de estiaje (campañas 6, 8, 9, 10, 11, 12, 17, 18,19 y 20) se observa la inexistencia de aportes significativos en la cuenca del río Tercero (Ctalamochita) por lo cual se puede afirmar que prácticamente el escurrimiento superficial del río en esa época es regulado por el Embalse Piedras Moras (Figura 75). Con respecto al caudal del río Saladillo, se puede decir que el mismo presenta una variación estacional importante, debido a que no está regulado (El río Cuarto – Saladillo, es uno de los sistemas fluviales que no están regulados en la Provincia de Córdoba)

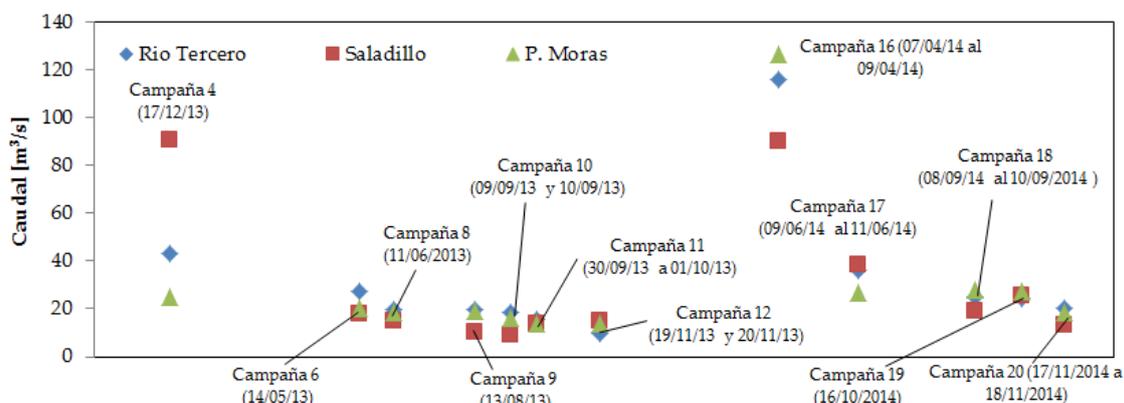


Figura 75: Evolución del caudal de los ríos Tercero (Ctalamochita) y Saladillo en la confluencia.

Los períodos lluviosos también presentan una influencia importante en el caudal escurrido por el arroyo Tortugas, sobre todo con eventos observados en la región noreste de la provincia al sur de la localidad de San Francisco. Este curso de agua puede aportar, al río Carcarañá, caudales de igual o mayor magnitud que sus otros principales tributarios (ríos Tercero –Ctalamochita- y Saladillo). En las campañas efectuadas en noviembre de 2013 y Abril de 2014 se observó la gran variación que presenta el caudal del río Carcarañá entre las secciones de Inrville y Cruz Alta, debido al aporte de este arroyo (Figura 76). En época de estiaje se observó una baja variabilidad del caudal del río Carcarañá a lo largo de su recorrido (Figura 76)

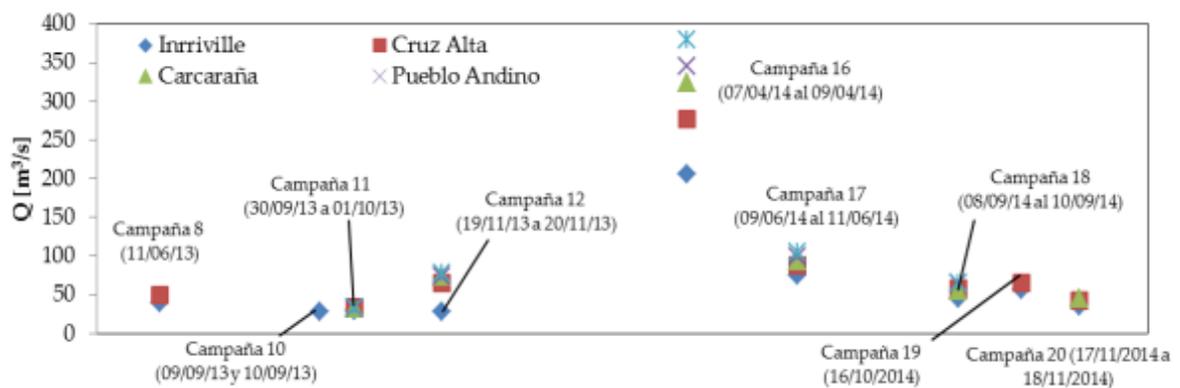


Figura 76: Evolución del caudal del río Carcarañá en diferentes secciones de aforo

4.4. Elaboración de curvas de altura de superficie libre – caudal escurrido

4.4.1 Marco Teórico

Las curvas de altura de superficie libre (H) - caudal escurrido (Q) (Figura 77) permiten, a los organismos a cargo de la gestión de recurso hídrico, sistematizar el monitoreo de los caudales escurridos en un sistema fluvial en tiempo real, a través del monitoreo de una variable más sencilla para determinar experimentalmente como es la altura de superficie libre. Si estas curvas H-Q no cambian en el tiempo en una determinada sección de monitoreo, se dice que esta es una sección de control permanente. Por otro lado, la erosión o deposición de sedimentos en la sección de monitoreo, pueden generar variaciones temporales del lecho y por lo tanto producir alteraciones en las curvas. Las secciones de monitoreo en cursos fluviales con lecho rocoso o secciones que incluyan vertedero, por ejemplo construidos en hormigón, pueden ser aunque no siempre, secciones de control permanentes.

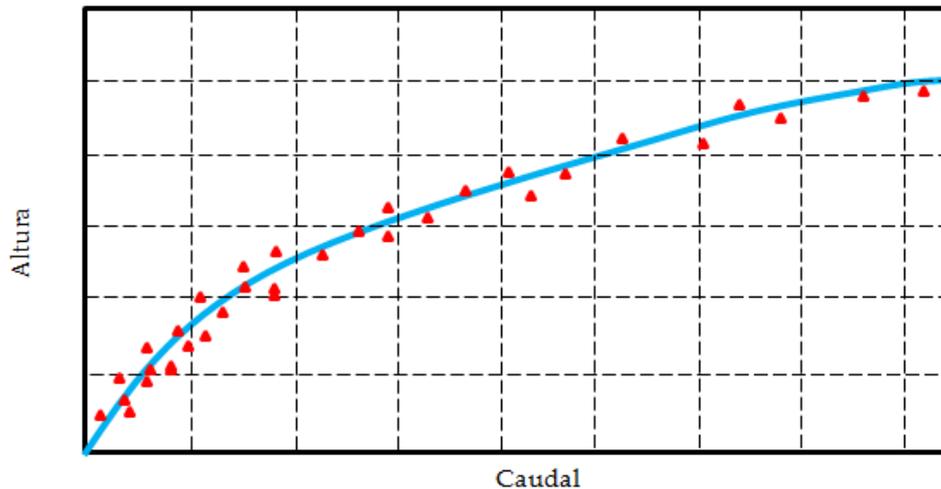


Figura 77: Esquema típico de una curva altura de superficie libre (H) –caudal (Q)

Para la construcción de la curva H-Q se debe tener en cuenta que la sección seleccionada debe cumplir una serie de requisitos que garantizarán la validez de la curva en el tiempo, los mismos son: (a) Estabilidad en el tiempo (procesos de erosión o deposición despreciables). (b) Encontrarse en un tramo que no presente efectos significativos de curvas de remanso (c) Cauce limpio y libre de obstáculos (se debe asegurar que la sección quede libre de elementos que modifique la rugosidad del lecho con la que fue calibrada la curva) y (d) Accesibilidad y comodidad para tomar lectura en la escala y hacer los aforos necesarios cuando sea requerido.

La construcción de las curvas H-Q se puede realizar mediante:

- Aforos directos: Es el método tradicional y consiste en realizar numerosas mediciones de caudal en una sección determinada de un curso fluvial para un amplio rango de valores de alturas de superficie libre utilizando alguna técnica de aforo disponible (por ejemplo ADCP, Molinete, Velocimetría por imágenes de partículas a gran escala – LS-PIV-) y relacionarlas con la altura de superficie libre existente al momento de realizar la medición. A partir de esta información, se realiza un ajuste estadístico de distintas expresiones matemáticas. Las expresiones obtenidas del ajuste estadístico son solo válidas en el rango de valores de H y Q incluidos en la calibración. Tradicionalmente las técnicas de velocimetría tradicionales, como por ejemplo molinetes, presentan falencias en el monitoreo de caudales durante crecidas debido al riesgo para el operario asociado a su implementación, por lo que no se

disponen de datos de H-Q registrados en condiciones de aguas altas por lo que se reduce el rango de condiciones de flujo donde es apropiado utilizar estas curvas. Actualmente, esta desventaja está superada gracias a la implementación del ADCP y LS-PIV. La principal ventaja de este método para construir curvas H-Q es la sencillez en su determinación. Como desventaja de esta metodología se puede decir que la misma insume mucho tiempo para la construcción de la curva, ya que se deben registrar valores de H y Q en diversas condiciones de flujo a lo largo de periodos de aguas bajas, medias y altas año para que la curva obtenida sea representativa.

- Ecuaciones empíricas: Existen ecuaciones empíricas que relacionan las profundidades de flujo y los caudales escurridos en una determinada sección natural de un curso fluvial (por ejemplo la ecuación de Manning) y para escurrimientos en estructuras de control (por ejemplo en vertederos). Estas ecuaciones incluyen parámetros que pueden ser determinados a priori a partir de ábacos existentes o partir de la calibración de esas relaciones utilizando datos obtenidos en campañas de aforo.
- Simulaciones Numéricas: Debido al desarrollo de los modelos numéricos y del incremento de la capacidad de cálculo de las computadoras disponibles, en la actualidad es posible construir curvas altura de superficie libre - caudal mediante simulaciones numéricas del flujo en cursos fluviales y estructuras de control para distintas condiciones de escurrimiento (aguas altas, medias y bajas). En la implementación de esta metodología se requiere realizar algunos aforos con el objeto de calibrar y validar el modelo. Esta metodología permite ahorrar una gran cantidad de tiempo pero su principal desventaja se manifiesta en secciones donde se presentan condiciones de flujos complejas (con características bi y tridimensionales) por lo que requiere modelos numéricos complejos que requieren mayor resolución y tiempos de cálculo.

A continuación se presentan los valores experimentales registrados de altura de superficie libre-caudal escurrido para distintas secciones de los principales tributarios de la cuenca del río Carcarañá. Luego se detallan los ajustes estadísticos de las curvas H-Q para las distintas secciones.

4.4.2 *Valores experimentales de altura de superficie libre-caudal escurrido para distintas secciones de los principales tributarios de la cuenca del río Carcarañá.*

En las figuras, que se presentan a continuación, se incluyen los valores de superficie libre-caudal escurrido (H-Q) relevados durante las campañas de medición para las secciones: Puente de ingreso a Villa Ascasubi, Puente Alberdi (Villa María), Puente Sarmiento (Bell Ville), Puente Sturla (Bell Ville), Azud San Marcos, Cruz Alta, Pueblo Andino y arroyo Tortugas.

Los valores que se muestran a continuación incluyen valores extremos de H-Q registrados en condiciones de crecidas presentes durante los meses de febrero, marzo y abril de 2014 los cuales son muy útiles al momento de calibrar las curvas de altura-caudal en un amplio rango.

4.4.2.1 *Valores de superficie libre en función del caudal del río Tercero (Ctalamochita) en el puente de ingreso a la localidad de Villa Ascasubi.*

En la Figura 78 se grafican los valores observados de altura de superficie libre en función del caudal escurrido para el río Tercero (Ctalamochita) en el puente de ingreso a la localidad de Villa Ascasubi junto a la escala existente en dicho puente sobre la cual se tomaron las lecturas de nivel. Los valores extremos máximos y mínimos de altura de superficie libre relevados en esta sección son 3,73m (27/02/2014) y 0,20m (17/11/2014), respectivamente.

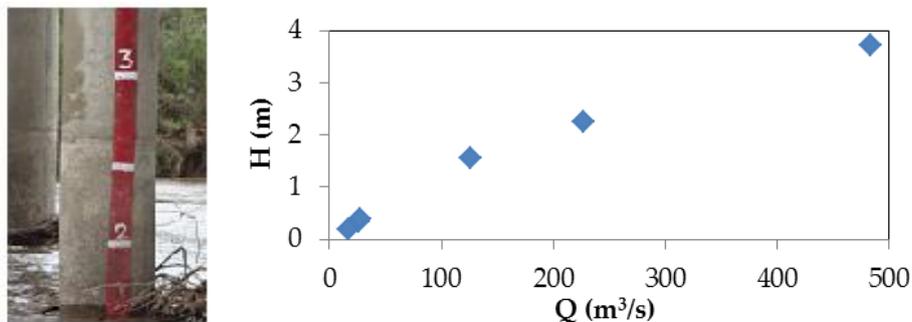


Figura 78: Valores observados de alturas de superficie libre (H) en función del caudal escurrido (Q) para el río Tercero (Ctalamochita) en el puente de ingreso a la localidad de Villa Ascasubi. Los niveles de superficie libre están referenciados a la escala existente en una de las pilas del puente. (ver imagen de la izquierda)

4.4.2.2 *Valores de superficie libre en función del caudal en el puente Alberdi de la localidad de Villa María.*

Esta sección de aforo, donde se relevaron los niveles de superficie libre en función del caudal, se encuentra en el área central del ejido urbano de la ciudad de Villa María. La escala existente en dicha sección es utilizada por los bomberos y organismos municipales y provinciales de defensa civil para monitorear la evolución de los niveles en el río. Durante el evento de crecida registrado en febrero, marzo y abril de 2014, los niveles del río reportados por

los medios de comunicación de esta ciudad y de la provincia corresponden a esta sección. En la Figura 79 se muestran los valores observados junto a la escala existente donde están referenciados los niveles de superficie libre. Los valores extremos máximos y mínimos de altura de superficie libre relevados en esta sección son 3,4m (27/02/2014) y -0,13m (19/11/2013), respectivamente.

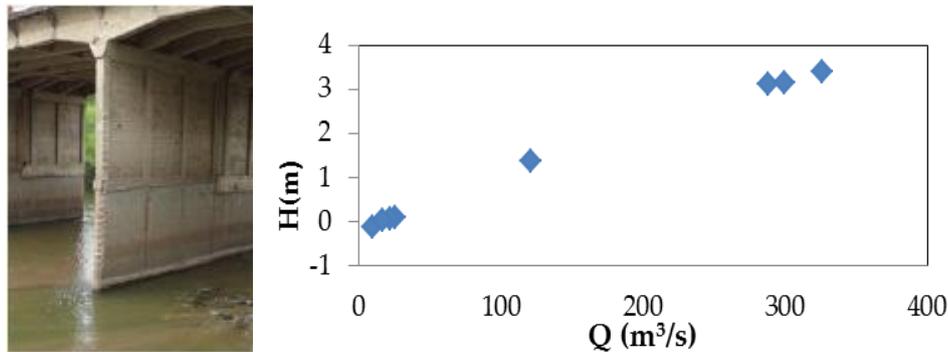


Figura 79: Valores observados de altura de superficie libre (H) en función del caudal (Q) del río Tercero (Ctalamochita) en el Puente Alberdi de Villa María. Los niveles de superficie libre están referenciados a la escala existente en una de las pilas del puente. (ver imagen de la izquierda)

4.4.2.3 Valores de superficie libre en función del caudal en el Puente Sarmiento Bell Ville

El puente Sarmiento se encuentra ubicado en el área central del ejido urbano 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 se referenció los niveles respecto al tablero del puente y luego, una vez que las condiciones de flujo lo permitieron, se referenció el nivel de superficie libre con respecto a la escala. En la Figura 80 se muestran las alturas de superficie libre en función del caudal escurrido junto a una fotografía que ilustra la escala existente en esa sección. Los valores extremos máximos y mínimos de altura de superficie libre relevados en esta sección son 8,20m (05/03/2014) y 1,70m (18/11/2014), respectivamente.

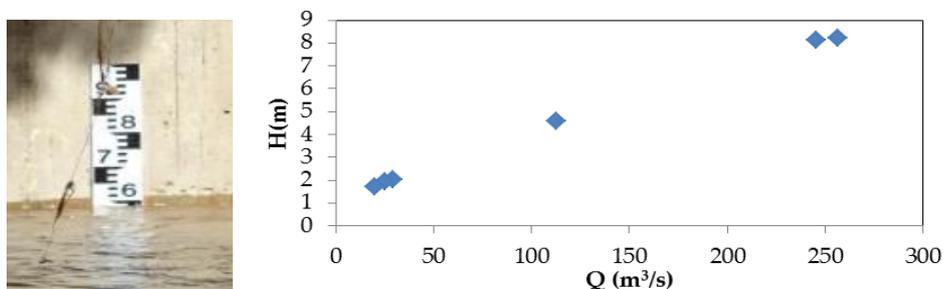


Figura 80: Valores observados de altura de superficie libre (H) en función del caudal (Q) para el río Tercero (Ctalamochita) en el puente Sarmiento de la localidad de Bell Ville. Los niveles de superficie libre están referenciados a la escala existente en estribo de margen derecha del puente. (ver imagen de la izquierda)

4.4.2.4 *Valores de superficie libre en función del caudal en el Puente Sturla, Bell Ville*

El puente Sturla es el último puente dentro del ejido urbano de la ciudad de Bell Ville y posee una escala que es utilizada por las autoridades municipales y provinciales de defensa civil para monitorear los niveles del río. Durante el evento de crecida de los meses de febrero, marzo y abril de 2014, los niveles reportados por los medios periodísticos locales y provinciales corresponden a esta escala. En la Figura 81 se muestran las alturas de superficie libre en función del caudal relevados durante las campañas de aforo en esa sección. Los valores extremos máximos y mínimos de altura de superficie libre relevados en esta sección son 9,78m (05/03/2014) y 2,95m (18/11/2014), respectivamente.

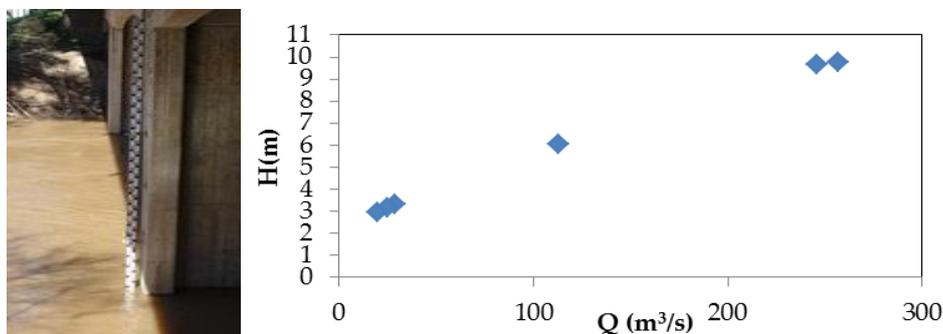


Figura 81: Valores observados de altura de superficie libre (H) en función del caudal(Q) del río Tercero(Ctalamochita) en el puente Surla de la localidad de Bell Ville. Los niveles de superficie libre están referenciados a la escala existente en una de las pilas del puente. (ver imagen de la izquierda)

4.4.2.5 *Valores de superficie libre en función del caudal en el Azud San Marcos*

El azud San Marcos, ubicado en la localidad homónima, se utiliza para elevar el nivel de superficie libre necesario para la toma de agua que abastece a una amplia región del sudeste provincial. En la Figura 82 se muestran los valores de altura de superficie libre en función del caudal junto a la escala existente. Es importante aclarar que el río, desde Bell Ville hasta el azud, no presenta variaciones significativas de caudal. Es por ello que en las campañas que no ha sido posible aforar en el azud, se han relacionado los caudales relevados en Bell Ville con los niveles de superficie libre observados en la escala existente en el azud. Los valores extremos máximos y mínimos de altura de superficie libre relevados en esta sección son 3,16m (03/05/2014) y 0,27m (17/12/2013), respectivamente.

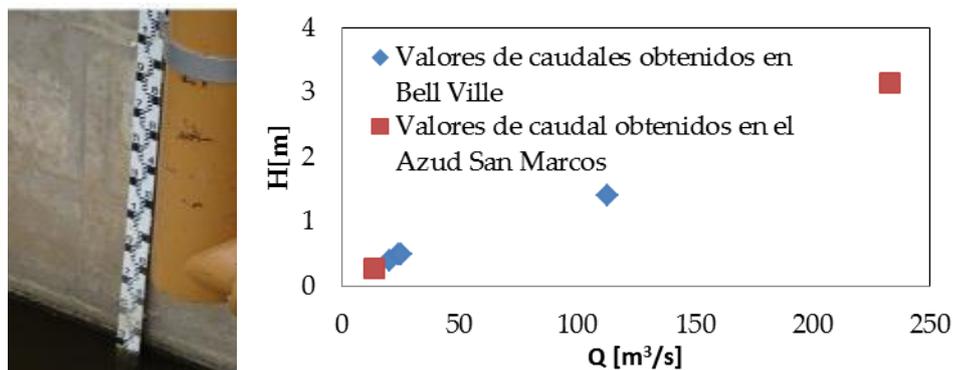


Figura 82: Valores observados de altura de superficie libre (H) en función del caudal(Q) del río Tercero (Ctalamochita) en el Azud San Marcos. Los niveles de superficie libre están referenciados a la escala existente en la margen izquierda del canal de aproximación del azud. (ver imagen de la izquierda).

4.4.2.6 Valores de superficie libre en función del caudal del río Carcarañá en la sección 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 esta sección radica, en que por ella escurren los caudales que la Provincia de Córdoba entrega a su vecina Santa Fe. Actualmente, se está gestionando junto a autoridades de la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba, la instalación en esa sección de una estación limnimétrica automática para el monitoreo continuo de alturas de superficie libre, los cuales podrán ser convertidos a caudal a través de una curva altura de superficie-libre caudal. En la Figura 83 se muestran los valores de altura de superficie libre en función del caudal relevados en las campañas de aforo y una fotografía donde se muestra la escala existente. Los valores extremos máximos y mínimos de altura de superficie libre relevados en esta sección son 3,76m (08/04/2014) y 0,56m (30/09/2013), respectivamente.

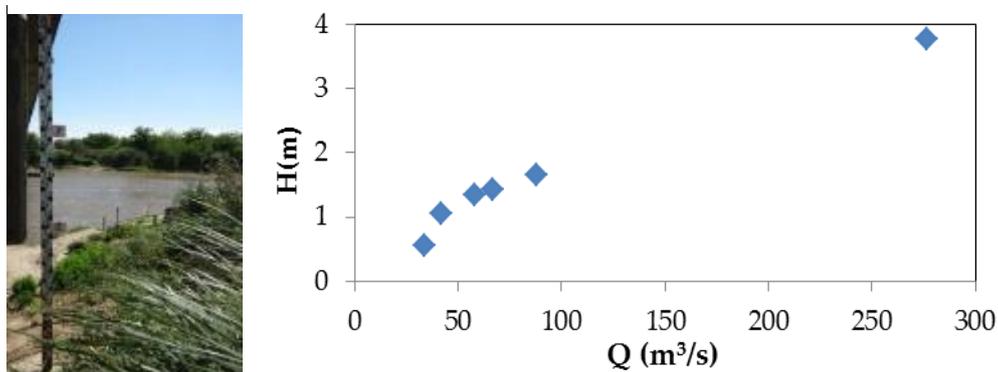


Figura 83: Valores observados de altura de superficie libre (H) en función del caudal del río Carcarañá en el puente Ruta 15 en las cercanías de Cruz Alta. Los niveles de superficie libre están referenciados a escalas existente en esa sección (ver imagen de la izquierda).

4.4.2.7 *Valores de superficie libre en función del caudal del río Caracarañá en la sección ubicada en la localidad de Pueblo Andino – Santa Fe*

La sección de aforo de Pueblo Andino tiene la característica de ser la sección utilizada por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SSRH) para realizar aforos periódicos y publicarlos en la base de datos integrados del organismo. La importancia de aforar esta sección radica en que será posible contrastar las observaciones realizadas en este estudio con los datos publicados por la SSRH (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación). En la *Figura 84* se muestran los valores de nivel de superficie libre en función del caudal relevados en este estudio y una fotografía donde se muestra la escala existente. Los valores extremos máximos y mínimos de altura de superficie libre relevados en esta sección son 4,42m (09/04/2014) y 0,53m (01/10/2013), respectivamente.

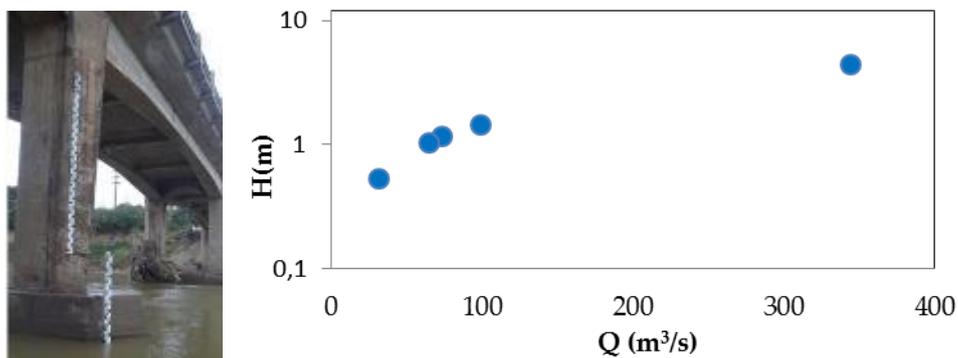


Figura 84: Valores observados de altura de superficie libre (H) en función del caudal (Q) del río Caracarañá en la localidad de Pueblo Andino. Los niveles de superficie libre están referenciados a la escala existente en una de las pilas del puente. (ver imagen de la izquierda)

4.4.2.8 *Valores de superficie libre en función del caudal del arroyo Tortugas en la sección ubicada sobre el puente de la ruta nacional 9.*

En la *Figura 85* se muestra los valores de altura de superficie libre en función del caudal del arroyo Tortugas en la sección ubicada sobre la ruta nacional 9 en el puente de ingreso a la localidad homónima. Este arroyo cuenta con registro de niveles efectuado por la SSRH desde el año 1943 hasta el año 1954. Dado que en la actualidad en esta sección no existe escala, se referenciaron los niveles 4,50 m debajo de la viga de puente (ver *Figura 85*). Los valores extremos máximos y mínimos de altura de superficie libre relevados en esta sección son 2,45m (09/04/2014) y 0,25m (10/09/2014), respectivamente.

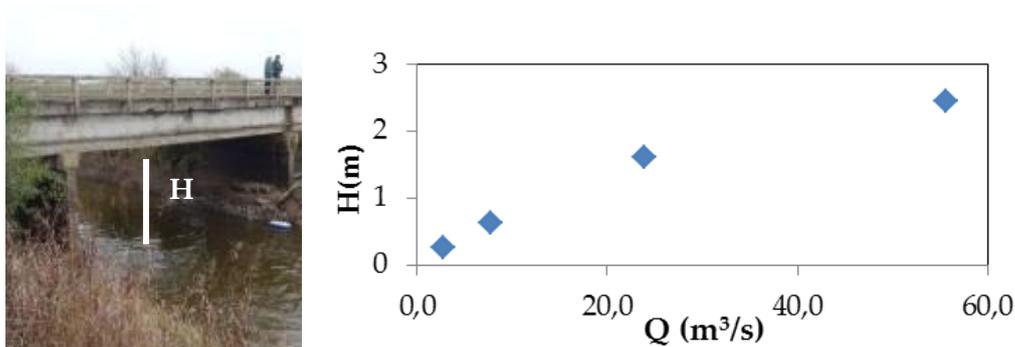


Figura 85: Valores observados de altura de superficie libre (H) en función del caudal (Q) del arroyo Tortugas en el puente de la ruta nacional 9. Los niveles de superficie libre están referenciados a un nivel localizado 4,5 metros por debajo del nivel inferior de la viga del puente. (ver imagen de la izquierda)

4.4.3 Ajustes estadísticos de relaciones empíricas entre los valores de altura de superficie libre - caudal escurrido.

Previo a realizar el ajuste estadístico, en primera instancia, se evaluó la representatividad de las observaciones realizadas en este estudio de las condiciones de flujo existentes en el sistema fluvial estudiado. Para ello se contrastaron los caudales aforados en la sección de Pueblo Andino, Santa Fe, con los resultados de los aforos periódicos realizados en esa misma sección por la SSRH (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación) en el periodo 1983-2014 y publicados en la base de datos integrada de ese organismo (www.hidricosargentina.gov.ar) (Figura 86).

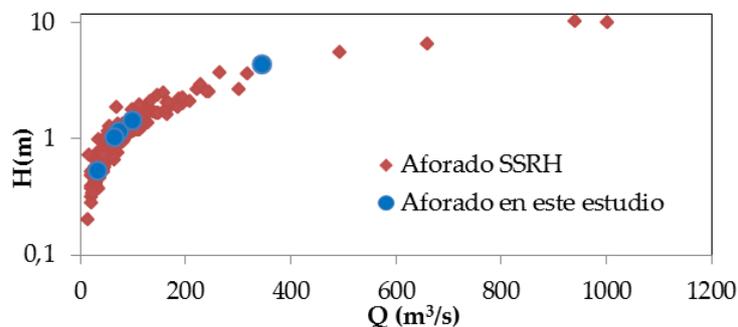


Figura 86: Contraste de los valores de altura de superficie libre (H) en función del caudal (Q) registrados en la sección de Pueblo Andino – Santa Fe para esta tesis y por la SSRH.

Del contraste presentado en esta figura, se puede observar que los valores registrados para esta tesis representan satisfactoriamente el comportamiento medio de la curva, con una menor dispersión de los valores registrados, ya que se utilizó una moderna técnica de medición como lo es el ADCP, con incertidumbres relativas menores a las técnicas convencionales (molinetes) utilizadas por la SSRH. Además, se destaca de este contraste la representatividad del rango de condiciones de flujo relevadas, en el periodo de

CAPÍTULO IV – RESULTADOS DE LA CUANTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN
HIDRODINÁMICA DEL FLUJO

observaciones incluido en este estudio, ya que fue posible aforar el quinto valor más alto de la serie histórica de más de 30 años de registros (Figura 86).

Una vez que se ha validado que los valores, observados de altura de superficie libre (H) y caudal (Q), son representativos de un amplio rango de condiciones de flujo, se procedió a desarrollar interpoladores mediante el ajuste estadístico de esos valores mediante ecuaciones matemáticas (con fundamento hidráulico) del tipo:

$$Q = \alpha (H - H_{Q0})^\beta = \alpha \Delta H^\beta \quad (1)$$

Donde α y β 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 87). 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.

En la Tabla 4 se muestran los parámetros de la ecuación 1, ajustados estadísticamente en una primera aproximación para las curvas altura-caudal de las distintas secciones, considerando que H_{Q0} es nulo (se asume así que el nivel de referencia coincide con el nivel de caudal cero), utilizando únicamente como variable independiente el valor de nivel observado en la escala durante la medición de caudal.

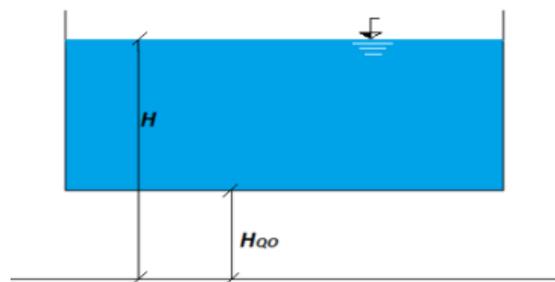


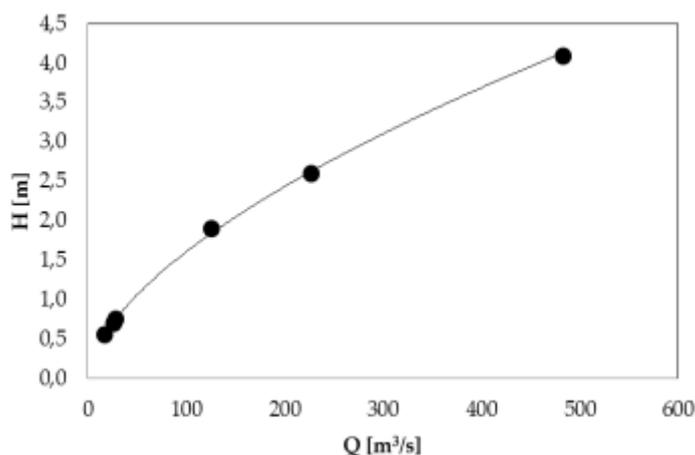
Figura 87: Esquema de un canal rectangular donde se representa al nivel de superficie libre registrado respecto a un nivel de referencia arbitrario (H) y el nivel caudal nulo (H_{Q0})

Tabla 4: Parámetros calibrados de las curvas altura-caudal en diferentes secciones del sistema fluvial del río Carcarañá considerando H_{Q0} es nulo

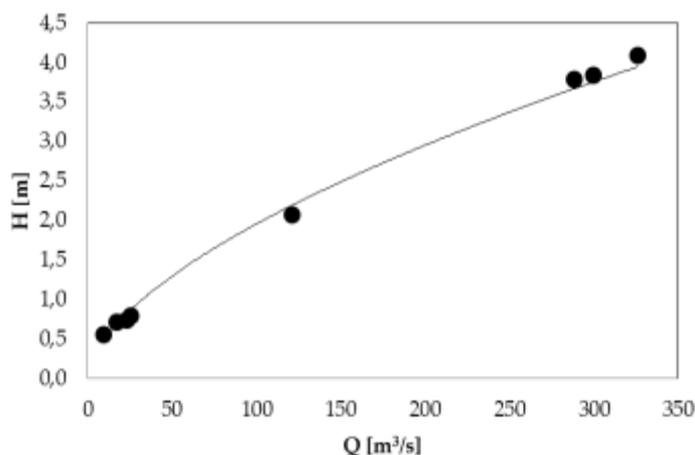
Sección	α	β
Río Tercero (Ctalamochita) – Villa Ascasubi	90,5	1,15
Río Tercero (Ctalamochita) – Puente Alberdi - Villa María	135,5	0,59
Río Tercero (Ctalamochita) – Puente Sarmiento – Bell Ville	8,9	1,61
Río Tercero (Ctalamochita) – Puente Sturla – Bell Ville	2,3	2,08
Azud San Marcos	62,1	1,22
Río Carcarañá – Puente Ruta 15 – Cruz Alta	48,9	1,15
Río Carcarañá – Pueblo Andino	64,0	1,13
Arroyo Tortugas – Tortugas	15,3	1,27

CAPÍTULO IV – RESULTADOS DE LA CUANTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DEL FLUJO

En una segunda aproximación, finalmente seleccionada en esta tesis, se procedió a determinar el parámetro H_{Q0} de forma tal que represente un comportamiento hidráulico adecuado, con exponentes del orden de $5/3$ para los caudales relevados en las diferentes secciones de cauces del sistema fluvial analizado y del orden de $3/2$ para las estructuras de control (vertederos). La Figura 88 a Figura 95 muestran los resultados de este ajuste para todas las secciones mientras que la Tabla 5 presenta los parámetros ajustados para las curvas de las distintas secciones.



*Figura 88: Ajuste estadístico de una función de interpolación que relaciona las alturas de superficie libre-caudal para el río Tercero (Ctalamochita) en la sección ubicada en el puente de ingreso a la localidad de Villa Ascasubi. Los valores de nivel están referenciados a la escala existente en una de las pilas del puente.
 $H_{Q0} = -0,36$ m.*



*Figura 89: Ajuste estadístico de una función de interpolación que relaciona las alturas de superficie libre-caudal para el río Tercero (Ctalamochita) en la sección ubicada en el puente Alberdi de la localidad de Villa Maria. Los valores de nivel están referenciados a la escala existente en una de las pilas del puente.
 $H_{Q0} = -0,69$ m.*

CAPÍTULO IV – RESULTADOS DE LA CUANTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN
HIDRODINÁMICA DEL FLUJO

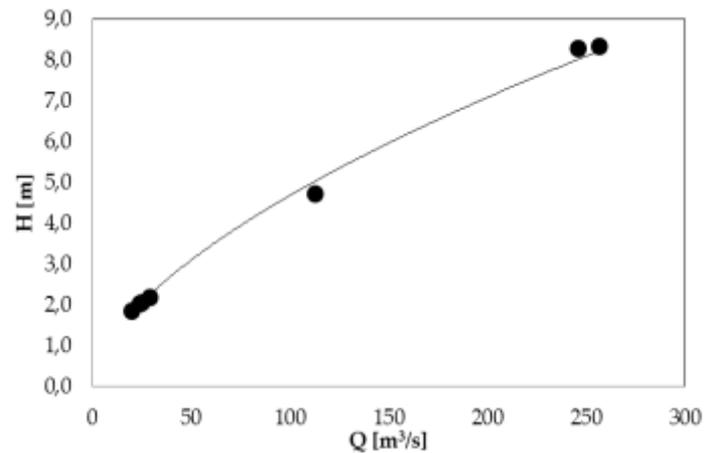


Figura 90: Ajuste estadístico de una función de interpolación que relaciona las alturas de superficie libre-caudal para el río Tercero (Ctalamochita) en la sección ubicada en el puente Sarmiento de la localidad de Bell Ville. Los valores de nivel están referenciados a la escala existente en una de las pilas del puente. $H_{Q0} = -0,14m$.

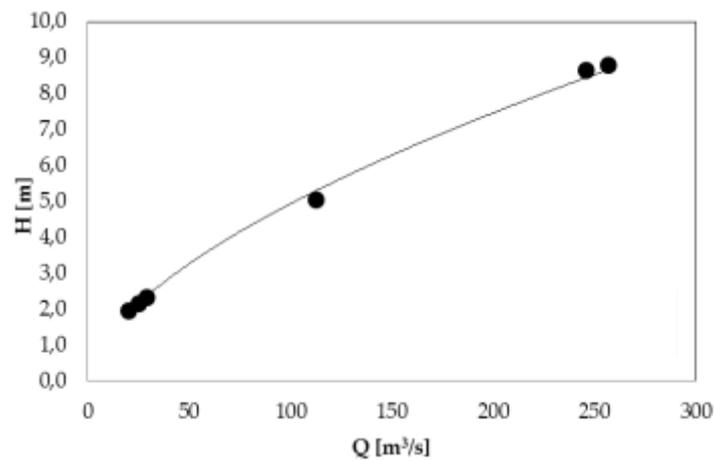


Figura 91: Ajuste estadístico de una función de interpolación que relaciona las alturas de superficie libre-caudal para el río Tercero (Ctalamochita) en la sección ubicada en el puente Sturla de la localidad de Bell Ville. Los valores de nivel están referenciados a la escala existente en una de las pilas de dicho puente. $H_{Q0} = 1,00m$.

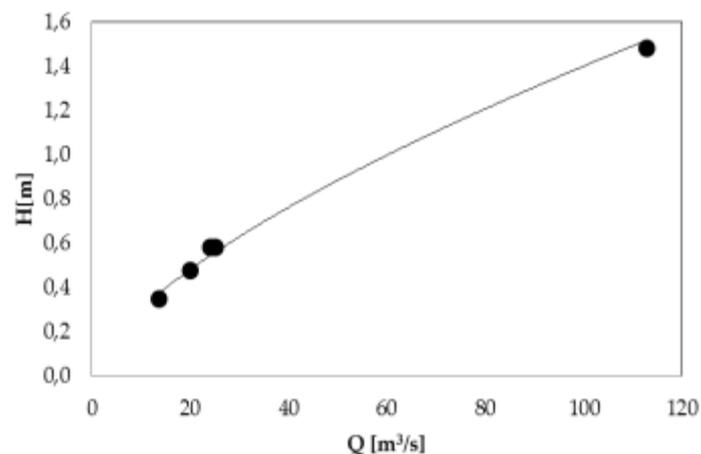


Figura 92: Ajuste estadístico de una función de interpolación que relaciona las alturas de superficie libre-caudal para el río Tercero (Ctalamochita) en el Azud San Marcos de la localidad de San Marcos Sud. Los valores de nivel están referenciados a la escala existente en dicho azud. $H_{Q0} = -0,08 m$.

CAPÍTULO IV – RESULTADOS DE LA CUANTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN
HIDRODINÁMICA DEL FLUJO

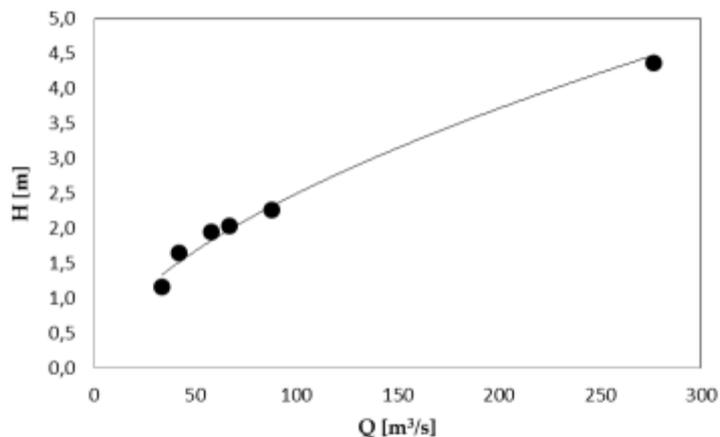


Figura 93: Ajuste estadístico de una función de interpolación que relaciona las alturas de superficie libre-caudal para el río Carcarañá en la sección ubicada en el puente de ruta 15 de la localidad de Cruz Alta. Los valores de nivel están referenciados a la escala existente en una de las pilas de dicho puente. $H_{Q_0} = -0,60$ m.

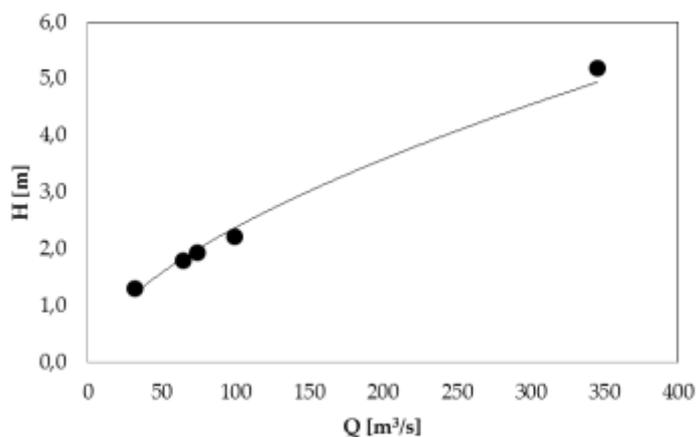


Figura 94: Ajuste estadístico de una función de interpolación que relaciona las alturas de superficie libre-caudal para el río Carcarañá en la sección ubicada en la localidad de Pueblo Andino. Los valores de nivel están referenciados a la escala existente en una de las pilas del puente. $H_{Q_0} = -0,77$ m.

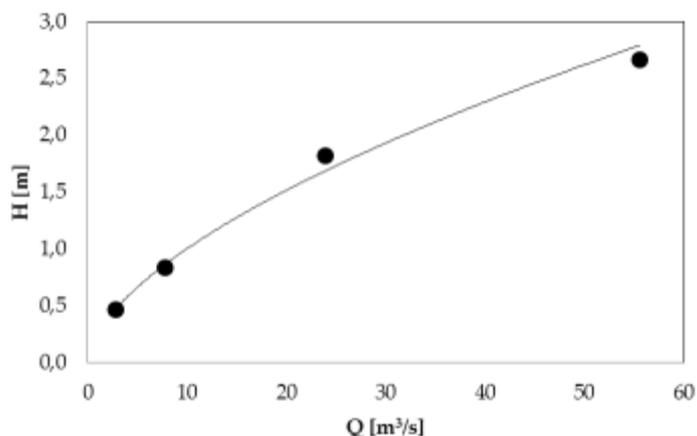


Figura 95: Ajuste estadístico de una función de interpolación que relaciona las alturas de superficie libre-caudal para el arroyo Tortugas en el puente de ingreso a la localidad homónima. Los niveles de superficie libre están referenciados a un nivel localizado 4,5 metros por debajo del nivel inferior de la viga del puente. $H_{Q_0} = -0,22$ m.

CAPÍTULO IV – RESULTADOS DE LA CUANTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN
HIDRODINÁMICA DEL FLUJO

Tabla 5: Parámetros de la ecuación 1 calibrados en diferentes secciones del sistema fluvial del río Carcarañá

Sección	α	β	H_{Q0} (m)
Río Tercero (Ctalamochita) – Villa Ascasubi	45,3	1,67	-0,36
Río Tercero (Ctalamochita) – Puente Alberdi - Villa María	32,4	1,67	-0,69
Río Tercero (Ctalamochita) – Puente Sarmiento – Bell Ville	7,5	1,67	-0,14
Río Tercero (Ctalamochita) – Puente Sturla – Bell Ville	6,9	1,67	1,00
Azud San Marcos	54,7	1,50	-0,08
Río Carcarañá – Puente Ruta 15 – Cruz Alta	21,3	1,68	-0,60
Río Carcarañá – Pueblo Andino	23,3	1,67	-0,77
Arroyo Tortugas – Tortugas	9,9	1,67	-0,22

En la sección del Azud de San Marcos se incluyeron, en el ajuste estadístico, todos los valores observados exceptuando el máximo valor, ya que en ese caso el comportamiento de la estructura de control difería sustancialmente (Figura 96) de las otras condiciones aforadas, puesto que el azud se encontraba completamente ahogado por las condiciones de flujo aguas abajo. En las otras secciones se incluyeron, en el ajuste, todos los valores registrados.



Figura 96: Azud San Marcos (A) caudal 13,56 m³/s (B) caudal 232,75 m³/s. Se puede observar que para el caudal extremo el azud se encuentra ahogado y su funcionamiento hidráulico difiere.

Es para destacar que en el Azud San Marcos el valor de H_{Q0} es solo 0,08m diferente que el obtenido a través de la escala, pudiendo deberse esa variación a errores de nivelación, cuando se emplazaba la escala u otros factores que afectan la relación altura-caudal. Con este valor de H_{Q0} es posible estimar el valor del coeficiente de descarga “C” utilizando la ecuación 2:

$$Q = CL\Delta H^{3/2} \quad (2)$$

$$C = 2,21$$

Donde L representa el ancho del vertedero. Del análisis del valor de C, se observa que el mismo difiere, aproximadamente, un 20 % del valor teórico reportado en la literatura ($C \approx 1,8$). Esta diferencia se debe, por un lado, a que en el valor de ΔH no se ha considerado la altura de velocidad del flujo de aproximación. Si se considera que la altura de velocidad es del 10%, el valor de C obtenido es similar al que se reporta en la bibliografía. Mediante las

CAPÍTULO IV – RESULTADOS DE LA CUANTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DEL FLUJO

mediciones de velocidad de flujo de aproximación efectuada en el azud, se determinó que la altura de velocidad máxima es del orden del 5%, por lo que asumir velocidades de aproximación nula explica solo en parte la diferencia existente. Por otro lado, se observa que para el caudal más bajo aforado en el azud (13,56 m³/s), el nivel de superficie libre coincidía con el nivel superior de las compuertas (Figura 96 (A)), lo que indica que para caudales mayores, el agua escurre por encima de estas, lo cual aumenta el ancho de flujo (L), que interviene en la ecuación 2, en un valor aproximadamente de 3 metros ($L \approx 30\text{m}$). Teniendo en cuenta ambas consideraciones (altura de velocidad del flujo de aproximación y aumento del ancho de flujo) el valor de C obtenido coincide con el valor teórico.

En lo que respecta a las secciones sin estructuras de control, sabiendo que el parámetro de ajuste α se compone del producto de la rugosidad (n de Manning), el ancho y la raíz de la pendiente y conociendo los valores de pendiente (detalladas en el capítulo V) y ancho, se puede despejar el n de Manning, que debería encontrarse dentro de los rangos esperados para cada tipo de sección. Haciendo este análisis para todas las curvas ajustadas se aprecia que:

- En las secciones de Villa Ascasubi y Villa María, el valor del n de Manning despejado del parámetro α , es adecuado para caudales bajos (menores a 126 m³/s) y del orden de 0,025 para ambas secciones. Para caudales mayores, el valor determinado del coeficiente de rugosidad es mayor y del orden de 0,08 en ambos sitios. Esto se debe a que para caudales altos (mayores a 126m³/s), en ambas secciones, el río alcanza las planicies de inundación y se generan zonas de flujo inefectivas, las cuales producen que el valor obtenido de n de Manning sea mayor. Si se contempla dicho efecto, que es función del nivel de superficie libre, y está contemplado dentro del parámetro α , el n de Manning obtenido es de 0,029, considerando un ancho efectivo de 40 m en ambas secciones.
- En las secciones ubicadas en el puente Sarmiento y puente Sturla de la localidad de Bell Ville, el valor obtenido del n de Manning despejado del parámetro α es alto (del orden de 0,07) y muy superior a los estimados para dichas secciones (los valores obtenidos se detallan en el capítulo VII). Esto se debe a que en esta sección, el valor del radio hidráulico (que es el que realmente interviene en la ecuación de Manning) difiere notablemente de la profundidad

CAPÍTULO IV – RESULTADOS DE LA CUANTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DEL FLUJO

media, ya que la relación ancho/profundidad es baja dado que el río se encuentra encajonado. Por lo que el parámetro α está contemplando la diferencia entre considerar a la profundidad media como una aproximación del radio hidráulico.

- En las secciones de Pueblo Andino y Cruz Alta sobre el río Carcarañá, el valor de n de Manning despejado del parámetro α , para ambas secciones, es del orden de 0,04. Se atribuye esta diferencia a que en dichas secciones la pendiente del cauce es muy baja, del orden del 0,01%, lo que produce que la determinación de la misma con imágenes STRM, como lo hizo Ricardi et al (2013), posea errores importantes y de la misma magnitud que la pendiente existente.
- En la sección ubicada del arroyo Tortugas, el valor de n de Manning despejado del parámetro α para todas las condiciones evaluadas es adecuado y del orden de 0,027.

En lo que respecta a los valores de caudal nulo (H_{Q0}) reportados en la Tabla 5 (valores diferentes de cero), observaciones in situ de las secciones mencionadas muestran que los valores de referencia utilizados en estas secciones (generalmente determinados ad hoc por organismos públicos) no están referenciados al nivel de caudal nulo por lo que las magnitudes de H_{Q0} se aproximan las observaciones realizadas. En la Figura 97 se ilustra esta situación para la escala ubicada en el puente Alberdi de la ciudad de Villa María. En esa Figura se puede observar que el “cero” de la escala se encuentra aproximadamente a 0,60 cm del lecho en esa pila siendo ese valor similar al obtenido por ajuste estadístico ($H_{Q0} = -0,69\text{m}$). Este valor de H_{Q0} indica que existen situaciones en donde el flujo escurre con niveles de superficie libre por debajo del cero de la escala. A partir de estas observaciones sería recomendable, desde el punto de vista hidráulico, referenciar las escalas existentes en las distintas secciones, aunque teniendo en cuenta que estas escalas están siendo monitoreadas hace un tiempo y su uso está arraigado en organismos de defensa civil, se recomienda mantener la referencia de la escala existente pero incluir en el interpolador el valor de H_{Q0} ajustado.

CAPÍTULO IV – RESULTADOS DE LA CUANTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DEL FLUJO



Figura 97: Escala ubicada en el puente Alberdi de Villa Maria. Se puede observar que el “cero” de la escala se encuentra aproximadamente a 60 cm del lecho en esa pila, lo cual indica que existen situaciones en donde el flujo escurre con niveles de superficie libre por debajo del cero de la escala.

A continuación se detallan una serie de consideraciones generales, que se deben tener en cuenta al utilizar los interpoladores con fundamento hidráulico (curvas H-Q), obtenidas a través de los ajustes estadísticos de los valores de altura de superficie libre- caudal escurrido. Las mismas son:

- Las curvas altura-caudal calibradas (al ser interpoladores) deben ser utilizadas únicamente para representar condiciones de flujo que se encuentren en el rango de niveles registrados. En las secciones 4.4.2.1 al 4.4.2.8 se detallan los rangos relevados de valores de alturas de superficie libre para las distintas secciones. Extrapolarlas a condiciones que no se encuentren en ese rango puede conducir a errores importantes.
- La validez de las curvas altura de superficie libre-caudal, en cauces fluviales, dependerá de cuán estable sea la sección en el tiempo. Esta problemática no está presente en estructuras de control.
- Mediante el monitoreo de un evento extraordinario de crecida, ocurrido en el sistema de estudio, fue posible caracterizar, para las diferentes secciones, condiciones de flujo extremas. Las ecuaciones empíricas derivadas del ajuste estadístico de estos datos permitirá estimar, con baja incertidumbre, caudales escurridos en crecidas sin tener que realizar una extrapolación en base a datos de caudales ordinarios.

4.4.4 Reconstrucción de los hidrogramas generados durante un evento de crecida extraordinario

A partir de los registros de nivel realizados en diferentes secciones de la cuenca y mediante las curvas altura-caudal ajustadas en cada una de ellas, se procedió a determinar los hidrogramas de crecida en las localidades de Villa María, Bell Ville y San Marcos Sud, los cuales se muestran en la Figura 98. En

CAPÍTULO IV – RESULTADOS DE LA CUANTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DEL FLUJO

esta figura además se grafica el hidrograma generado por la erogación de caudales del vertedero del Dique Piedras Moras y la precipitación media areal semanal de la cuenca alta del río Tercero (Ctalamochita), la cual fue el evento hidrológico generador de la crecida registrada en la cuenca.

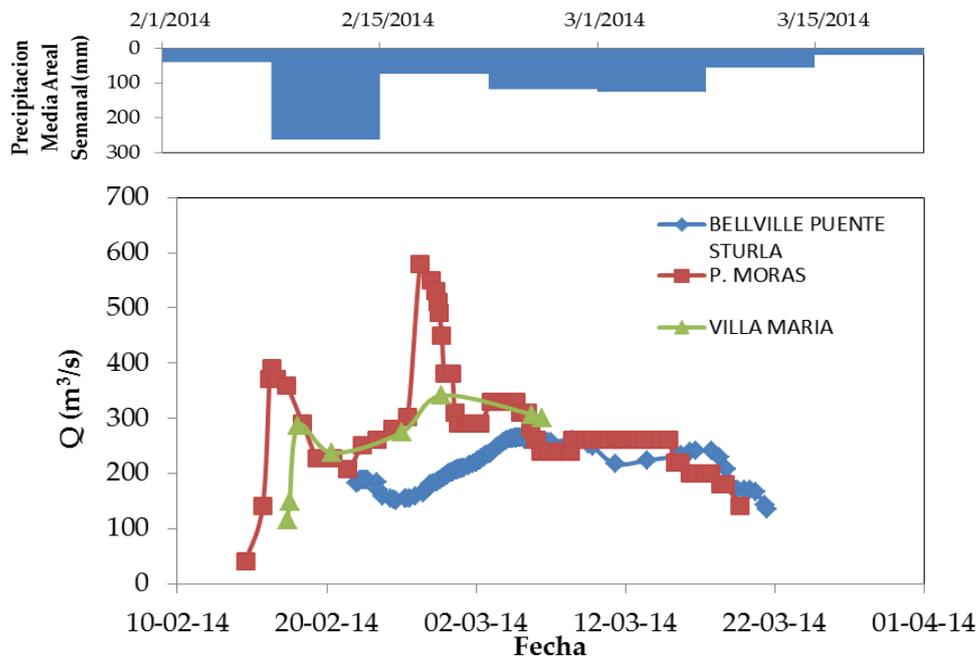


Figura 98: Hidrogramas de crecida del río Tercero (Ctalamochita) en Piedras Moras, Villa Maria y Bell Ville.

Mediante los hidrogramas se pudo conocer la respuesta hidrológica de la cuenca del río Tercero (Ctalamochita). El hidrograma del Dique Piedras Moras muestra que el primer pico de crecida (16/02/2014) se generó por una precipitación media areal semanal en la cuenca alta de 262 mm, la cual se registró en la semana del 08/02/2014 al 14/02/2014. El segundo pico que se observa (26/02/14), de mayor magnitud que el primero, fue generado por un evento de precipitación menor registrada entre las semanas del 15/02/14 al 21/02/14 y 22/02/14 al 01/03/14. En la Figura 98, es posible también observar que a medida que el hidrograma de crecida avanza aguas abajo, este se atenúa no sólo por el tránsito, sino también debido a los desbordes y desvíos que sufre el río, los cuales producen que sea menor el caudal que llega a las diferentes secciones de medición.

A través del análisis de los tiempos al pico, se determinó que el primer pulso de crecida demoró desde el Dique Piedras Moras, 42 horas en llegar a Villa María y 6 días en llegar a Bell Ville. Mientras que el segundo pulso demoró 34 horas en llegar a Villa María y 6,5 días en llegar a Bell Ville.

Mediante la integración de los hidrogramas se obtuvieron los volúmenes escurridos por las diferentes secciones. El dique Piedras Moras entre el 14 de Febrero y 19 de Marzo de 2014 erogó un total de 787 Hm³, valor aproximado a la capacidad de almacenamiento del sistema de embalses localizados aguas arriba. En Bell Ville el volumen escurrido entre 22 de febrero 2014 y 21 de marzo de 2014 fue de 512,63 Hm³.

4.5. Recomendaciones para efectuar un estudio de cuantificación del escurrimiento superficial de un sistema fluvial.

Al finalizar el trabajo experimental desarrollado en este capítulo es posible enunciar recomendaciones a tener en cuenta para trabajos futuros.

- Analizar el sistema de estudio, identificando los principales tributarios del sistema, accidentes geográficos, usos del suelo, etc. Para ello se recomienda utilizar herramientas como Google Earth, imágenes satelitales, cartas IGM, etc.
- Identificar en el sistema de estudio los periodos de estiaje y crecida de forma de determinar fechas posibles para realizar los monitoreos. Se recomienda que las fechas de monitoreo coincidan con la realización de otras campañas de medición en la cuenca, como por ej. campañas de monitoreo de calidad de agua, de manera de poder correlacionar la información.
- Seleccionar secciones de medición. Para ello se debe tener en cuenta los aportes que recibe el sistema junto a todo lo recomendado en el apartado 2.1.3.2. Se sugiere seleccionar secciones cercanas a puentes de manera de poder efectuar mediciones en forma segura en épocas de crecida.
- Efectuar las mediciones en el sistema de estudio considerando las recomendaciones propuestas en el apartado 2.1.3.4. Se aconseja “referenciar” el nivel de superficie libre existente al momento de realizar la medición con algún punto fijo (por ejemplo a la escala existente o a la viga del puente). Dado las características del sistema fluvial de estudio, se propone utilizar un ADCP YSI/SonTek M9, ya que durante las épocas de crecidas, el ADCP YSI/Sontek alcanza su límite de aplicación debido a las altas profundidades y velocidades que presenta el flujo.
- Verificar los resultados obtenidos, mediante la aplicación de alguna ecuación sencilla de la hidráulica de canales (Manning o Chezy) o mediante algún método simple de medición de velocidad utilizando algún trazador, a través del cual, se puede obtener un caudal

CAPÍTULO IV – RESULTADOS DE LA CUANTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DEL FLUJO

aproximado con el objeto de verificar los resultados que se están obteniendo.

- Ajustar curvas altura-caudal en las diferentes secciones de medición. Para ello se recomienda tener en cuenta los requisitos que deben cumplir las secciones desarrollados en el apartado 4.4.1. Al momento de realizar el ajuste, se deben utilizar expresiones que representen adecuadamente el funcionamiento hidráulico en la sección de medición (por ejemplo, utilizar relaciones potenciales con exponente iguales a $5/3$ y $3/2$ para cauces naturales y vertedero, respectivamente).
- En cada campaña de medición se recomienda analizar la evolución del lecho en las secciones donde están calibradas las curvas altura-caudal, para de este modo conocer si el sitio seleccionado es una sección de control.
- Se recomienda seleccionar las secciones de aforo más relevantes y colocar en ellas estaciones limnimétricas automáticas, de forma tal de obtener información temporal de la evolución de caudales con una gran resolución temporal.
- Se recomienda continuar con las campañas de medición. Las campañas de medición requieren un gran esfuerzo y planificación de las tareas que se van a llevar a cabo. A pesar de esto, a través de los monitoreos periódicos, uno puede ir conociendo en más detalle como es el funcionamiento del sistema y cómo evoluciona el mismo espacial y temporalmente.

Capítulo V

**CARACTERIZACIÓN DE PARÁMETROS
COMPLEMENTARIOS RELEVADOS EN CAMPO**

5.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados de la caracterización de parámetros complementarios relevados durante las campañas de monitoreo en el sistema fluvial de estudio. Entre los parámetros caracterizados se incluyen: Parámetros físicos del fluido (Conductividad y Temperatura), granulometría del material del lecho y los coeficientes de rugosidad de Manning en cada tramo analizado. La caracterización de dichos parámetros es útil y en algunos casos necesario al momento de llevar a cabo estudios de transporte de sedimentos, resistencia al flujo, calidad de agua, etc.

5.2. Conductividad

5.2.1 Resultados obtenidos durante las campañas de medición

Durante las campañas se realizaron mediciones de conductividad y temperatura en diferentes secciones aforadas con el objetivo de conocer cómo se dan los procesos de mezcla en los ríos de la cuenca. Los mismos son detallados en la Tabla 6.

Tabla 6: Conductividad y temperatura en diferentes secciones de aforo.

Camp.	Sección Aforo	Fecha	Conductividad [mS/cm]	Temperatura [°C]
6	Río Tercero (Ctalamochita), Confluencia	14/05/2013	1,61	17,6
	Río Saladillo, Confluencia	14/05/2013	6,31	17,2
8	Río Tercero (Ctalamochita), Va. María Puente Ruta 158	11/06/2013	0,23	15
	Río Tercero (Ctalamochita), Confluencia	11/06/2013	1,95	15,6
	Río Saladillo, Puente Ruta 6	11/06/2013	6,9	15,1
	Río Saladillo, Confluencia	11/06/2013	6,98	15,3
	Río Carcarañá, Inrville	11/06/2013	4,24	16
	Río Carcarañá, Cruz Alta	11/06/2013	6,79	16,2
9	Río Tercero (Ctalamochita), Confluencia	13/08/2013	1,82	11,2
	Río Saladillo, Confluencia	13/08/2013	7,45	10,2
	Río Carcarañá (Ctalamochita), Confluencia	13/08/2013	3,65	10,7
10	Río Tercero (Ctalamochita) – Villa Ascasubi	09/09/2013	0,22	15,7
	Río Tercero (Ctalamochita) – Bell Ville	09/09/2013	0,38	20,9
	Río Tercero (Ctalamochita), Va. María Puente Ruta 158	09/09/2013	0,23	19

CAPÍTULO V – CARACTERIZACIÓN DE PARÁMETROS COMPLEMENTARIOS
RELEVADOS EN CAMPO

Camp.	Sección Aforo	Fecha	Conductividad [mS/cm]	Temperatura [°C]
10	Río Tercero (Ctalamochita), Confluencia	10/09/2013	2,2	22
	Río Saladillo, Puente Ruta 6	10/09/2013	7,9	21
	Río Saladillo, Confluencia	10/09/2013	7,8	21
	Río Carcarañá, Inrville	10/09/2013	4,6	22
11	Río Tercero (Ctalamochita), Confluencia	30/09/2013	2,46	14,9
	Río Saladillo, Puente ruta 6 (Monte Buey)	30/09/2013	5,9	13,1
	Río Saladillo, Confluencia	30/09/2013	5,99	13
	Río Carcarañá, Inrville	30/09/2013	4,67	14
	Río Carcarañá, Cruz Alta	30/09/2013	7,11	15,8
12	Río Carcarañá, Parque Sarmiento	30/09/2013	6,95	16,1
	Río Carcarañá, Pueblo Andino	01/10/2013	6,71	15,5
	Río Carcarañá, Puerto Gaboto	01/10/2013	6,47	16,3
	Río Tercero (Ctalamochita) - Villa María, Puente Alberdi	19/11/2013	0,32	22,3
	Río Saladillo - Puente	19/11/2013	7,97	24,8
	Río Tercero (Ctalamochita) - Confluencia	19/11/2013	4,08	-
	Río Saladillo - Confluencia	19/11/2013	8,09	-
	Río Carcarañá - Inrville	19/11/2013	6,17	26,8
	Río Carcarañá - Cruz Alta	19/11/2013	6,5	26,2
	Río Carcarañá - Parque Sarmiento	19/11/2013	5,98	25,4
	Río Carcarañá - Pueblo Andino	20/11/2013	6,02	24,2
	Río Carcarañá- Puerto Gaboto	20/11/2013	5,83	24,9
Arroyo Tortugas - Tortugas	20/11/2013	6,41	27,9	
16	Río Tercero (Ctalamochita) , Villa Ascasubi	07/04/2014	0,09	21,3
	Río Tercero (Ctalamochita) - Puente Alberdi, Villa María	08/04/2014	0,106	20,5
	Río Tercero (Ctalamochita) - Puente Sarmiento, Bell Ville	08/04/2014	0,131	21,8
	Río Tercero (Ctalamochita) - Confluencia	08/04/2014	0,402	22,9
	Río Saladillo - Puente Ruta 6	08/04/2014	3,63	21,5
	Río Carcarañá, Puente ruta 12 (Inrville)	08/04/2014	2,07	22,4
	Río Carcarañá, Cruz Alta	08/04/2014	2,6	22,2
	Río Carcarañá, Pueblo Andino	09/04/2014	2,26	20,9
	Río Carcarañá, Puerto Gaboto	09/04/2014	2,74	21,3
	Arroyo Tortugas, Canal Pcipal.	09/04/2014	2,93	21,3
Arroyo Tortugas, Canal Secundario	09/04/2014	2,93	21,3	
17	Río Tercero (Ctalamochita) , Villa Ascasubi	09/06/2014	0,177	12,8
	Río Tercero (Ctalamochita) - Puente Alberdi, Villa María	10/06/2014	0,178	12
	Río Tercero (Ctalamochita) - Puente Sarmiento, Bell Ville	10/06/2014	0,355	12,1

CAPÍTULO V – CARACTERIZACIÓN DE PARÁMETROS COMPLEMENTARIOS
RELEVADOS EN CAMPO

Camp.	Sección Aforo	Fecha	Conductividad [mS/cm]	Temperatura [°C]
17	Río Tercero (Ctalamochita) - Confluencia	10/06/2014	1,94	12,3
	Río Saladillo - Puente Ruta 6	10/06/2014	7,45	10,5
	Río Carcarañá, Puente ruta 12 (Inriville)	10/06/2014	5,02	11,09
	Río Carcarañá, Cruz Alta	10/06/2014	6,26	12,1
	Río Carcarañá, Puente Ruta 9	10/06/2014	6,07	12
	Río Carcarañá, Pueblo Andino	11/06/2014	6,08	12,3
	Río Carcarañá, Puerto Gaboto	11/06/2014	5,96	12,6
	Arroyo Tortugas, Canal Pcipal	11/06/2014	16,35	15
	Arroyo Tortugas, Canal Secundario	11/06/2014	16,35	15
18	Río Tercero (Ctalamochita) – Villa Ascasubi	08/09/2014	0,19	15,2
	Río Tercero (Ctalamochita) – Puente Alberdi, Villa María	09/09/2014	0,21	18,2
	Río Tercero (Ctalamochita) – Bell Ville	09/09/2014	0,34	18,5
	Río Tercero (Ctalamochita) – Confluencia	09/09/2014	2,10	17,5
	Río Saladillo – Puente Ruta 6	09/09/2014	8,36	17,3
	Río carcarañá – Puente Ruta 12- Inriville	09/09/2014	5,10	17,6
	Río Carcarañá – Cruz Alta	09/09/2014	6,92	17,5
	Río Carcarañá – Puente Ruta 9	09/09/2014	6,30	16,6
	Río Carcarañá – Pueblo Andino	10/09/2014	6,69	17,0
	Río Carcarañá – Puerto Gaboto	10/09/2014	6,31	17,6
	Arroyo Tortugas – Canal Pcipal.	10/09/2014	18,2	17,5

5.2.2 *Análisis de la variabilidad espacial y temporal de la conductividad y temperatura de las masas de agua*

En las campañas N° 8, N°10, N° 11, N° 12, N°16, N°17 y N°18 se pudo estudiar la evolución de la conductividad y la temperatura, y conocer también, las causas que producen dichos cambios.

En la campaña realizada en junio de 2013 (Campaña N°8) se determinó que el Río Tercero (Ctalamochita) experimenta un aumento de conductividad desde Villa María (conductividad de 0,23mS/cm) hasta la confluencia (conductividad de 1,95mS/cm) (Figura 99). Las dos masas de agua (ríos Tercero – Ctalamochita- y Saladillo) están bien mezcladas 11,5km aguas abajo de la confluencia, ya que el valor observado de conductividad en este punto coincide con un promedio ponderado de ambas masas de agua y es uniforme en dirección transversal. Herrero et al. (2013) determinaron que a sólo 500m de la confluencia de los ríos Tercero –Ctalamochita- y Saladillo, se alcanza la mezcla en forma completa tanto en la dirección transversal como en la dirección vertical de ambas masas

CAPÍTULO V – CARACTERIZACIÓN DE PARÁMETROS COMPLEMENTARIOS RELEVADOS EN CAMPO

de agua. La conductividad en el río Carcarañá crece en dirección aguas abajo, desde 4,24 a 6,79 mS/cm, debido a los aportes recibidos (Figura 99).

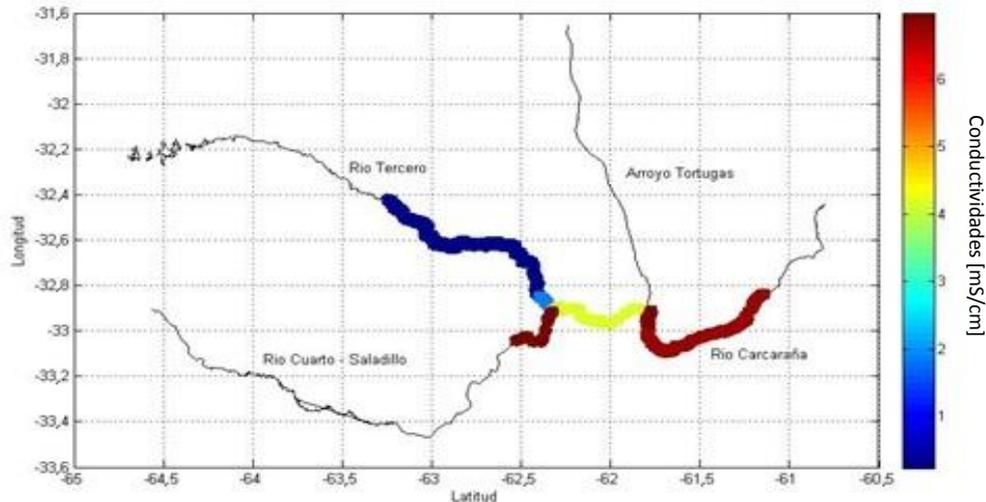


Figura 99: Evolución de la conductividad en [mS/cm] para diferentes tramos de los ríos Tercero (Ctalamochita), Saladillo y Carcarañá durante la campaña del 11/06/2013

En la campaña del 9 y 10 de septiembre de 2013 (Campaña N° 10) se observa, al igual que en la campaña anterior, un aumento de la conductividad del río Tercero (Ctalamochita) desde la ciudad de Villa María (0,23mS/cm) hasta la confluencia (2,20mS/cm) (Figura 100). La conductividad del río Saladillo en la confluencia fue de 7,90 mS/cm, mientras que la del río Carcarañá a la altura de Inrville fue de 4,60 mS/cm, la cual es resultado de la mezcla completa entre los dos ríos (Figura 100). Si se comparan las conductividades con respecto a la campaña anterior se notará que las mismas han aumentado, esto se debe a la disminución de los caudales de los ríos de la cuenca.

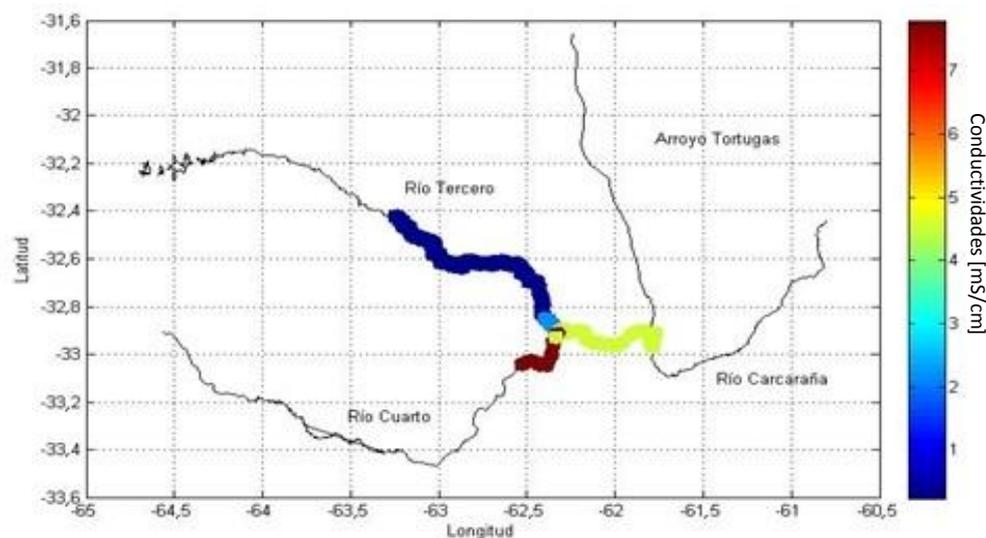


Figura 100: Evolución de la conductividad en [mS/cm] para diferentes tramos de los ríos Tercero (Ctalamochita), Saladillo y Carcarañá durante los días 09 y 10 de septiembre de 2013.

CAPÍTULO V – CARACTERIZACIÓN DE PARÁMETROS COMPLEMENTARIOS RELEVADOS EN CAMPO

En la campaña del 30 de septiembre y 1 de octubre de 2013 (campaña N° 11), el río Tercero (Ctalamochita) experimentó un aumento de conductividad desde la ciudad de Villa María (0,23mS/cm) hasta la confluencia (2,46mS/cm) debido a las descargas existentes (Figura 101). Además, al igual que lo sucedido en las campañas anteriores, los dos cursos (ríos Tercero –Ctalamochita- y Saladillo) se encontraban completamente mezclados 11,5km aguas abajo de la confluencia.

Debido a las lluvias producidas en el sur provincial los días anteriores a realizar la campaña, la conductividad de dicho curso disminuyó en comparación con valores aforados en campañas anteriores. Esto se debe a la disolución de las sales con el aporte pluvial.

Se observa además que la conductividad del río Carcarañá a partir de la sección ubicada en Inrville no varía significativamente (Figura 101).

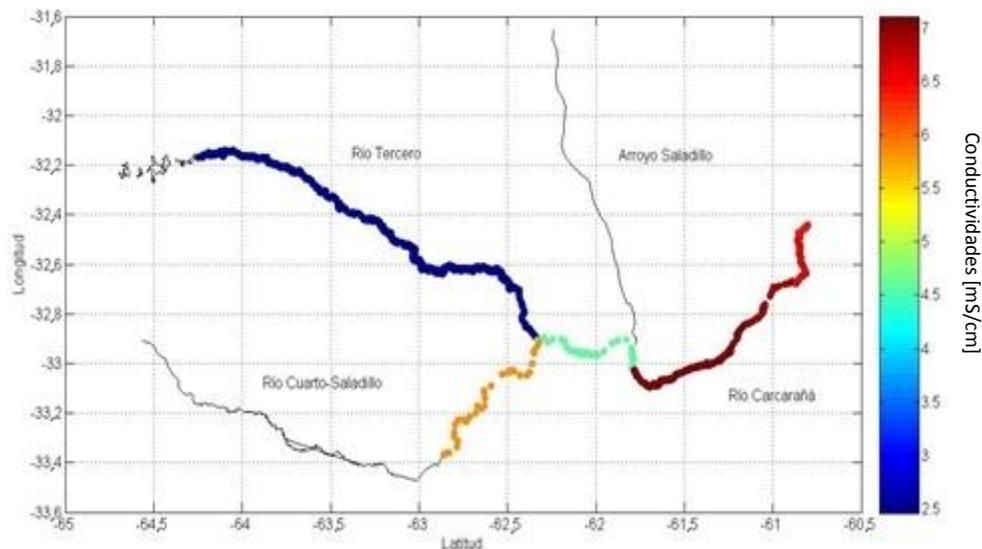


Figura 101: Evolución de la conductividad en [mS/cm] para diferentes tramos de los ríos Tercero (Ctalamochita), Saladillo y Carcarañá durante los días 30 de septiembre y 01 de octubre de 2013.

En la campaña del 19 y 20 de noviembre de 2013 (campaña N°12), se observó que en la confluencia entre los ríos Tercero y Saladillo, este último duplica el valor de conductividad que presenta el primero y es el más alto de todo el sistema fluvial (Figura 102). Esta diferencia se debe a las sales disueltas que acarrea el río Saladillo.

En su nacimiento, el río Carcarañá presenta una conductividad superior a 6mS/cm. Este valor sufre un pequeño incremento al recibir el aporte de sales provenientes del arroyo Tortugas. A partir de este punto y hasta su desembocadura, la conductividad no varía en forma significativa (Figura 102).

CAPÍTULO V – CARACTERIZACIÓN DE PARÁMETROS COMPLEMENTARIOS RELEVADOS EN CAMPO

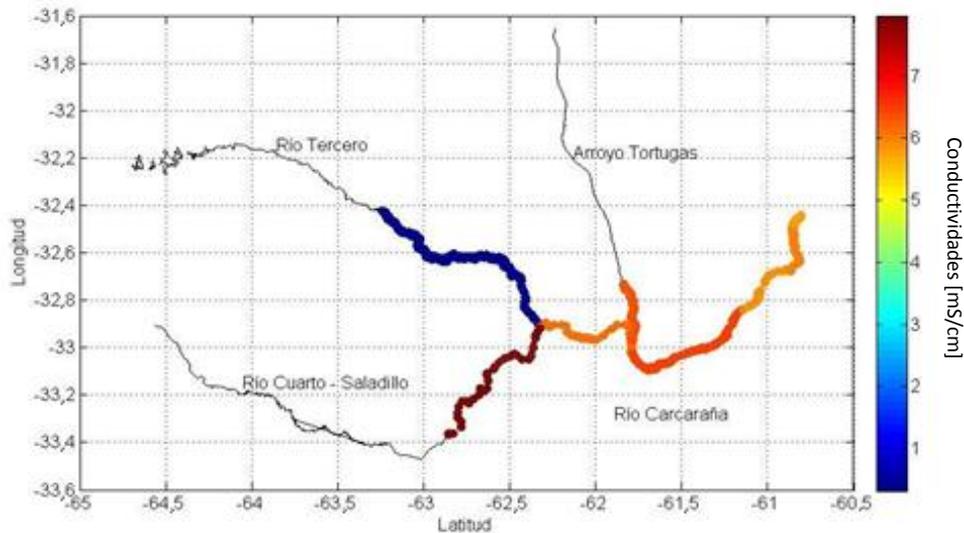


Figura 102: Evolución de la conductividad en [mS/cm] para diferentes tramos de los ríos Tercero (Ctalamochita), Saladillo, Carcaraña y arroyo Tortugas durante los días 19 y 20 de noviembre de 2013.

En la campaña del 07, 08 y 09 de abril de 2014 (Campaña N° 16), debido a que los ríos se encontraban crecidos, las conductividades eran bajas. La conductividad del río Tercero (Ctalamochita) creció de 0,106 mS/cm en Villa María a 0,402 mS/cm en la confluencia con el río Saladillo. En su nacimiento, el río Carcaraña presenta una conductividad a 2,07mS/cm. La conductividad en este rio se ve incrementada por el aporte salino que realiza el río Saladillo cuya conductividad de 3,63 mS/cm es el valor más bajo medido en este rio. En la localidad de Cruz Alta se observa un pequeño incremento de la conductividad debido al aporte de sales provenientes del arroyo Tortugas. A partir de este punto y hasta su desembocadura, la conductividad no varía en forma significativa (Figura 103).

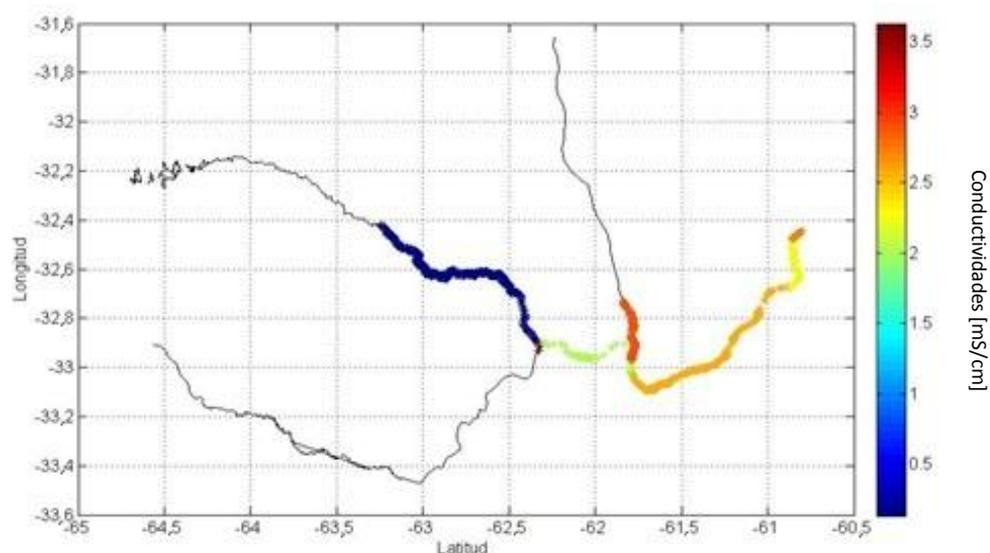


Figura 103: Evolución de la conductividad en [mS/cm] para diferentes tramos de los ríos Tercero (Ctalamochita), Saladillo, Carcaraña y arroyo Tortugas durante los días 08 y 09 de Abril de 2014.

CAPÍTULO V – CARACTERIZACIÓN DE PARÁMETROS COMPLEMENTARIOS RELEVADOS EN CAMPO

En la campaña del 09, 10 y 11 de junio de 2014 (campaña N° 17) se observa, un aumento de la conductividad del río Tercero (Ctalamochita) desde la ciudad de Villa María (0,178mS/cm) hasta la confluencia (1,94mS/cm) (Figura 104). La conductividad del río Saladillo en la confluencia fue de 7,45 mS/cm, mientras que la del Río Carcarañá a la altura de Inrville fue de 5,02 mS/cm, la cual es resultado de la mezcla completa entre los dos ríos (Figura 104). En la localidad de Cruz Alta la conductividad aumenta debido al aporte del arroyo Tortugas el cual al encontrarse en época de estiaje presentaba una conductividad de 16,35 mS/cm. A partir de este punto y hasta su desembocadura, la conductividad no varía en forma significativa (Figura 104).

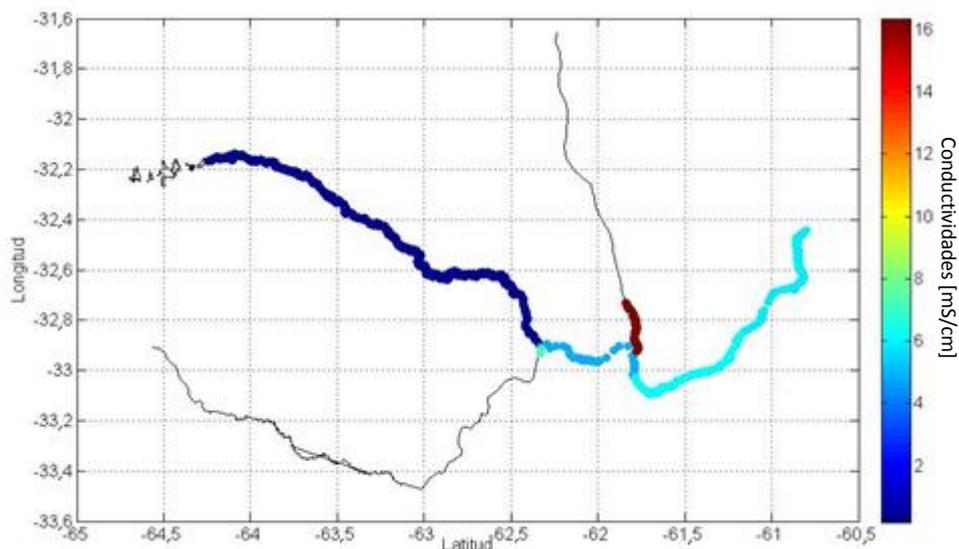


Figura 104: Evolución de la conductividad en [mS/cm] para diferentes tramos de los ríos Tercero (Ctalamochita), Saladillo, Carcarañá y arroyo Tortugas durante los días 09, 10 y 11 de Junio de 2014

En la campaña del 07, 08 y 09 de septiembre de 2014 (campaña N° 18) se observa, un aumento de la conductividad del río Tercero desde la localidad de Villa Ascasubi (0,185mS/cm) hasta la confluencia (2,10mS/cm) (Figura 104). La conductividad del río Saladillo en la confluencia fue de 8,36 mS/cm, y la del río Carcarañá a la altura de Inrville fue de 5,1 mS/cm, la cual es resultado de la mezcla completa entre los dos ríos (Figura 104). En la localidad de Cruz Alta la conductividad aumenta debido al aporte del arroyo tortugas. A partir de este punto y hasta su desembocadura, la conductividad del río Carcarañá no varía en forma significativa (Figura 104).

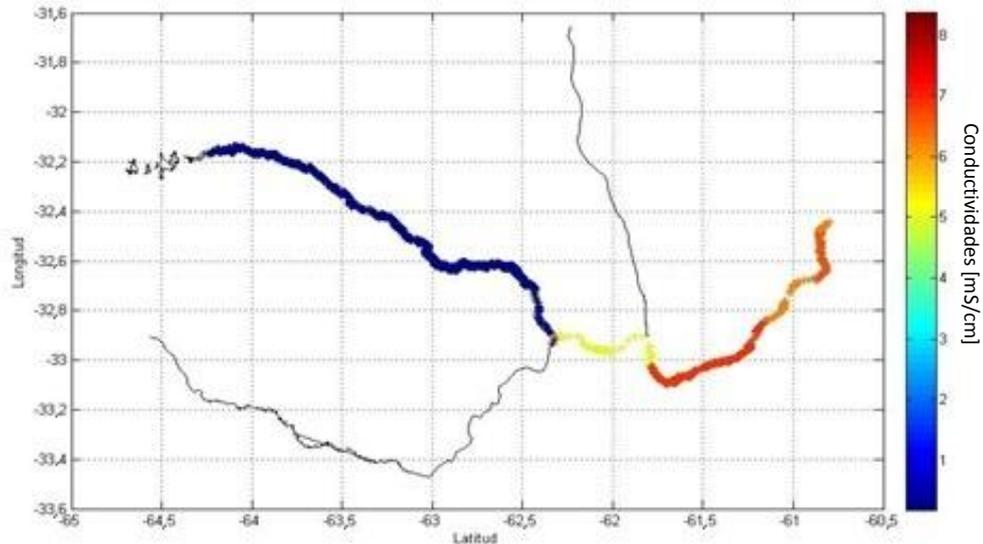


Figura 105: Evolución de la conductividad en [mS/cm] para diferentes tramos de los ríos Tercero (Ctalamochita), Saladillo, Carcarañá y arroyo Tortugas durante los días 08, 09 y 10 de Septiembre de 2014

5.2.3 Resumen de las observaciones realizadas

El análisis de los datos de las siete campañas anteriores revela que el río Tercero (Ctalamochita) aumenta de conductividad a lo largo de su recorrido debido a los suelos por el que escurre y a las descargas que recibe. El río Saladillo presenta altos valores de conductividad debido a los suelos altamente salinos por los que fluye, esto hace que el agua de este río no sea apta para riego y consumo. Al confluir el río Tercero (Ctalamochita) con el río Saladillo, este último saliniza notablemente el agua produciendo que río Carcarañá aumente su conductividad notablemente. El aporte del arroyo Tortugas incrementa nuevamente los valores de conductividad del río Carcarañá y ésta se mantiene hasta su desembocadura. La alta conductividad de las aguas del río Carcarañá la hace inutilizable para riego y consumo, ya que los costos de desalinización son excesivos.

Se contrastó la conductividad medida en el río Carcarañá 11,5 km aguas abajo de la confluencia de los ríos Tercero (Ctalamochita) y Saladillo con la conductividad obtenida a través de realizar el balance de masa (Figura 106). De manera análoga se realizó la misma tarea con la sección de Cruz Alta ubicada pocos kilómetros de la desembocadura del arroyo Tortugas en el río Carcarañá (Figura 107). Se observa una muy buena correspondencia entre los valores medidos y los valores calculados mediante el balance de masa, lo cual indica que no ha habido aportes significativos entre los puntos de medición y que en las secciones donde se midió la conductividad aguas abajo de la confluencia y desembocadura respectivamente, la mezcla se efectuó completamente.

CAPÍTULO V – CARACTERIZACIÓN DE PARÁMETROS COMPLEMENTARIOS
RELEVADOS EN CAMPO

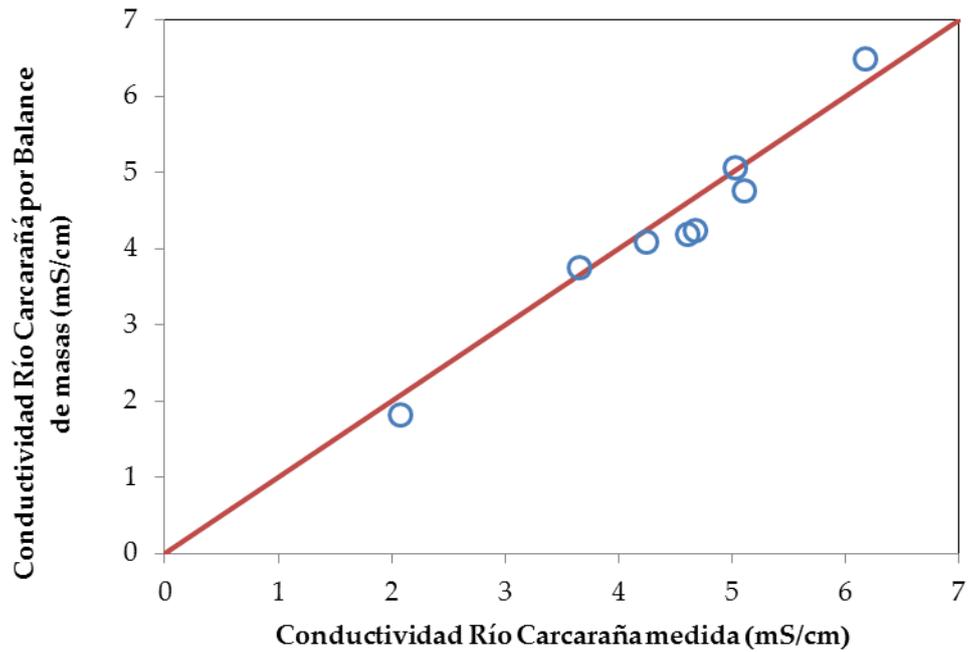


Figura 106: Contraste entre la conductividad medida 11,5km aguas abajo de la confluencia de los ríos Tercero (Ctalamochita) y Saladillo y la conductividad calculada a través de un balance de masas. La línea roja corresponde a la línea de correspondencia perfecta.

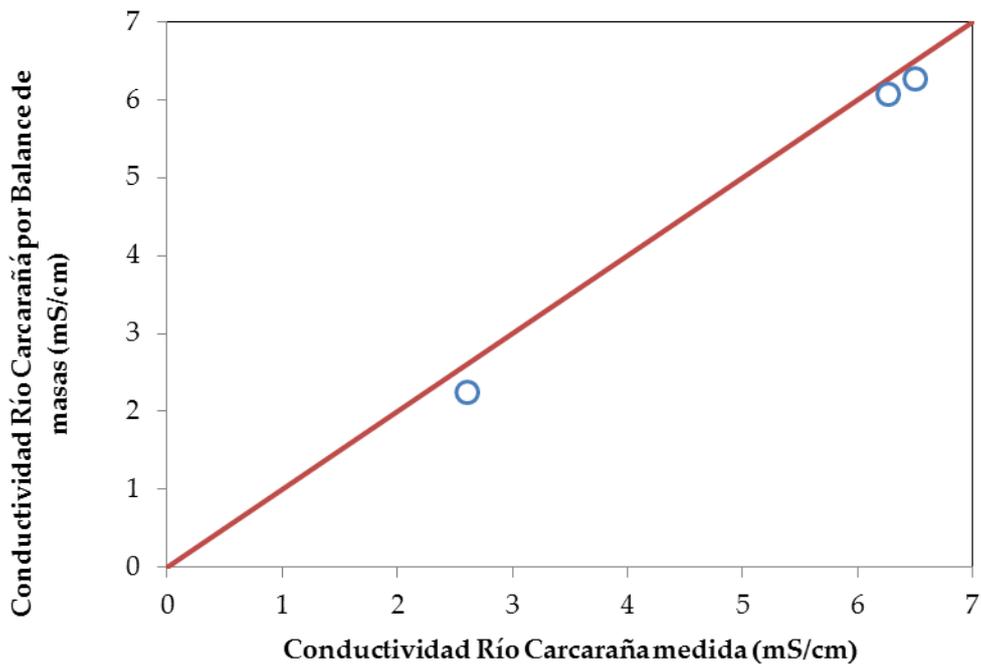
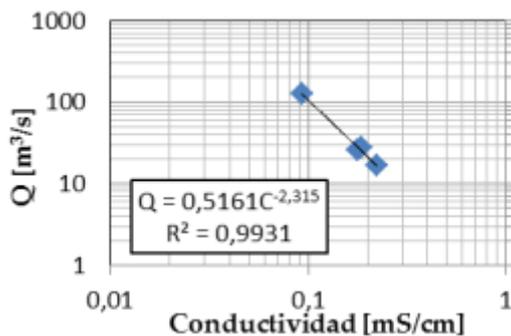


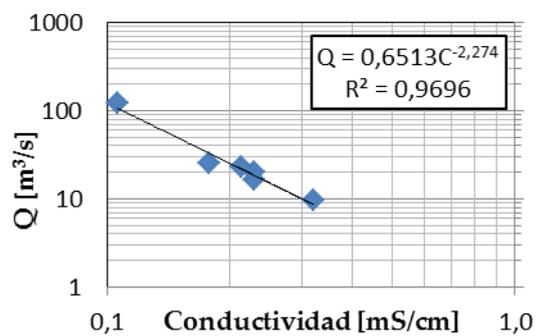
Figura 107: Contraste entre la conductividad medida en la localidad de Cruz Alta ubicada a pocos kilómetros de la desembocadura del arroyo Tortugas en el río Carcaraña y la conductividad calculada a través de un balance de masas. La línea roja corresponde a la línea de correspondencia perfecta.

5.2.4 Relaciones Conductividad – Caudal

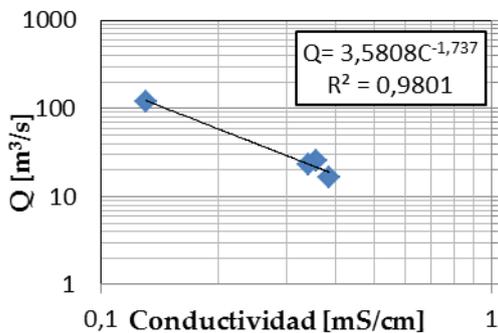
A continuación se muestran las correlaciones obtenidas entre la conductividad medida en cada uno de los sitios de medición con los caudales superficiales escurridos en la misma. Mediante esta relación se pretende obtener curvas que permitan estimar el caudal superficial que escurre en cada una de las secciones del sistema de estudio efectuando únicamente una medición de conductividad. En la Figura 108 se muestran las relaciones obtenidas junto al coeficiente de determinación (R^2), en donde el caudal (Q) está en m^3/s y la conductividad (C) en mS/cm



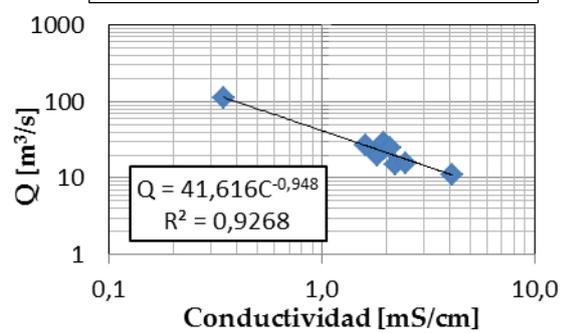
(A) Río Tercero (Ctalamochita) – Villa Ascasubi



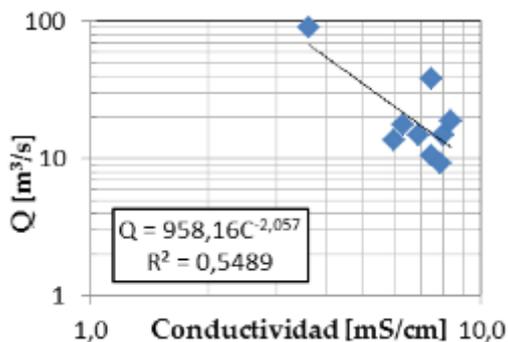
(B) Río Tercero (Ctalamochita) – Villa María



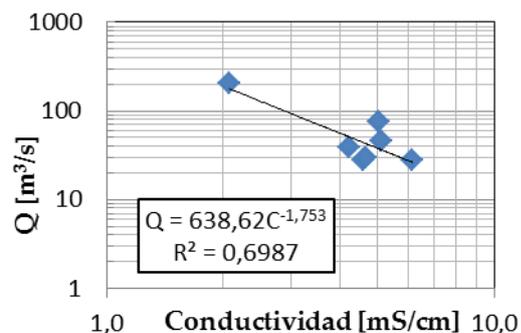
(C) Río Tercero (Ctalamochita) – Bell Ville



(D) Río Tercero (Ctalamochita) – Confluencia



(E) Río Saladillo – Confluencia



(F) Río Carcarañá - Inriville

CAPÍTULO V – CARACTERIZACIÓN DE PARÁMETROS COMPLEMENTARIOS
RELEVADOS EN CAMPO

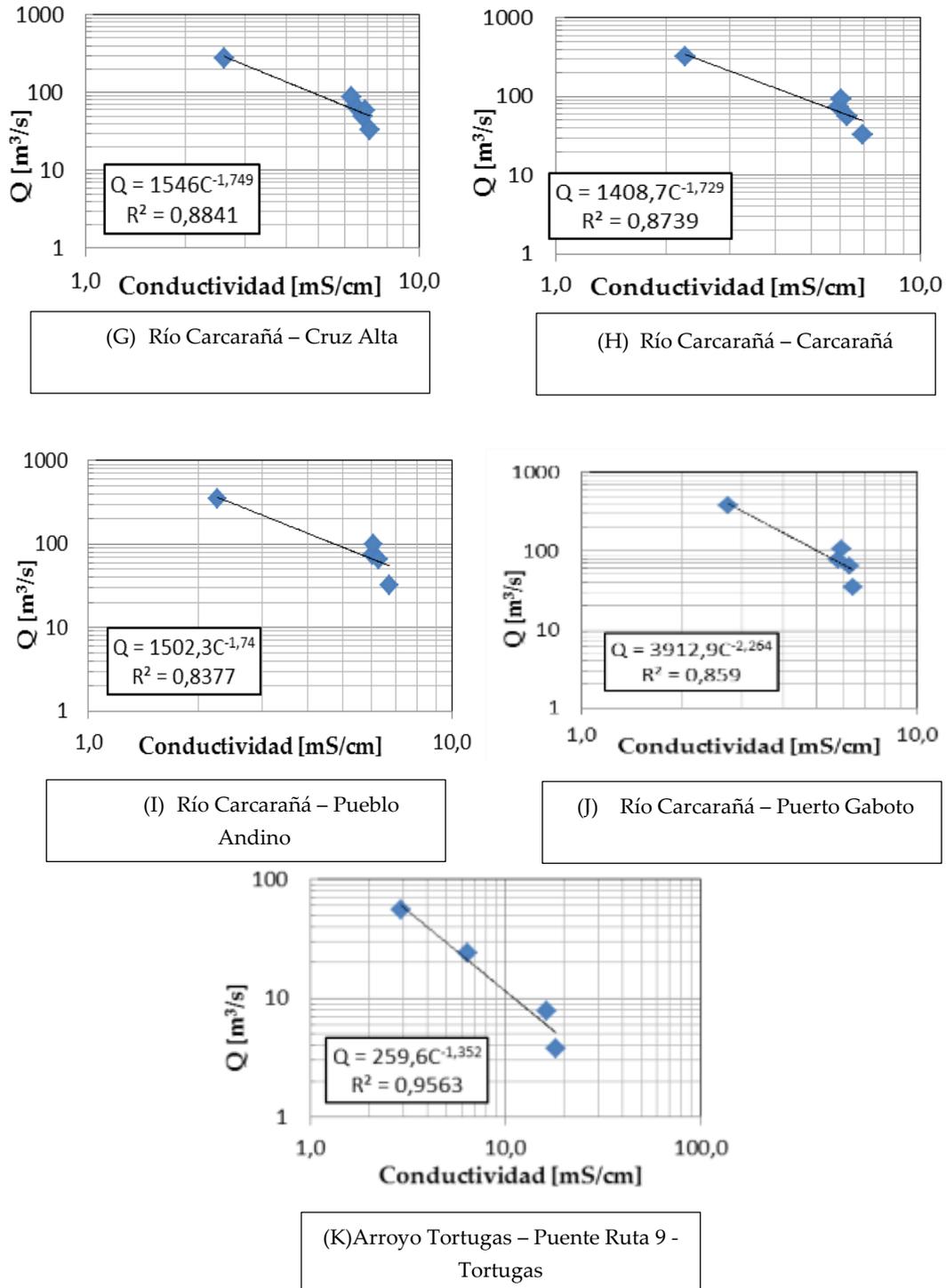


Figura 108: Curvas conductividad vs caudal determinadas para diferentes secciones del sistema de estudio. Donde Q [m^3/s] y C [mS/cm]

5.3. Curvas Granulométricas del material del lecho

En la campaña N° 12 se tomaron muestras de sedimento en diferentes secciones de aforos, para luego efectuar ensayos de granulometría en laboratorio con el fin de determinar las curvas granulométricas del material del lecho.

CAPÍTULO V – CARACTERIZACIÓN DE PARÁMETROS COMPLEMENTARIOS
RELEVADOS EN CAMPO

El ensayo de granulometría tiene como finalidad determinar cuantitativamente la distribución de tamaño de las partículas presentes en una muestra de suelo. Así es posible también su clasificación mediante sistemas como AASHTO o USCS. En este trabajo se optó por utilizar la clasificación USCS. Para obtener la distribución de tamaños, se emplean tamices normalizados y numerados, dispuestos en orden decreciente (Tabla 7). Para suelos con tamaño de partículas mayor a 0,074 mm (74 micrones) se utiliza el método de análisis mecánico mediante tamices de abertura normalizada. Para suelos de tamaño inferior, se utiliza el método del hidrómetro, basado en la ley de Stokes.

Tabla 7: Tamices normalizados necesarios para realizar el ensayo de granulometría

Tamiz (ASTM)	Abertura (mm)
3"	76,12
2"	50,80
1 ½ "	38,10
1"	25,40
¾ "	19,05
3/8 "	9,52
Nº 4	4,76
Nº 10	2,00
Nº 20	0,84
Nº 40	0,42
Nº 60	0,25
Nº 140	0,105
Nº 200	0,074

Una vez obtenidas las curvas granulométricas, se determinó a qué tipo de suelo correspondía cada muestra utilizando el "Sistema de Clasificación de Suelos Unificado" o USCS, por sus siglas en idioma inglés (Tabla 8).

Las cuatro divisiones mayores del USCS son grano grueso, grano fino, suelo altamente orgánico y turba. Dentro de los suelos de grano grueso se encuentran las gravas y arenas, que presentan 50% o más de material retenido en el tamiz Nº200. Mientras que los limos y arcillas, con menos del 50% del material retenido en el tamiz Nº200, corresponden a los suelos de grano fino. La turba y los suelos orgánicos generalmente se identifican visualmente.

A continuación se realiza una breve descripción de ambas metodologías, las cuales fueron utilizadas para la obtención de las curvas granulométricas en las diferentes secciones.

CAPÍTULO V – CARACTERIZACIÓN DE PARÁMETROS COMPLEMENTARIOS
RELEVADOS EN CAMPO

Tabla 8: Sistema de Clasificación de Suelos Unificado (USCS)

Mayores divisiones			Símbolos	Nombre típico
Suelos de grano grueso (más del 50% retenido en el tamiz N°200)	Gravas (más de la mitad de la fracción gruesa retenida en el tamiz N°4)	Gravas limpias con menos del 5% de finos	GW	Grava o grava-arena bien graduada con poco o nada de finos
			GP	Grava o grava-arena pobremente graduada con poco o nada de finos
		Gravas con más del 15% de finos	GM	Grava limosa
			GC	Grava arcillosa
	Arenas (más de la mitad de la fracción gruesa pasante por el tamiz N°4)	Arenas limpias con menos del 5% de finos	SW	Arena o arena-grava bien graduada con poco o nada de finos
			SP	Arena o arena-grava pobremente graduada con poco o nada de finos
		Arenas con más del 15% de finos	SM	Arena limosa
			SC	Arena arcillosa
Suelos de grano fino (más del 50% pasante por el tamiz N°200)	Limos y arcillas		ML	Limo inorgánico y arenas muy finas con baja plasticidad
			CL	Arcilla inorgánica con baja o media plasticidad
	Límite líquido 50% o inferior		OL	Limo orgánico y arcilla limosa orgánica con baja plasticidad
	Limos y arcillas		MH	Limo inorgánico con media o alta plasticidad
			CH	Arcilla inorgánica con alta plasticidad
	Límite líquido superior a 50%		OH	Arcilla orgánica o arcilla limosa orgánica con media o alta plasticidad
Suelos altamente orgánicos			PT	Turba y otros suelos muy orgánicos

- Método de análisis mecánico mediante tamices

El ensayo de tamizado utiliza una serie de tamices con diferentes diámetros (Tabla 7) que son ensamblados formando una columna (Figura 109). En la parte superior, donde se encuentra el tamiz de mayor diámetro, se agrega el material original (suelo o sedimento mezclado) y la columna de tamices se somete a vibración y movimientos rotatorios intensos mediante una máquina destinada a tal fin o agitación manual, la cual es menos eficiente. Luego de algunos minutos de agitación, se separa la columna de tamices cuidando de no derramar la muestra retenida en cada uno de ellos. Luego se toman los pesos de material retenido en cada tamiz con una balanza de precisión y se los registra en una planilla. Conociendo el peso total de la muestra y el peso del material retenido en cada tamiz, se puede determinar el porcentaje pasante por cada uno de ellos mediante la ecuación 3.

$$\%P = 100 - \left(\frac{\sum R_i}{P_T} \cdot 100 \right) \quad (3)$$

CAPÍTULO V – CARACTERIZACIÓN DE PARÁMETROS COMPLEMENTARIOS RELEVADOS EN CAMPO

Donde P_t es el peso total de la muestra y R_i es el peso retenido en cada tamiz de abertura de malla superior a la abertura sobre la cual se quiere obtener el porcentaje pasante.



Figura 109: Columna de tamices utilizados para realizar el ensayo granulometría en este trabajo.

- Método del Hidrómetro

El método del hidrómetro se utiliza para obtener un valor estimado de la distribución granulométrica de suelos cuyas partículas se encuentran comprendidas entre los 0,074 mm (malla N° 200 ASTM) y hasta alrededor de 0,001 mm. El análisis utiliza la ley de Stokes que relaciona la velocidad de caída de una esfera en un fluido con el diámetro de la esfera, el peso específico de la esfera y del fluido y la viscosidad de éste.

Para llevar a cabo este experimento se utilizó un hidrómetro que es un instrumento que se utiliza para determinar la variación de la densidad de la solución con el transcurso del tiempo.

El procedimiento necesario para realizar este ensayo consiste en mezclar una cantidad de suelo (50g) con una solución al 40% de agua destilada y NaPO_3 . El NaPO_3 es un floculante que neutraliza las cargas eléctricas sobre las partículas del suelo, que a menudo tienen carga negativa, y produce que se atraigan entre sí con suficiente fuerza para permanecer unidas, creando así unidades mayores que decantan por gravedad. Una vez mezclado el suelo con la solución, se coloca el hidrómetro en la probeta cuidando de no agitar mucho la solución (Figura 110). Hecho esto, se toma lectura en la escala del hidrómetro y se mide la temperatura de la solución en los tiempos determinados por el ensayo. Finalmente, se calculan los porcentajes pasantes mediante los procedimientos, formulas y tablas detallados en la bibliografía.



Figura 110: Probeta con solución de suelo, agua y floculante, y el hidrómetro en su interior.

5.3.1 Río Tercero (Ctalamochita)

5.3.1.1 Puente Alberdi - Villa María – Córdoba

- Método de análisis mecánico mediante tamices:

El peso total de la muestra fue de 132 g. Luego de efectuar el ensayo de tamizado se elaboró la Tabla 9. Con los valores de dicha tabla se pudo determinar la curva granulométrica mostrada en la Figura 111

Tabla 9: Método de análisis mecánico mediante tamices aplicado al río Tercero (Ctalamochita) – Sección puente Alberdi (Villa María).

Tamiz (Nº)	Abertura (mm)	Peso Ret. (g)	% Pasante
4	4,750	0,0	100%
10	2,000	30,7	77%
16	1,180	10,9	68%
30	0,600	18,8	54%
40	0,425	22,9	37%
100	0,150	45,1	3%
200	0,075	1,2	2%

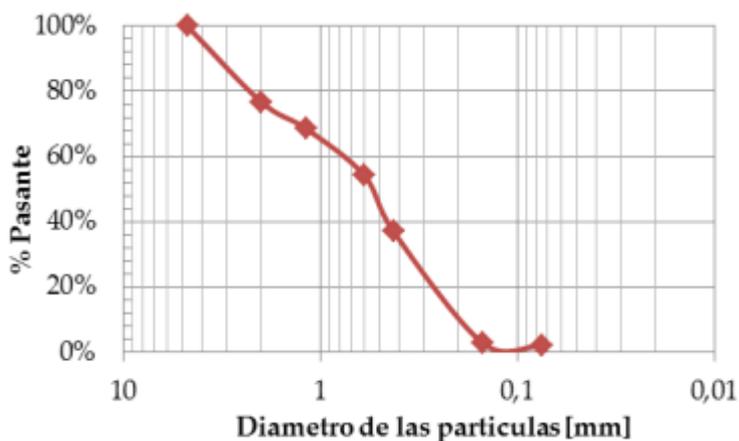


Figura 111: Curva granulométrica del río Tercero (Ctalamochita) – Sección puente Alberdi (Villa María).

CAPÍTULO V – CARACTERIZACIÓN DE PARÁMETROS COMPLEMENTARIOS RELEVADOS EN CAMPO

La muestra de suelo corresponde a la clasificación **SP** del USCS, es decir, arena pobremente graduada con poco o nada de finos (Figura 112).



Figura 112: Muestra de suelo del río Tercero (Ctalamochita) – Sección puente Alberdi (Villa María).

5.3.2 Río Saladillo

5.3.2.1 Puente ruta 6 – Monte Buey - Córdoba

- Método del hidrómetro:

El peso total de la muestra fue de 50 g. Luego con los resultados del método del hidrómetro se elaboró Tabla 10.

Tabla 10: Método del hidrómetro aplicado al río Saladillo – Sección puente ruta 6 (M.B.).

<u>Diámetro (mm)</u>	<u>% Pasante</u>
0,0475	14%
0,0338	12%
0,0241	9%
0,0170	9%
0,0121	9%
0,0089	8%
0,0063	7%
0,0039	7%
0,0025	5%
0,0013	4%
0,0012	3%
0,0010	2%

- Método de análisis mecánico mediante tamices:

Luego de efectuar el ensayo de tamizado se elaboró la Tabla 11

CAPÍTULO V – CARACTERIZACIÓN DE PARÁMETROS COMPLEMENTARIOS
RELEVADOS EN CAMPO

Tabla 11: Método de análisis mecánico mediante tamices aplicado al río Saladillo – Sección puente ruta 6 (Monte Buey).

Tamiz (Nº)	Abertura (mm)	Peso Ret. (g)	% Pasante
4	4,750	0	100%
10	2,000	0,4	99%
16	1,180	0,5	98%
30	0,600	0,9	96%
40	0,425	0,4	96%
100	0,150	11,8	72%
200	0,075	22,9	26%

Con los valores de las Tabla 10 y Tabla 11 se pudo determinar la curva granulométrica mostrada en la Figura 113.

La muestra de suelo corresponde a la clasificación **SM** del USCS, es decir, arena limosa (Figura 114).

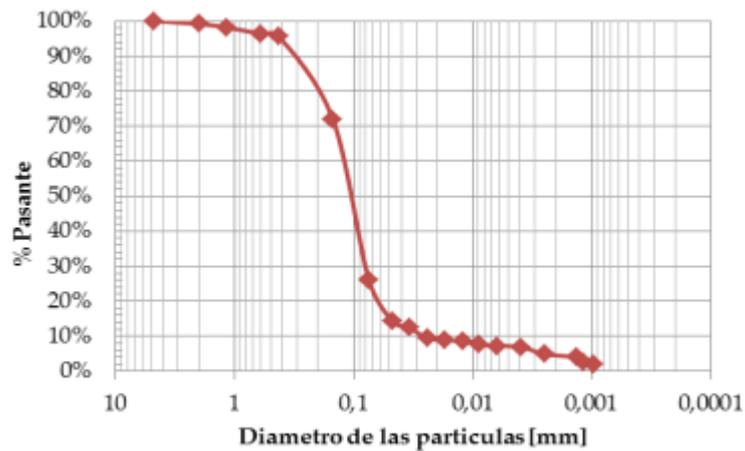


Figura 113: Curva granulométrica del Río Saladillo – Sección puente ruta 6 (Monte Buey)



Figura 114: Muestra de suelo del río Saladillo – Sección puente ruta 6 (Monte Buey).

5.3.3 Arroyo Tortugas

5.3.3.1 Puente Ruta 9 en las cercanías de la localidad de Tortugas – Santa Fe

- Método del hidrómetro:

El peso total de la muestra fue de 50 g. Luego con los resultados del método del hidrómetro se elaboró la Tabla 12.

Tabla 12: Método del hidrómetro aplicado al arroyo Tortugas – Sección Tortugas.

Diámetro (mm)	% Pasante
0,04600	30%
0,03300	28%
0,02700	26%
0,02400	24%
0,01700	22%
0,01200	21%
0,00900	18%
0,00600	16%
0,00472	14%
0,00320	10%
0,00258	9%
0,00140	6%
0,00130	5%
0,00067	4%

- Método de análisis mecánico mediante tamices:

Luego de efectuar el ensayo de tamizado se elaboró la Tabla 13

Tabla 13: Método de análisis mecánico mediante tamices aplicado al arroyo Tortugas – Sección Tortugas.

Tamiz (Nº)	Abertura (mm)	Peso Ret. (g)	% Pasante
4	4,750	0,0	100%
10	2,000	0,0	100%
16	1,180	0,1	100%
30	0,600	0,2	99%
40	0,425	0,4	99%
100	0,150	16,2	66%
200	0,075	13,6	39%

Con los valores de las Tabla 12 y Tabla 13 se pudo determinar la curva granulométrica mostrada en la Figura 115.

La muestra de suelo corresponde a la clasificación SM del USCS, es decir, arena limosa (Figura 116)

CAPÍTULO V – CARACTERIZACIÓN DE PARÁMETROS COMPLEMENTARIOS
RELEVADOS EN CAMPO

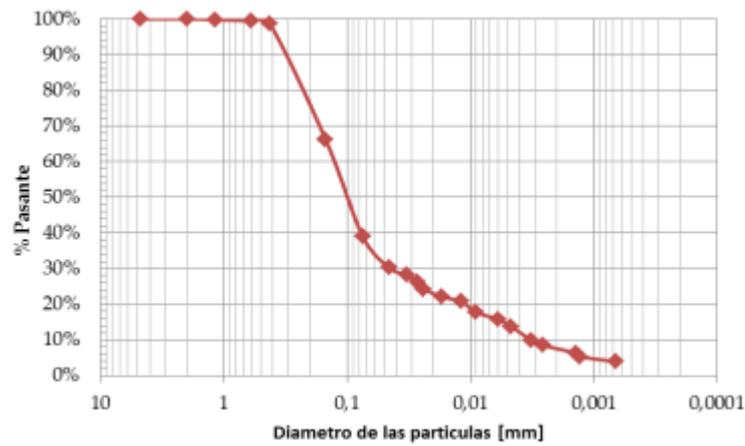


Figura 115: Curva granulométrica del arroyo Tortugas – Sección Tortugas.



Figura 116: Muestra de suelo del arroyo Tortugas – Sección Tortugas

5.3.4 Río Carcarañá

5.3.4.1 Puente Ruta 12 – Inrriville – Córdoba

- Método del hidrómetro:

El peso total de la muestra fue de 50 g. Luego con los resultados del método del hidrómetro se elaboró la Tabla 14.

Tabla 14: Método del hidrómetro aplicado al Río Carcarañá – Sección puente ruta 12 (Inrriville).

Díámetro (mm)	% Pasante
0,04677	23%
0,03342	19%
0,02748	17%
0,02396	15%
0,01700	13%
0,01206	12%

CAPÍTULO V – CARACTERIZACIÓN DE PARÁMETROS COMPLEMENTARIOS
RELEVADOS EN CAMPO

Diámetro (mm)	% Pasante
0,00884	11%
0,00634	8%
0,00459	8%
0,00326	6%
0,00079	4%

- Método de análisis mecánico mediante tamices:
Luego de efectuar el ensayo de tamizado se elaboró Tabla 15.

Tabla 15: Método de análisis mecánico mediante tamices aplicado al Río Carcarañá – Sección puente ruta 12 (Inriville).

Tamiz (Nº)	Abertura (mm)	Peso Ret. (g)	% Pasante
4	4,750	0,0	100%
10	2,000	0,0	100%
16	1,180	0,2	100%
30	0,600	0,6	98%
40	0,425	0,6	97%
100	0,150	22,0	53%
200	0,075	8,0	37%

Con los valores de las Tabla 14 y Tabla 15 se pudo determinar la curva granulométrica mostrada en la Figura 117

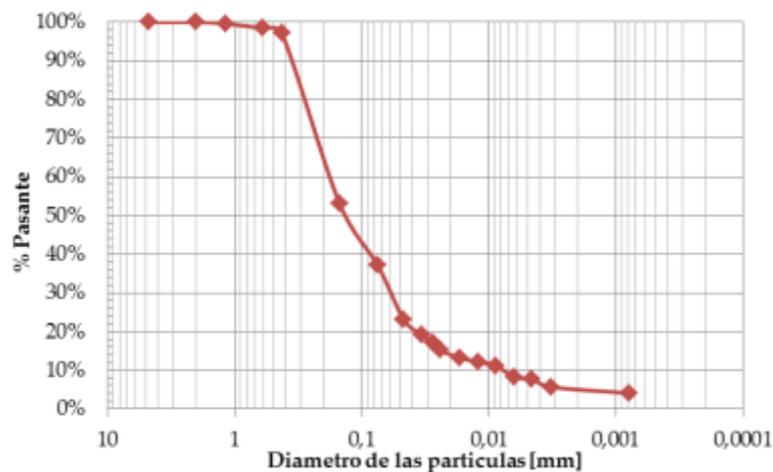


Figura 117: Curva granulométrica del río Carcarañá – Sección puente ruta 12 (Inriville).

La muestra de suelo corresponde a la clasificación **SM** del USCS, es decir, arena limosa (Figura 118)



Figura 118: Muestra de suelo del río Carcarañá – Sección puente ruta 12 (Inriville).

5.3.4.2 Puente ruta 15 – Cruz Alta

- Método del hidrómetro:

El peso total de la muestra fue de 50 g. Luego de realizar el método del hidrómetro se pudo completar la Tabla 16.

Tabla 16: Método del hidrómetro aplicado al Río Carcarañá – Sección puente ruta 15 (Cruz Alta).

Diámetro (mm)	% Pasante
0,04629	29%
0,03290	27%
0,02719	23%
0,02360	22%
0,01680	19%
0,01210	14%
0,00893	13%
0,00637	11%
0,00459	9%
0,00221	7%
0,00140	6%
0,00133	6%
0,00066	6%
0,00065	5%

- Método de análisis mecánico mediante tamices:
Luego de efectuar el ensayo de tamizado se elaboró Tabla 17.

CAPÍTULO V – CARACTERIZACIÓN DE PARÁMETROS COMPLEMENTARIOS
RELEVADOS EN CAMPO

Tabla 17: Método de análisis mecánico mediante tamices aplicado al Río Carcarañá – Sección puente ruta 15 (Cruz Alta).

Tamiz (Nº)	Abertura (mm)	Peso Ret. (g)	% Pasante
4	4,750	0,0	100%
10	2,000	0,0	100%
16	1,180	0,1	100%
30	0,600	2,3	95%
40	0,425	1,0	93%
100	0,150	7,7	78%
200	0,075	19,5	39%

Con los valores de las Tabla 16 y Tabla 17 se pudo determinar la curva granulométrica mostrada en la Figura 119.

La muestra de suelo corresponde a la clasificación **SM** del USCS, es decir, arena limosa (Figura 120).

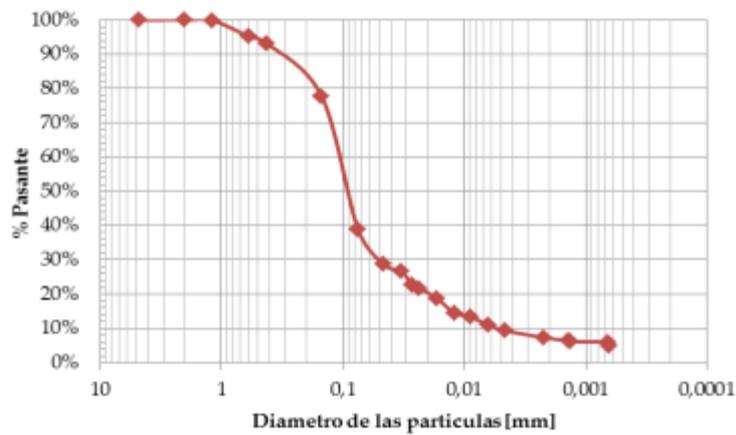


Figura 119: Curva granulométrica del río Carcarañá – Sección puente ruta 15 (Cruz Alta).



Figura 120: Muestra de suelo del río Carcarañá – Sección puente ruta 15 (Cruz Alta).

5.3.4.3 Parque Sarmiento – Carcarañá – Santa Fe

- Método del hidrómetro:

El peso total de la muestra fue de 50 g. Luego de realizar el método del hidrómetro se pudo completar la Tabla 18.

Tabla 18: Método del hidrómetro aplicado al Río Carcarañá – Sección Parque Sarmiento (Carcarañá).

Diámetro (mm)	% Pasante
0,04890	19%
0,03460	19%
0,02820	17%
0,02460	16%
0,01740	15%
0,01240	13%
0,00900	11%
0,00650	9%
0,00450	9%
0,00290	7%
0,00140	7%
0,00130	6%
0,00128	5%
0,00082	5%

- Método de análisis mecánico mediante tamices:

Luego de efectuar el ensayo de tamizado se elaboró Tabla 19

Tabla 19: Método de análisis mecánico mediante tamices aplicado al Río Carcarañá – Sección Parque Sarmiento (Carcarañá).

Tamiz (Nº)	Abertura (mm)	Peso Ret. (g)	% Pasante
4	4,750	0	100%
10	2,000	0	100%
16	1,180	0,6	99%
30	0,600	0,9	97%
40	0,425	0,5	96%
100	0,150	13	70%
200	0,075	17,7	35%

Con los valores de las Tabla 18 y Tabla 19 se pudo determinar la curva granulométrica mostrada en la Figura 121.

CAPÍTULO V – CARACTERIZACIÓN DE PARÁMETROS COMPLEMENTARIOS
RELEVADOS EN CAMPO

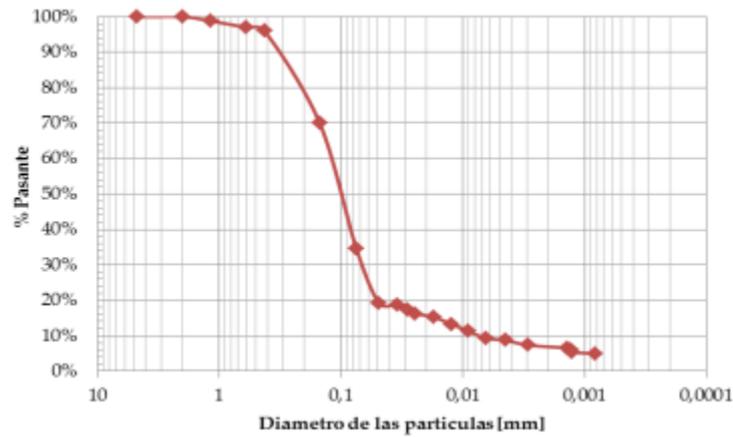


Figura 121: Curva granulométrica del río Carcarañá – Sección Parque Sarmiento (Carcarañá).

La muestra de suelo corresponde a la clasificación **SM** del USCS, es decir, arena limosa (Figura 122).



Figura 122: Muestra de suelo del río Carcarañá – Sección Parque Sarmiento (Carcarañá).

5.3.4.4 **Pueblo Andino – Santa Fe**

- Método del hidrómetro:

El peso total de la muestra fue de 50 g. Luego de realizar el método del hidrómetro se pudo completar la Tabla 20.

Tabla 20: Método del hidrómetro aplicado al Río Carcarañá – Sección Pueblo Andino.

Diámetro (mm)	% Pasante
0,04689	20%
0,03362	16%
0,02754	14%
0,02401	12%

CAPÍTULO V – CARACTERIZACIÓN DE PARÁMETROS COMPLEMENTARIOS
RELEVADOS EN CAMPO

Diámetro (mm)	% Pasante
0,01704	11%
0,01209	10%
0,00884	8%
0,00630	9%
0,00453	7%
0,00323	6%
0,00271	5%
0,00138	4%
0,00121	4%

- Método de análisis mecánico mediante tamices:
Luego de efectuar el ensayo de tamizado se elaboró Tabla 21

Tabla 21: Método de análisis mecánico mediante tamices aplicado al Río Carcarañá – Sección Pueblo Andino.

Tamiz (Nº)	Abertura (mm)	Peso Ret. (g)	% Pasante
4	4,750	0	100%
10	2,000	0	100%
16	1,180	0,1	100%
30	0,600	0,8	98%
40	0,425	0,8	97%
100	0,150	13	71%
200	0,075	18,9	33%

Con los valores de las Tabla 20 y Tabla 21 se pudo determinar la curva granulométrica mostrada en la Figura 123.

La muestra de suelo corresponde a la clasificación SM del USCS, es decir, arena limosa (Figura 124).

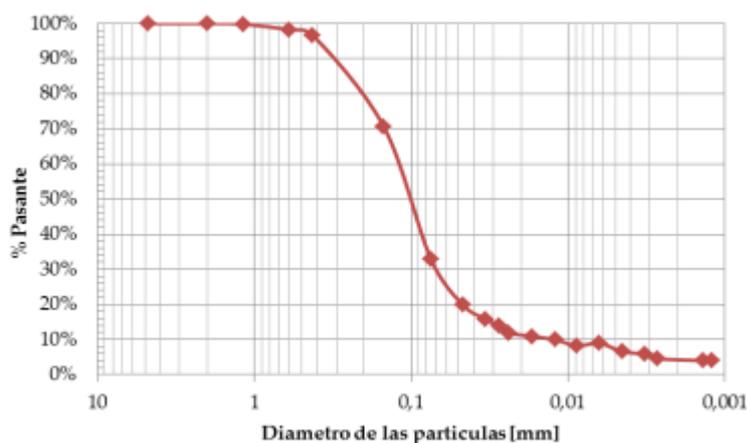


Figura 123: Curva granulométrica del río Carcarañá – Sección Pueblo Andino.

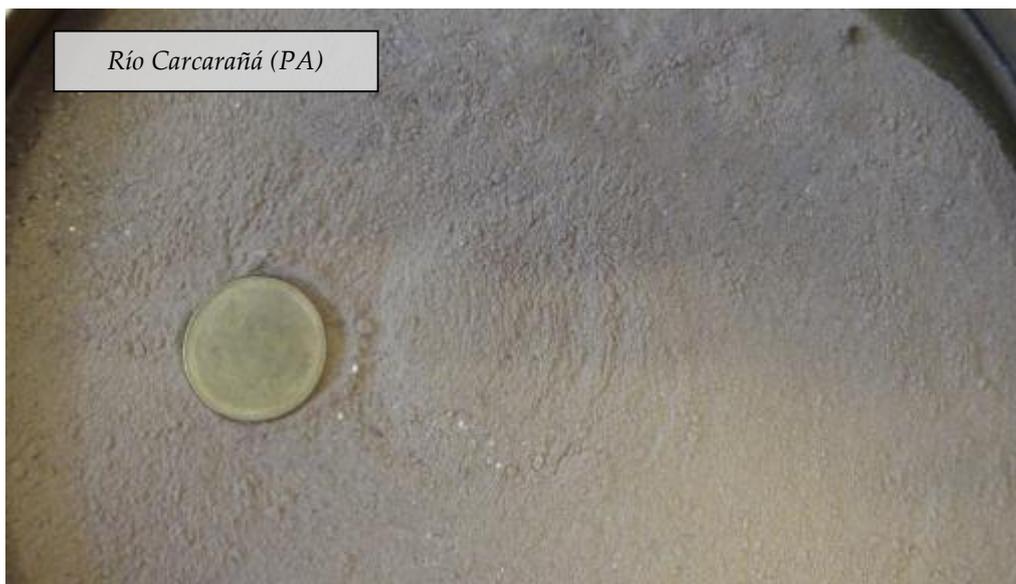


Figura 124: Muestra de suelo del río Carcarañá – Sección Pueblo Andino.

5.3.4.5 Puerto Gaboto – Santa Fe

- Método del hidrómetro:

El peso total de la muestra fue de 50 g. Luego de realizar el método del hidrómetro se pudo completar Tabla 22.

Tabla 22: Método del hidrómetro aplicado al Río Carcarañá – Sección Puerto Gaboto.

Diámetro (mm)	% Pasante
0,04660	28%
0,03330	24%
0,02740	22%
0,02390	20%
0,01690	18%
0,01000	16%
0,00900	14%
0,00700	13%
0,00452	12%
0,00323	10%
0,00142	7%
0,00132	5%

- Método de análisis mecánico mediante tamices:

Luego de efectuar el ensayo de tamizado se elaboró Tabla 23

Tabla 23: Método de análisis mecánico mediante tamices aplicado al Río Carcarañá – Sección Puerto Gaboto.

Tamiz (Nº)	Abertura (mm)	Peso Ret. (g)	% Pasante
4	4,750	0,0	100%
10	2,000	0,4	99%
16	1,180	1,2	97%

CAPÍTULO V – CARACTERIZACIÓN DE PARÁMETROS COMPLEMENTARIOS
RELEVADOS EN CAMPO

Tamiz (Nº)	Abertura (mm)	Peso Ret. (g)	% Pasante
30	0,600	2,2	92%
40	0,425	1,2	90%
100	0,150	14,6	61%
200	0,075	11,6	38%

Con los valores de las Tabla 22 y Tabla 23 se pudo determinar la curva granulométrica mostrada en la Figura 125.

La muestra de suelo corresponde a la clasificación **SM** del USCS, es decir, arena limosa (Figura 126)

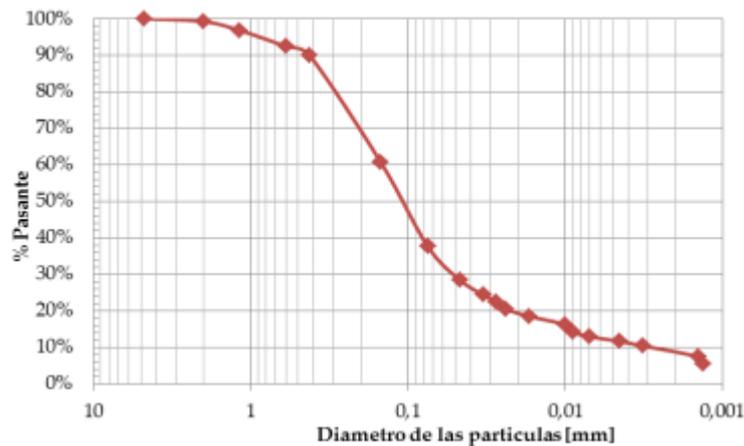


Figura 125: Curva granulométrica del río Carcarañá – Sección Puerto Gaboto.



Figura 126: Curva granulométrica del río Carcarañá – Sección Puerto Gaboto.

5.3.5 Comparación entre curvas granulométricas.

En la Figura 127 se han graficado las curvas granulométricas de las secciones de Villa María (Río Tercero), Puente ruta 6 – Monte Buey (río

CAPÍTULO V – CARACTERIZACIÓN DE PARÁMETROS COMPLEMENTARIOS
RELEVADOS EN CAMPO

Saladillo), Puente ruta 9 – Tortugas (arroyo Tortugas) y Puente ruta 12- Inrville (Carcarañá). Se observa que la granulometría de la sección de Villa María sobre el Río Tercero presenta fracciones de partículas gruesas que no se encuentran en ninguna de las otras secciones analizadas. Las curvas granulométricas restantes son muy similares entre sí, presentando pequeñas diferencias en la fracción fina (diámetro de partícula menor a 0,075mm), siendo el arroyo Tortugas el que mayor porcentaje de finos posee.

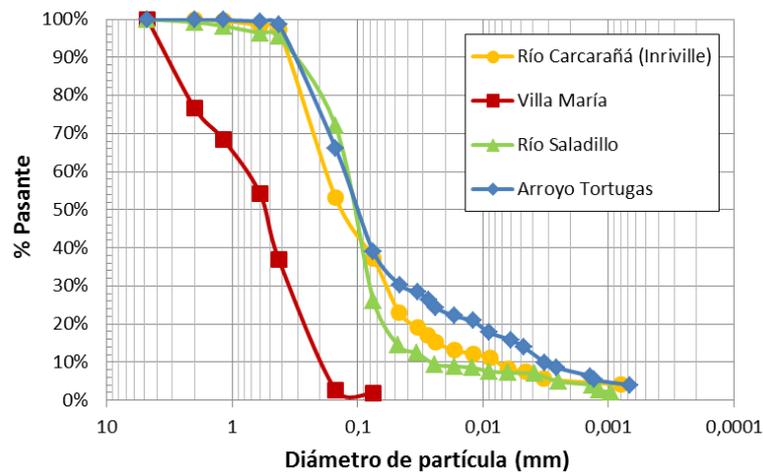


Figura 127: Comparación entre las curvas granulométricas de los ríos Carcarañá, Tercero (en Villa María), Saladillo y arroyo Tortugas

En la Figura 128 se encuentran graficadas las curvas granulométricas de diferentes secciones del río Carcarañá. Puede observarse una importante similitud entre las curvas, lo cual indica que la granulometría del río no varía desde su nacimiento hasta su desembocadura.

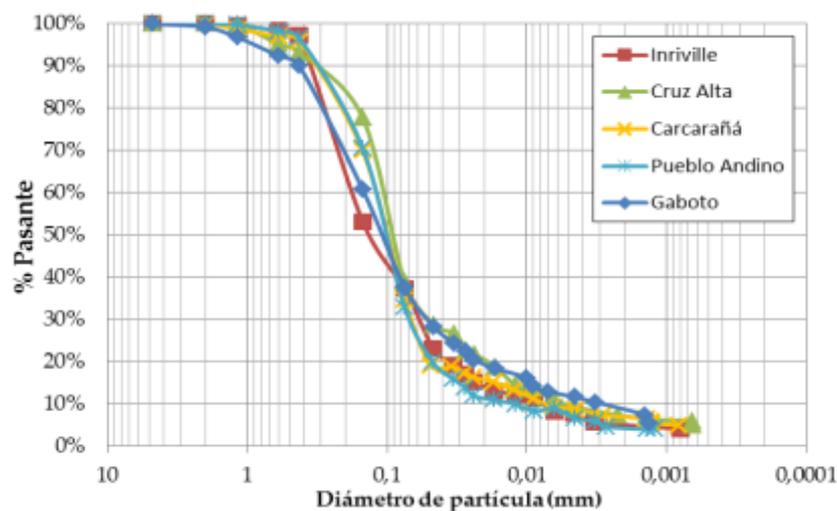


Figura 128: Comparación entre las curvas granulométricas a lo largo de diferentes secciones de aforo a lo largo del río Carcarañá.

5.4. Coeficiente de rugosidad de Manning (n)

A partir de los datos morfológicos e hidrodinámicos de la sección transversal relevados mediante el uso de ADCP, se realizó la estimación del coeficiente de rugosidad de Manning “n” para las secciones aforadas durante la campaña N°12 que no presentaban la influencia de pilas de puentes.

La ecuación 4 es conocida como la ecuación de Manning, la cual relaciona la pendiente de energía (S), el radio hidráulico (R) con la Velocidad media del flujo.

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad [\text{m/s}] \quad (4)$$

Donde R [m] y S [m/m]

De la ecuación 4 se despeja el coeficiente de rugosidad de Manning “n” para su cálculo, lo que resulta

$$n = \frac{R^{2/3} S^{1/2}}{v} \quad (5)$$

5.4.1 Coeficiente de rugosidad de Manning del Río Tercero (Ctalamochita)

5.4.1.1 Sección Balneario.

Lenarduzzi (2013) determinó el coeficiente de rugosidad de Manning con una metodología similar en el Río Tercero (Ctalamochita), más precisamente en el balneario de la ciudad homónima, reportando un valor de 0,026 con una pendiente de superficie libre de 0,112%.

5.4.1.2 Sección puente Alberdi (Villa María).

Tabla 24: Coeficiente de rugosidad de Manning del Río Tercero (Ctalamochita)– Sección puente Alberdi (Villa María).

Parámetro	Valor	Unidad
Velocidad media (U)	0,69	m/s
Área (A)	13,98	m ²
Perímetro Mojado (P)	27,57	m
Radio Hidráulico (R)	0,51	m
Pendiente (S)	0,0562*	%
Coef. de rugosidad de Manning (n)	0,0228	

*Pendiente media del cauce determinada por Ricardi et al (2013) utilizando imágenes satelitales STRM

5.4.1.3 Confluencia

Herrero et al (2013) determinó, a partir de mediciones de campo, el coeficiente de rugosidad de Manning del Río Tercero (Ctalamochita) en el tramo aguas arriba de la confluencia con el Río Saladillo, reportándose un valor de 0,029.

5.4.2 Coeficiente de rugosidad de Manning del Río Carcarañá

5.4.2.1 Ruta 12 Inriville

Tabla 25: Coeficiente de rugosidad de Manning del Río Carcarañá – Sección puente ruta 12 (Inriville).

Parámetro	Valor	Unidad
Velocidad media (V)	0,83	m/s
Área (A)	33,94	m ²
Perímetro Mojado (P)	36,42	m
Radio Hidráulico (R)	0,93	m
Pendiente (S)	0,0406*	%
Coef. de rugosidad de Manning (n)	0,0232	

*Pendiente media del cauce determinada por Ricardi et al (2013) utilizando imágenes satelitales STRM

5.4.2.2 Sección Parque Sarmiento (Carcarañá).

Tabla 26: Coeficiente de rugosidad de Manning del Río Carcarañá – Sección Parque Sarmiento (Carcarañá).

Parámetro	Valor	Unidad
Velocidad media (V)	0,75	m/s
Área (A)	97,66	m ²
Perímetro Mojado (P)	48,39	m
Radio Hidráulico (R)	2,02	m
Pendiente (S)*	0,0306	%
Coef. de rugosidad de Manning (n)	0,0372	

*Pendiente media del cauce determinada por Ricardi et al (2013) utilizando imágenes satelitales STRM

El valor obtenido, es inadecuado para las características del flujo presentes en la sección de medición. El error en el n de Manning puede atribuirse a que la pendiente del cauce es muy baja, del orden del 0,01%, lo que produce que la determinación de la misma con imágenes STRM, como lo hizo Ricardi et al (2013), posea errores importantes y de la misma magnitud que la pendiente existente.



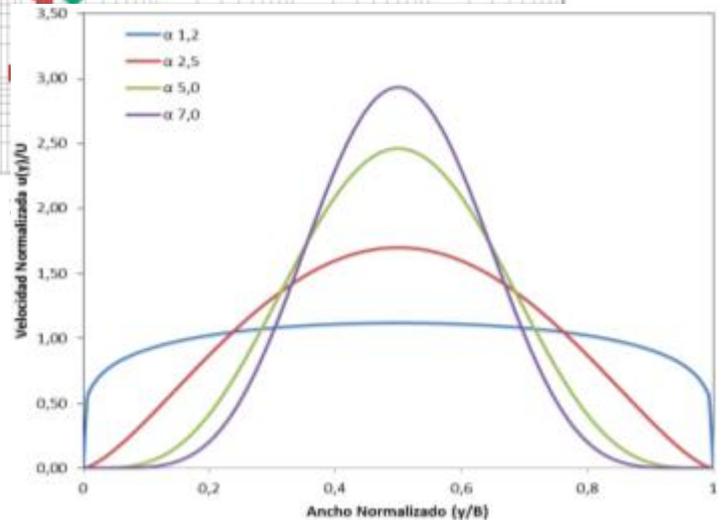
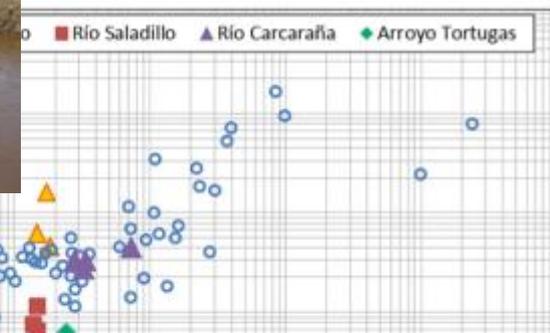
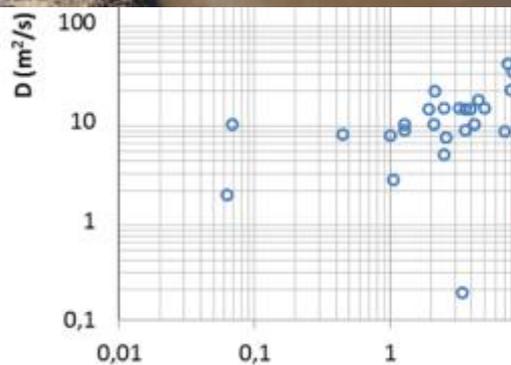
Universidad Nacional de Córdoba



FCEFYn
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

CAPÍTULO VI

DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS NECESARIOS PARA EVALUAR LOS PROCESOS DE MEZCLA



Capítulo VI DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS NECESARIOS PARA EVALUAR LOS PROCESOS DE MEZCLA

6.1. Introducción

Cuando un contaminante es descargado en un río (Figura 129) los procesos que regulan su mezcla suceden en tres etapas. En una etapa inicial (A) la cantidad de movimiento y la flotabilidad de la descarga son los que determinan la tasa de dilución del contaminante. Cuando los efectos de la cantidad de movimiento y la flotabilidad en los procesos de mezcla son despreciables, se entra en la segunda etapa (B), en la cual el contaminante es mezclado en el ancho y profundidad del río por la turbulencia propia del flujo. En ríos de baja profundidad este proceso se realiza en muy poco tiempo. Finalmente cuando el contaminante está completamente mezclado en la transversal y la vertical, comienza la dispersión longitudinal por corte, la cual tiende a reducir la concentración en la dirección longitudinal. Cabe destacar que esta última etapa pertenece a lo que se denomina “campo lejano” mientras que las dos primeras pertenecen al “campo cercano”.

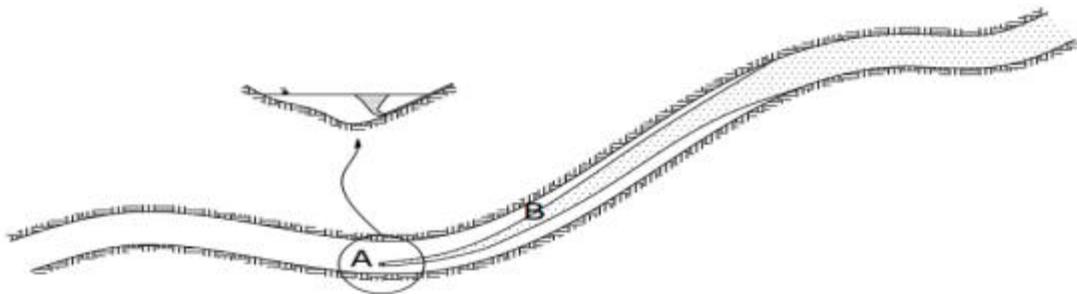


Figura 129: Las tres etapas de mezcla de un contaminante en un río (Fischer et al, 1979)

La dispersión longitudinal por corte es el proceso predominante de mezcla en ríos, es por ello que en este estudio solo se analiza la mezcla generada por la dispersión longitudinal, por lo que se asume que el contaminante se encuentra completamente mezclado en la dirección transversal y vertical del río.

6.2. Marco Teórico

6.2.1 *Dispersión longitudinal por corte*

Supóngase un canal rectangular cuya velocidad longitudinal varía parabólicamente a lo ancho del mismo (Figura 130). Si en el tiempo t_0 se inyecta un trazador uniformemente distribuido en la sección transversal como lo muestra la Figura 130, se observa que a medida que pasa el tiempo, el trazador más cercano a los bordes viaja más lentamente que el trazador ubicado en la

corriente principal dando como resultado que la línea de trazador inyectada inicialmente tome una forma parabólica en el tiempo t_1 . La turbulencia presente en el flujo causa dispersión localizada a lo ancho y largo del canal. Es importante recalcar que los otros procesos de mezcla intervienen en la dilución del contaminante, pero su participación puede ser despreciada frente a la dispersión longitudinal por corte, el cual es el proceso dominante. El esquema mostrado en la Figura 130 solo representa el inicio de la mezcla longitudinal de un trazador completamente mezclado en la transversal y vertical, ya que el proceso de mezcla longitudinal continua operando en el en el campo lejano por largas distancias.

Diversos trabajos científicos fueron desarrollados con el objetivo de estimar los parámetros necesarios para evaluar el proceso de mezcla longitudinal por corte. Uno de los parámetros más importantes es el coeficiente de dispersión longitudinal, por lo que existen varios trabajos científicos que se centran únicamente en estudiar metodologías para la determinación de este coeficiente (Fischer, 1979; Liu, 1977; Iwasa y Aya, 1991; Seo y Cheong, 1998, Koussis y Rodriguez Mirasol, 1998). Estas metodologías serán analizadas en las secciones siguientes.

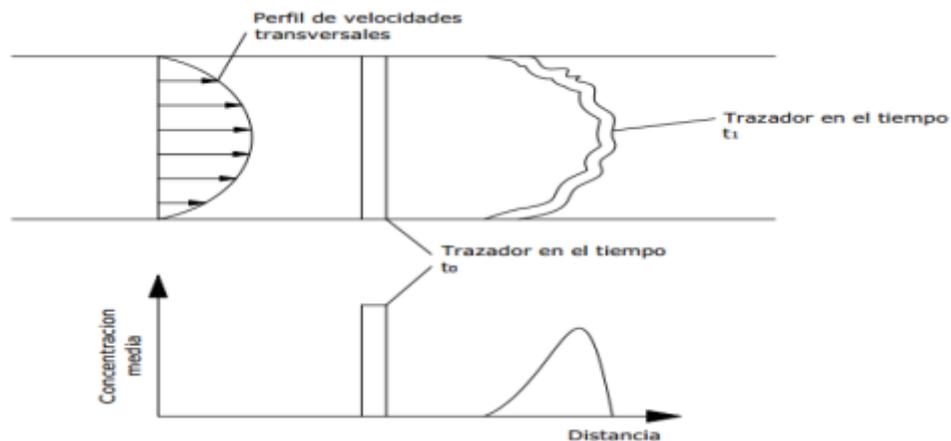


Figura 130: Diagrama esquemático que muestra el efecto de la dispersión por corte en la mezcla longitudinal de un contaminante (Rutherford, 1994).

6.2.2 Metodologías para determinar experimentalmente el coeficiente de dispersión

6.2.2.1 Determinación del coeficiente de mezcla longitudinal mediante el uso de trazadores

La determinación del coeficiente de mezcla longitudinal mediante el uso de trazadores, consiste en inyectar un trazador en el flujo (por ejemplo, fluoresceína) e ir midiendo la concentración del mismo en diferentes

localizaciones a intervalos regulares de tiempo. Es importante tener en cuenta a la hora de elegir un trazador que el mismo no sea contaminante y que tenga un límite de detección bajo (la mayoría de los instrumentales detectan correctamente concentraciones mayores a $0,1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$).

Los pasos requeridos para realizar este ensayo son:

- Elegir un tramo del río a medir, es importante que el mismo sea lo más recto posible (para evitar la aparición de efectos producidos por las curvas), que tenga los bordes libres de vegetación (ya que las ramas de las plantas y/o árboles perturban el flujo) y que sea accesible.
- Calcular la cantidad necesaria de trazador a utilizar, esto dependerá del caudal, velocidad del río y de la concentración mínima que puede ser detectada, por lo que es necesario un aforo de caudal y su caracterización hidrodinámica (distribución de velocidades).
- Seleccionar las secciones de medición, por lo menos dos. La distancia entre estas secciones dependerá de las características del flujo en el tramo a medir, de la concentración límite que puede ser detectada y de la distancia necesaria para que haya un cambio notable en la concentración de trazador. Es importante asegurarse que en estos puntos el trazador se haya mezclado completamente en la transversal y vertical.
- Definir el intervalo de tiempo en el cual se medirán las concentraciones. Al igual que el punto anterior esto dependerá de las características del flujo en el tramo a medir, de la concentración límite que puede ser detectada y del tiempo necesario para que haya un cambio notable en la concentración de trazador.
- Inyectar el trazador, lo más recomendable es en el centro del río, para garantizar una mejor dispersión (Figura 131). Se debe inyectar trazador hasta que en los puntos de medición exista mezcla completa transversal y vertical.
- Tomar muestras en las secciones de medición en los intervalos de tiempo definidos anteriormente.
- Calcular la concentración de trazador en cada una de las muestras. Si se usa fluoresceína, se debe utilizar un fluorómetro para realizar esta tarea.

CAPÍTULO VI – DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS NECESARIOS PARA EVALUAR LOS PROCESOS DE MEZCLA

- Calcular el coeficiente de mezcla longitudinal mediante el método de los momentos. (Martin y McCutcheon, 1999)

A pesar de que esta técnica, si es realizada correctamente, permite obtener un valor preciso del coeficiente de dispersión, tiene las siguientes desventajas:

- Es difícil de ejecutar, ya que se debe asegurar la mezcla completa transversal y vertical en los puntos de medición (implica una gran cantidad de trazador), la toma correcta de la muestra, la medición adecuada de las concentraciones, etc.
- El resultado obtenido solo es válido para las condiciones de flujo existentes al momento de realizar el ensayo.
- Los estudios de trazadores requieren una gran inversión en planificación, personal y análisis posterior (Carr y Rehmann, 2007).

Por ello se recomienda la estimación indirecta de este coeficiente a través de parámetros hidrodinámicos obtenidos de una caracterización hidrodinámica detallada utilizando los datos de los aforos periódicos que se realizan en el río.

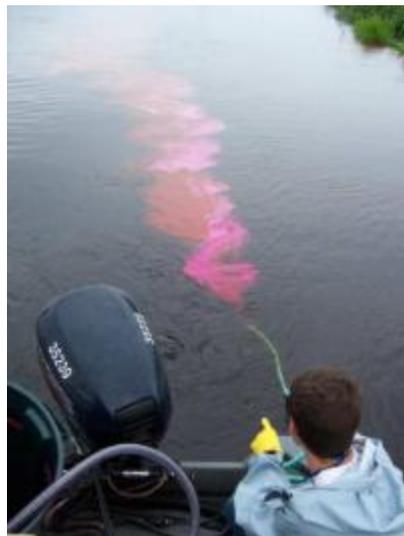


Figura 131: Inyección de trazador (Carr y Rehmann, 2007)

6.2.2.2 Determinación del coeficiente de dispersión longitudinal mediante ecuaciones que incluyen parámetros hidráulicos globales.

Existen en la bibliografía ecuaciones empíricas que permiten estimar el coeficiente de dispersión longitudinal en base a parámetros hidráulicos globales de una sección de aforo (Fischer, 1979). El uso de estas ecuaciones es generalizado debido a la mayor disponibilidad de este tipo de datos en diferentes secciones de diferentes ríos.

La primera ecuación empírica para la determinación del coeficiente de mezcla longitudinal fue la ecuación de Taylor (1954), quien estimó este coeficiente para el flujo en una tubería (ecuación 6) como.

$$D = 10,1 u^* r \quad (6)$$

Donde D es el coeficiente de mezcla longitudinal debido a la dispersión longitudinal por corte, u^* es la velocidad de corte y r es el radio de la tubería.

Posteriormente Elder (1959) desarrolló una ecuación para estimar el coeficiente de mezcla longitudinal para un flujo uniforme en un canal infinitamente ancho con un perfil logarítmico de distribución de velocidades en la vertical (ecuación 7).

$$D = 5,93 u^* H_{med} \quad (7)$$

Donde H_{med} es la profundidad media del flujo y $u^* = \sqrt{gR_h S}$, donde S es la pendiente de energía del flujo y R_h el radio hidráulico de la sección. Desafortunadamente, esta ecuación no describe correctamente la dispersión en corrientes naturales (Fischer, 1979), ya que no considera la distribución de velocidades en la transversal. Por último Fischer (1979) obtuvo una ecuación integral (ecuación 8) para el cálculo del coeficiente de mezcla longitudinal en base a las simplificaciones en la ecuación de dispersión-advección realizadas por Taylor (1954).

$$D = -\frac{1}{A} \int_0^B u'(y)h(y) \int_0^y \frac{1}{\varepsilon_t h(y)} \int_0^y u'(y)h(y) dy dy dy \quad (8)$$

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

La ecuación 25 asume un flujo unidimensional, es decir que el contaminante debe estar bien mezclado tanto en la vertical como en la transversal. Debido a esta limitación, esta ecuación sólo puede ser utilizada en zonas donde no hay recirculación o donde no hay fuertes corrientes secundarias. Además, esta ecuación asume que el esfuerzo de corte transversal es quien gobierna el proceso de mezcla y no el esfuerzo de corte en la vertical, por lo tanto solo puede ser aplicada a ríos donde el ancho (B) sea mucho mayor que la profundidad media (H_{med}). Por último, cabe decir que esta ecuación supone que

el mecanismo de dispersión longitudinal por corte predomina sobre los demás mecanismos de mezcla.

La ecuación 8, además, requiere una caracterización hidrodinámica detallada, lo cual no es común de encontrar en la actualidad. Fischer (1979) desarrolló una ecuación simplificada para el cálculo del coeficiente de dispersión longitudinal utilizando únicamente parámetros globales de la sección. La misma proviene de una serie de hipótesis y simplificaciones adoptadas en la ecuación 8, las cuales serán detalladas a continuación.

La ecuación 8 puede ser reescrita del siguiente modo (ecuación 9)

$$D = \frac{\overline{u'^2} B_l^2}{\bar{\varepsilon}_t} \quad (9)$$

Donde $\overline{u'^2}$ es el promedio del cuadrado de las fluctuaciones de velocidad con respecto a la velocidad media, B_l es la distancia característica asociada a la distribución de velocidades transversales, ε_t es el coeficiente de mezcla transversal promedio de la sección e I es el coeficiente determinado por la ecuación 10.

$$I = - \int_0^1 h'(y) u''(y) \int_0^{y'} \frac{1}{h'(y) \varepsilon_t'(y)} \int_0^{y'} h'(y) u''(y) dy' dy' dy' \quad (10)$$

En la ecuación 10 las variables adimensionales están definidas como

$$h' = \frac{h(y)}{H_{med}} \quad (11)$$

$$y' = \frac{y}{B} \quad (12)$$

$$u'' = \frac{u'}{\sqrt{u'^2}} \quad (13)$$

$$\varepsilon_t' = \frac{\varepsilon_t}{\bar{\varepsilon}_t} \quad (14)$$

Fischer (1979) adoptó valores aproximados basados en la experiencia y experimentos de campo y laboratorio, los cuales reemplazó en la ecuación 9. Estos son:

$$I = 0,07 \quad (15)$$

$$\frac{\overline{u'^2}}{u^2} = 0,2 \quad (16)$$

$$B_l = 0,7B \quad (17)$$

$$\bar{\varepsilon}_t = 0,6 H_{med} u^* \quad (18)$$

CAPÍTULO VI – DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS NECESARIOS PARA EVALUAR LOS PROCESOS DE MEZCLA

El coeficiente 0,6 de la ecuación 18 tiene en cuenta la influencia en la mezcla de las curvas (poco pronunciadas), rugosidad de las márgenes, y otras irregularidades presentes en cauces naturales. Finalmente, se obtiene la ecuación simplificada de Fischer (ecuación 19)

$$D = 0,011 \frac{U^2 B^2}{H_{med} U^*} \quad (19)$$

En donde, U es la velocidad media de la sección, H_{med} la profundidad media de la sección, B el ancho de la sección, u^* es la velocidad de corte media de la sección, g es la aceleración de la gravedad, R_h es el radio hidráulico medio y S es la pendiente media de energía.

Desde que Fischer (1979) propuso la ecuación 19, esta ha sido utilizada en gran cantidad de corrientes naturales. Sin embargo ha sido criticada debido al hecho de que producía resultados incorrectos del coeficiente de mezcla (Seo y Baek, 2004), ya que fue calibrada en base a la experiencia y experimentos realizados por Fischer sobre diferentes ríos de Estados Unidos. Es por ello que diferentes autores desarrollaron diversas fórmulas para estimar el coeficiente de mezcla longitudinal para las condiciones de flujo existentes en los ríos donde trabajaron. Las fórmulas propuestas son de la forma:

$$\frac{D}{H_{med} U^*} = a \left(\frac{U}{u^*} \right)^b \left(\frac{B}{H_{med}} \right)^c \quad (20)$$

Donde D es el coeficiente de dispersión longitudinal, H_{med} la profundidad media, u^* la velocidad de corte, U velocidad media de la sección y B ancho de la sección. Los coeficientes a, b y c propuestos por diferentes autores en la ecuación 20 son presentados en la Tabla 27

Tabla 27: Valores de los coeficientes de la ecuación 20 (Seo y Baek, 2004)

Formula	a	b	c
Elder (1959)	5,930	0,00	0,00
Fischer (1979)	0,011	2,00	2,00
Liu (1977)	0,180	0,50	2,00
Iwasa y Aya (1991)	2,000	0,00	1,50
Seo y Cheong (1998)	5,920	1,43	0,62
Koussis y Rodríguez-Mirasol (1998)	0,600	0,00	2,00

Debido al gran error que produce en la estimación del coeficiente de dispersión el uso de las ecuaciones simplificadas, es que se propone en esta tesis realizar una estimación más precisa del mismo utilizando la ecuación integral (ecuación 8) con una caracterización hidrodinámica detallada, de la cual se detallará en la sección 6.2.2.3.

6.2.2.3 Determinación del coeficiente de dispersión longitudinal mediante la ecuación integral con caracterización hidrodinámica detallada.

Como ya fue mencionado, Fischer (1979) obtuvo una ecuación integral (ecuación 8) para el cálculo del coeficiente de mezcla longitudinal en base a las simplificaciones en la ecuación de dispersión-advección realizadas por Taylor (1959).

A partir de la gran resolución espacial de la sección que proveen los ADCPs, es posible utilizar la ecuación integral propuesta por Fischer (1979) para obtener una estimación más precisa del coeficiente de dispersión longitudinal. Para utilizar esta ecuación es necesario hacer un procesamiento de los datos registrados con ADCP, ya que los mismos no están equiespaciados en la transversal, presentan ruido Doppler y fluctuaciones debido a la turbulencia presente en el flujo, lo que puede afectar la estimación del coeficiente de dispersión longitudinal (D). Una opción para solucionar este inconveniente que se propone en esta tesis es ajustar perfiles a dichos datos relevados.

Para aplicar la ecuación integral presentada por Fischer, se aproximan los valores de velocidad en la transversal a través de una función continua de distribución de velocidades. Una de las distribuciones de velocidades adoptada para un sistema fluvial es aquella presentada por Seo y Baek (2004) (ecuación 21), la cual genera una distribución de velocidades a partir de distribuciones gamma.

$$\frac{u(y)}{U} = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{y}{B}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{y}{B}\right)^{\beta-1} \quad (21)$$

Donde α y β son parámetros de la distribución gamma, $u(y)$ es la velocidad en la progresiva y , y U es la velocidad promedio de la sección. Cuando $\alpha = \beta$ la distribución es simétrica, pero cuando $\alpha > \beta$ la curva se sesga hacia la derecha, y cuando $\alpha < \beta$ la curva se sesga hacia la izquierda. En la Figura 132 se presentan los distintos perfiles de velocidad generados en base a la distribución gamma mencionada con distintas alternativas de parámetros.

Como se mencionó, si bien por simplicidad se adopta que α y β tengan el mismo valor, es posible que se presenten situaciones en las que claramente las velocidades estén sesgadas hacia alguno de los márgenes. En la Figura 133 se presenta una distribución de velocidades con $\alpha < \beta$.

La geometría del cauce de la sección puede ser ajustada a una distribución dada por la ecuación 22 (Deng et al. 2001), tal que:

$$\frac{h(y)}{H_m} = 1 - \left[\frac{2y}{B} - 1\right]^\rho \quad (22)$$

CAPÍTULO VI – DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS NECESARIOS PARA EVALUAR LOS PROCESOS DE MEZCLA

En donde $h(y)$ es la profundidad en la progresiva y , H_m es la profundidad máxima, B es el ancho total de la sección y ρ es el parámetro que determina la forma de la función. Al ir variando ρ se obtienen diferentes perfiles de fondo, teniéndose que para $\rho=1$ el perfil es triangular, para $\rho=2$ es parabólico, y para valores mayores de ρ el perfil va tomando una forma cada vez más rectangular, dándose en la práctica que el perfil rectangular puede aproximarse con un error despreciable tomando $\rho=1000000$, aunque teóricamente el rectángulo se alcanza si ρ tiende al infinito (Figura 134).

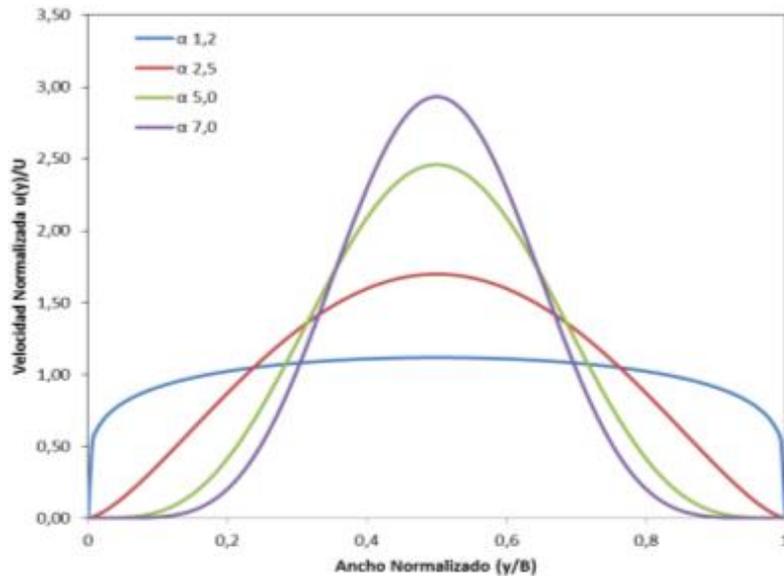


Figura 132: Perfil de velocidades en función del coeficiente alfa ($\alpha = \beta$)

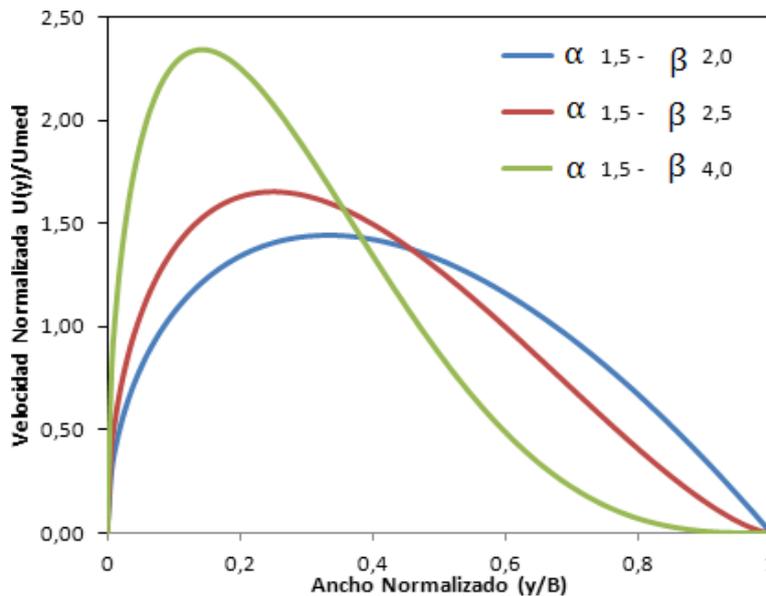


Figura 133: Distribución asimétrica de velocidades, con $\alpha < \beta$.

CAPÍTULO VI – DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS NECESARIOS PARA EVALUAR LOS PROCESOS DE MEZCLA

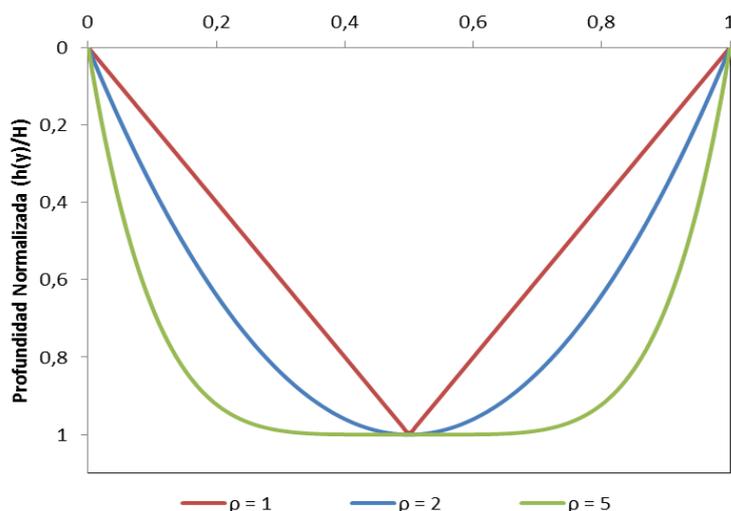


Figura 134: Geometría del Cauce en función del coeficiente rho.

6.3. Determinación del coeficiente de dispersión longitudinal

6.3.1 Aplicación de las ecuaciones empíricas para determinar el coeficiente de dispersión longitudinal.

Al aplicar las ecuaciones empíricas mostradas en la sección 6.2.2.2, se utilizan únicamente los parámetros globales del río, sin tener en cuenta los patrones hidrodinámicos en cada sección. En la Tabla 28 se muestran los coeficientes de dispersión longitudinal (D) obtenidos con esta forma. Se puede observar que los valores son muy dispersos entre sí, es por ello que se requiere llevar a cabo la resolución de la ecuación integral (ecuación 8) mediante una hidrodinámica detallada para obtener una mejor estimación del coeficiente de dispersión longitudinal.

Tabla 28: Valores de coeficiente de dispersión obtenidos mediante diferentes ecuaciones empíricas

Fecha	Sección	ε	D (Elder) [m ² /s]	D (Fischer) [m ² /s]	D (Liu) [m ² /s]	D (Iwasa y Aya) [m ² /s]	D (Seo y Cheong) [m ² /s]	D (Koussis y R. M) [m ² /s]	Q [m ³ /s]
11/06/2012	Bal. Río Tercero	0,0308	0,30	161,86	81,82	39,28	97,64	85,58	17,22
10/09/2012	Bal Río Tercero	0,0271	0,27	167,57	85,57	39,46	89,98	89,80	14,79
12/11/2012	Bal. Río Tercero	0,0300	0,30	199,73	96,29	43,59	105,14	99,12	18,51
11/06/2013	Río Saladillo – Ruta 6	0,0257	0,25	57,38	15,67	9,33	87,26	13,35	14,84
10/09/2013	Río Saladillo – Ruta 6	0,0202	0,20	36,95	13,67	8,55	54,72	12,88	9,21
30/09/2013	Río Carcarañá (Carcarañá)	0,0646	0,64	46,70	41,54	32,75	81,65	52,45	32,32
30/09/2013	Río Carcarañá (Cruz Alta)	0,0417	0,41	140,55	71,00	38,09	115,25	74,25	33,53
30/09/2013	Río Saladillo – Ruta 6	0,0231	0,23	62,20	16,10	9,14	85,51	13,47	13,75
19/11/2013	Río Saladillo – Ruta 6	0,0277	0,27	47,55	14,46	9,18	81,68	12,76	14,75
19/11/2013	Río Carcarañá (Carcarañá)	0,1009	1,00	87,68	53,07	39,97	166,27	58,95	72,97

CAPÍTULO VI – DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS NECESARIOS PARA EVALUAR LOS PROCESOS DE MEZCLA

Fecha	Sección	ϵ	D (Elder) [m ² /s]	D (Fischer) [m ² /s]	D (Liu) [m ² /s]	D (Iwasa y Aya) [m ² /s]	D (Seo y Cheong) [m ² /s]	D (Koussis y R.M) [m ² /s]	Q [m ³ /s]
19/11/2013	Río Carcarañá (Inriville)	0,0315	0,31	191,30	55,59	25,75	141,02	48,35	28,12
20/11/2013	Arroyo Tortugas Río Tercero	0,0963	0,95	9,05	5,42	7,12	80,09	6,00	24,22
10/06/2013	(Ctalamochita) - Bell Ville	0,0380	0,37	98,08	20,62	11,83	155,40	16,09	29,11
10/06/2013	Río Saladillo	0,0529	0,52	69,14	16,14	10,98	165,56	13,05	38,48
10/06/2014	Río Carcarañá - Inriville	0,0711	0,70	202,42	56,35	31,54	257,41	48,31	74,62

6.3.2 Aplicación de la ecuación integral para estimar el coeficiente de mezcla longitudinal con caracterización hidrodinámica detallada.

6.3.2.1 Promediado de transectas.

Al realizar una medición con ADCP, los perfiles transversales de velocidades de flujo presentan fluctuaciones debidas al ruido Doppler y a la presencia de perturbaciones turbulentas. Para reducir el error producido por estas fluctuaciones, se debió realizar un post-procesamiento de las transectas realizadas utilizando el programa VMT (sección 2.1.4.1.2). Este post-procesamiento realiza un promediado espacial de las múltiples transectas dando como resultado un campo medio de flujo.

En la Figura 135 y Figura 136 se muestran las diferencias obtenidas de utilizar una transecta por separado, o bien, el promedio de todas las transectas de cada campaña en cada sección.

La reducción de las fluctuaciones de la velocidad y de las profundidades permite una mejor estimación del coeficiente de dispersión longitudinal (D).

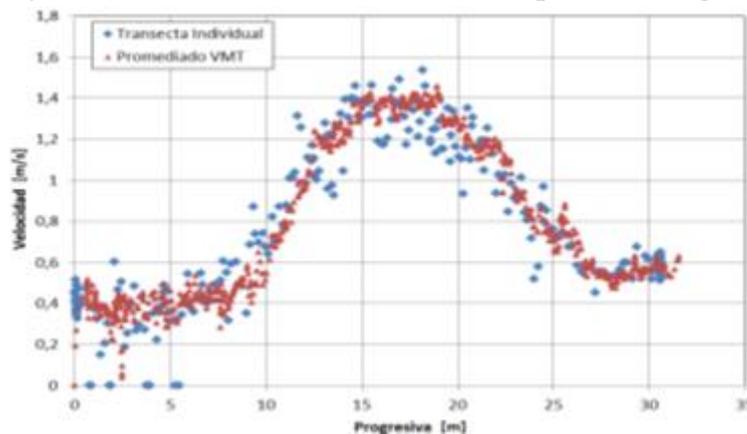


Figura 135: Comparación entre valores de velocidades medias en la vertical registradas en una transecta obtenida al promediar múltiples transectas, realizadas en sección sobre el río Tercero (Ctalamochita) en el balneario de la localidad homonima, campaña de medición del día 11/06/2012.

CAPÍTULO VI – DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS NECESARIOS PARA EVALUAR LOS PROCESOS DE MEZCLA

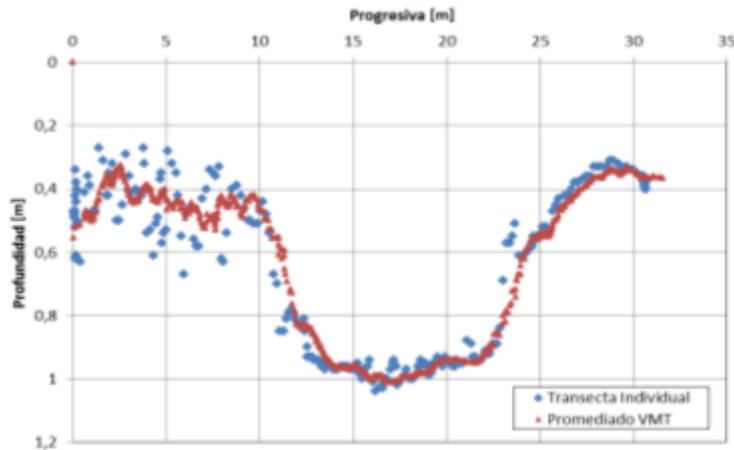


Figura 136: Comparación entre batimetrías registradas en una transecta obtenida al promediar múltiples transectas, realizadas en sección sobre el río Tercero (Ctalamochita) en el balneario de la localidad homonima, campaña de medición del día 11/06/2012

6.3.2.2 Resultados obtenidos ajustando perfiles analíticos sobre las secciones promediadas

A partir de las secciones medias y los campos de flujos medios registrados con ADCP, se aplicó la ecuación integral propuesta por Fischer (1979) en base a las distribuciones de velocidad y geometría del fondo detalladas en las ecuaciones 21 y 22.

En la Tabla 29 se muestran los resultados que se obtuvieron de aplicar dichas ecuaciones sobre cada una de las secciones adoptando iguales valores de los parámetros α y β en la ecuación. En las Figura 137 a Figura 151 se muestran los ajustes realizados, en donde los puntos de color azul se corresponden con los valores observados y la línea de color rojo representa la función de interpolación.

Tabla 29: Estimación del coeficiente de dispersión longitudinal en base a la ecuación integral de Fischer (1979).

Fecha	Sección	$\alpha=\beta$	ρ	D [m ² /s]	Q [m ³ /s]
11/06/2012	Balneario Río Tercero	1,821	1,455	43,85	17,22
10/09/2012	Balneario Río Tercero	1,260	1,528	6,27	14,79
12/11/2012	Balneario Río Tercero	1,457	2,072	11,30	18,51
11/06/2013	Río Saladillo – Ruta 6	1,180	1,212	0,38	14,84
10/09/2013	Río Saladillo - Ruta 6	1,172	1,404	0,19	9,21
30/09/2013	Río Carcarañá (Carcarañá)	2,244	3,070	24,58	32,32
30/09/2013	Río Carcarañá (Cruz Alta)	1,800	1,192	30,83	33,53
30/09/2013	Río Saladillo - Ruta 6	1,247	1,087	0,99	13,75
19/11/2013	Río Saladillo - Ruta 6	1,149	1,898	0,20	14,75
19/11/2013	Río Carcarañá (Carcarañá)	1,411	10,745	11,70	72,97
19/11/2013	Río Carcarañá (Inrville)	1,457	14,837	28,02	28,12
20/11/2013	Arroyo Tortugas – Ruta 9	1,519	5,061	1,68	24,22
10/06/2013	Río Tercero Bell Ville	1,682	2,832	18,13	29,11
10/06/2014	Río Saladillo - Ruta 6	1,160	2,020	0,35	38,48
10/06/2014	Río Carcarañá - Inrville	1,709	7,432	55,77	74,62

CAPÍTULO VI – DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS NECESARIOS PARA EVALUAR LOS PROCESOS DE MEZCLA

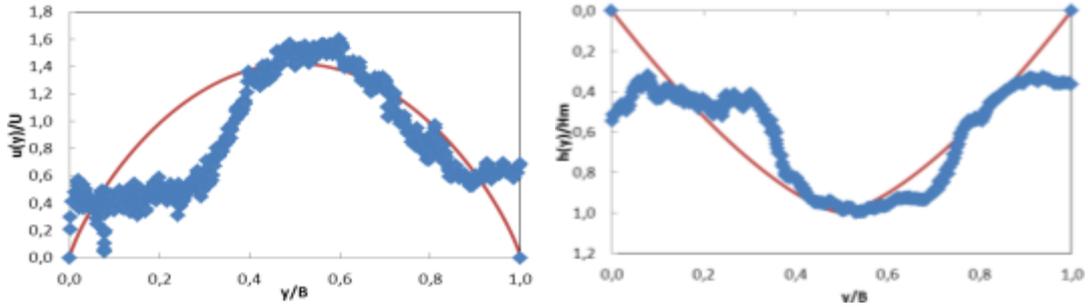


Figura 137: Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,821$ (derecha) y perfil de fondo con $\rho = 1,455$ (izquierda) para Río Tercero (Ctalamochita) en el balneario de la ciudad homónima, 11/06/2012.

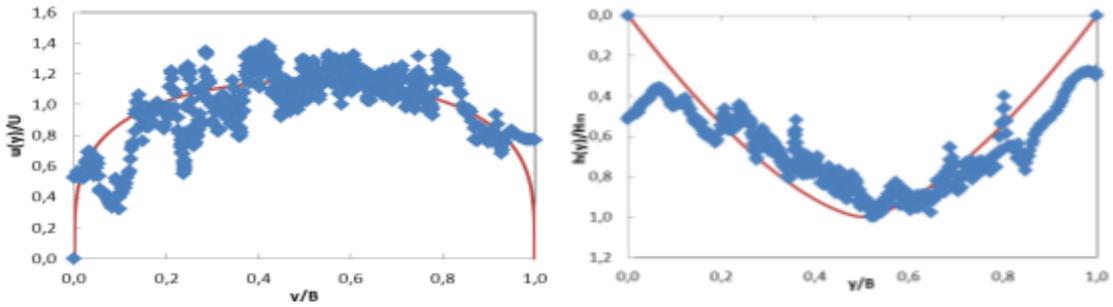


Figura 138: Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,112$ (derecha) y perfil de fondo con $\rho = 1,582$ (izquierda) para Río Tercero (Ctalamochita) en el balneario de la ciudad homónima, 10/09/2012.

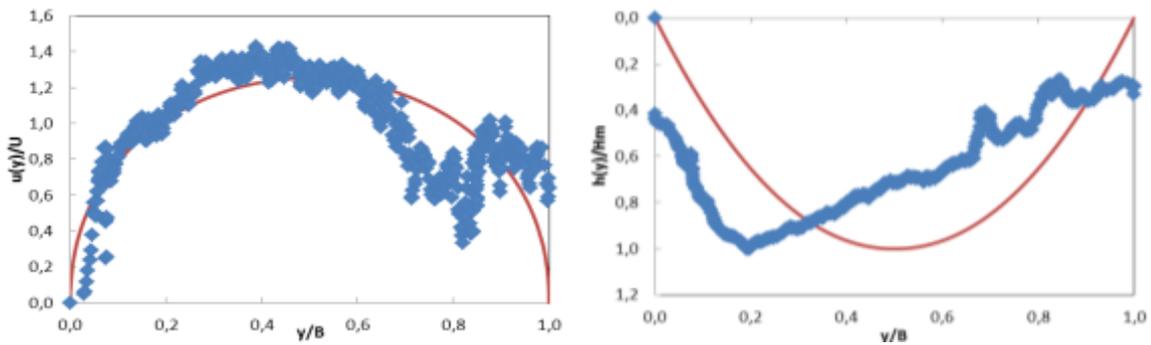


Figura 139: Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,457$ (derecha) y perfil de fondo con $\rho = 2,072$ (izquierda) para Río Tercero (Ctalamochita) en el balneario de la ciudad homónima, 12/11/2012.

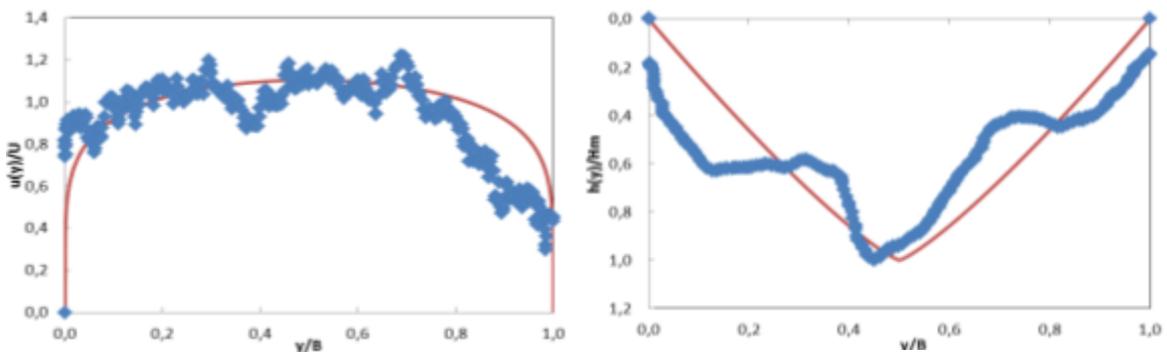


Figura 140: Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,180$ (derecha) y perfil de fondo con $\rho = 1,212$ (izquierda) para Río Saladillo (ruta 6), 11/06/2013.

CAPÍTULO VI – DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS NECESARIOS PARA EVALUAR LOS PROCESOS DE MEZCLA

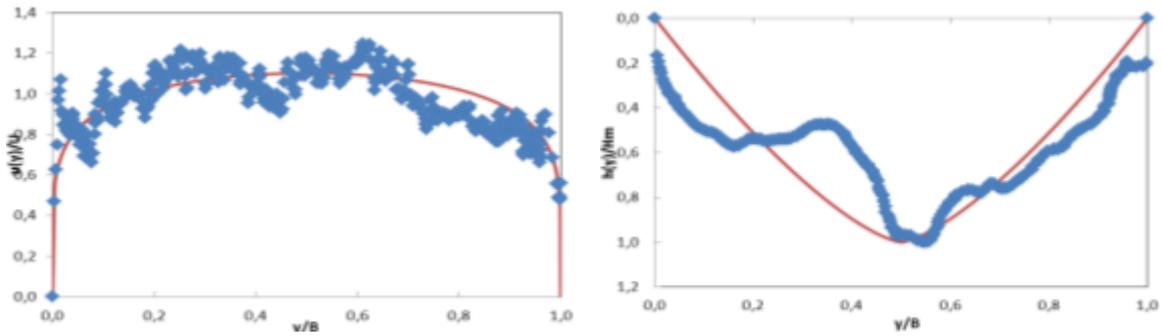


Figura 141: Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,172$ (derecha) y perfil de fondo con $\rho = 1,404$ (izquierda) para Río Saladillo (ruta 6), 11/09/2013.

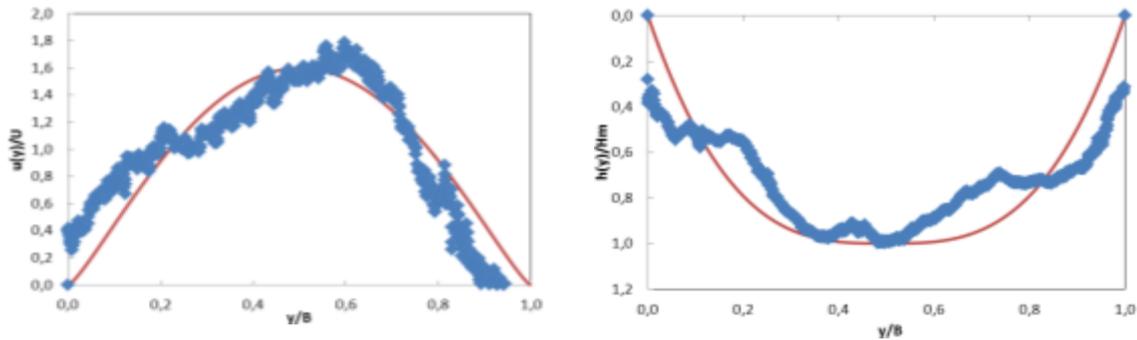


Figura 142: Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 2,244$ (derecha) y perfil de fondo con $\rho = 3,070$ (izquierda) para Río Carcarañá (Carcarañá), 30/09/2013.

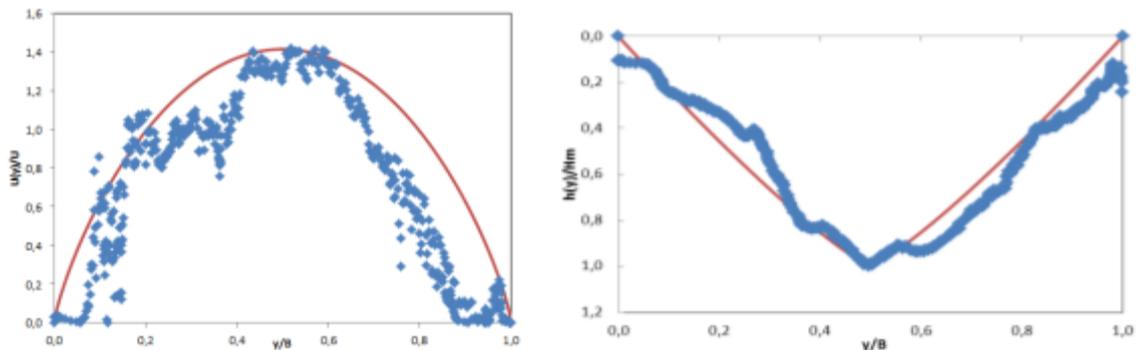


Figura 143: Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,800$ (derecha) y perfil de fondo con $\rho = 1,192$ (izquierda) para Río Carcarañá (Cruz Alta), 30/09/2013.

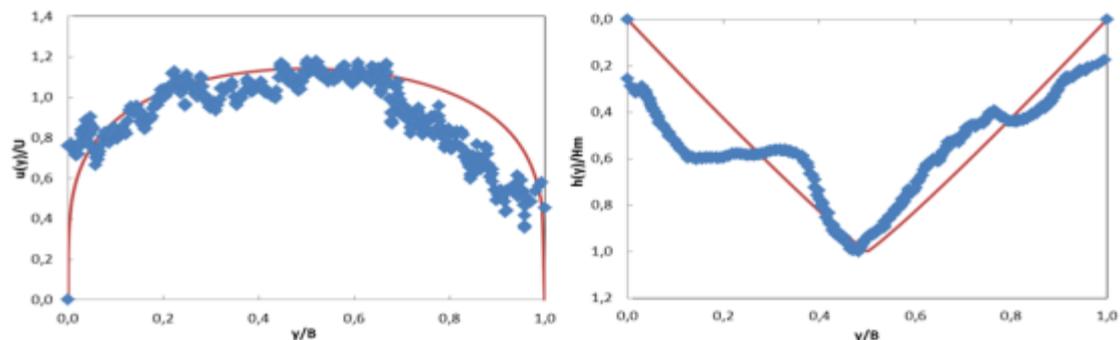


Figura 144: Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,247$ (derecha) y perfil de fondo con $\rho = 1,087$ (izquierda) para Río Saladillo (ruta 6), 30/09/2013.

CAPÍTULO VI – DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS NECESARIOS PARA EVALUAR LOS PROCESOS DE MEZCLA

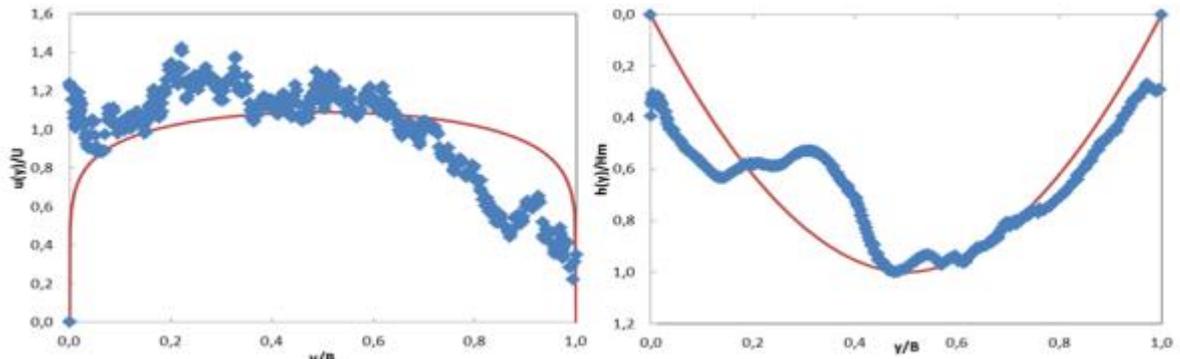


Figura 145: Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,149$ (derecha) y perfil de fondo con $\rho = 1,898$ (izquierda) para Río Saladillo (ruta 6), 19/11/2013.

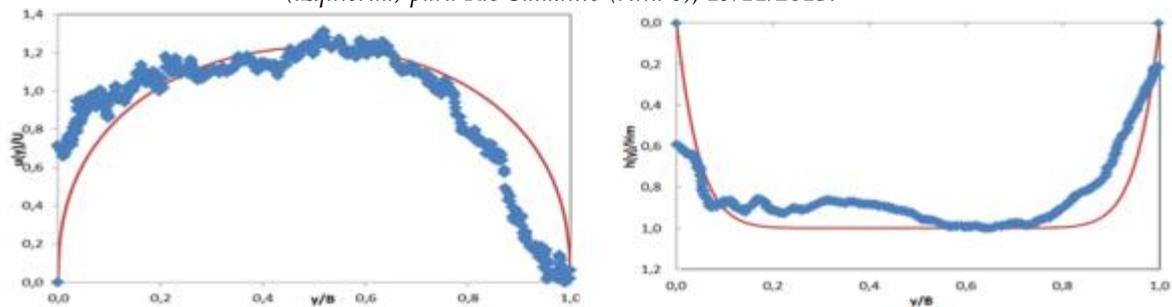


Figura 146: Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,411$ (derecha) y perfil de fondo con $\rho = 10,745$ (izquierda) para Río Carcarañá (Carcarañá), 19/11/2013.

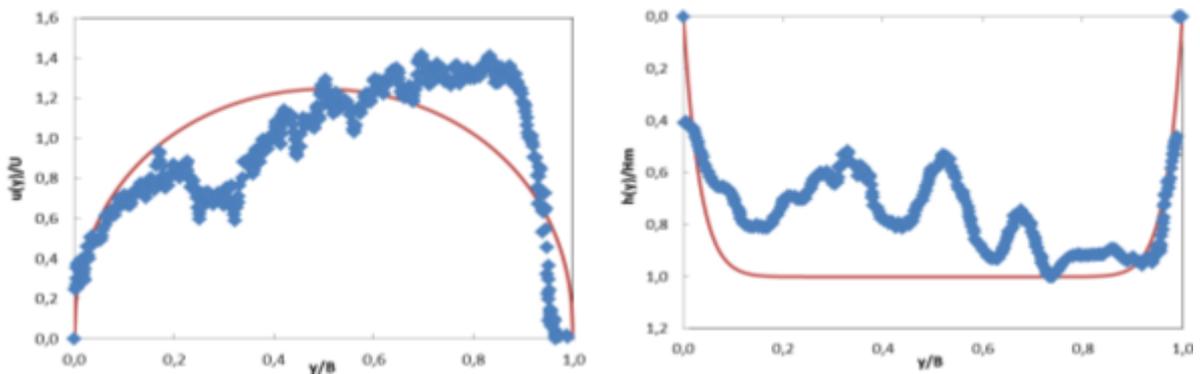


Figura 147: Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,457$ (derecha) y perfil de fondo con $\rho = 14,837$ (izquierda) para Río Carcarañá (Inriville), 19/11/2013.

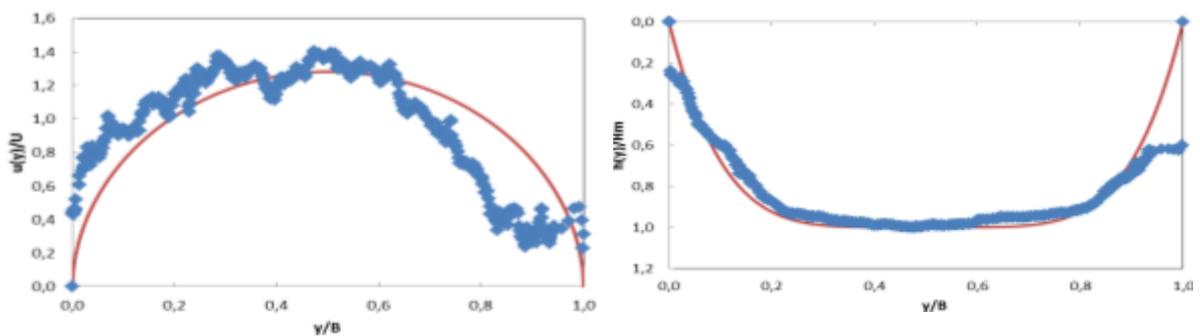


Figura 148: Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,519$ (derecha) y perfil de fondo con $\rho = 5,061$ (izquierda) para arroyo Tortugas (Tortugas – Santa Fe), 20/11/2013.

CAPÍTULO VI – DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS NECESARIOS PARA EVALUAR LOS PROCESOS DE MEZCLA

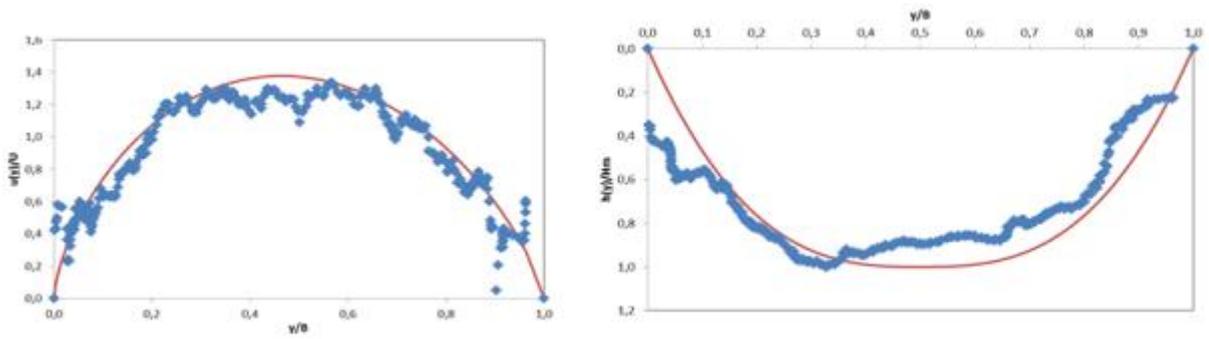


Figura 149: Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,821$ (derecha) y perfil de fondo con $\rho = 1,455$ (izquierda) para el Río Tercero (Ctalamochita) (Bell Ville), 10/06/2014.

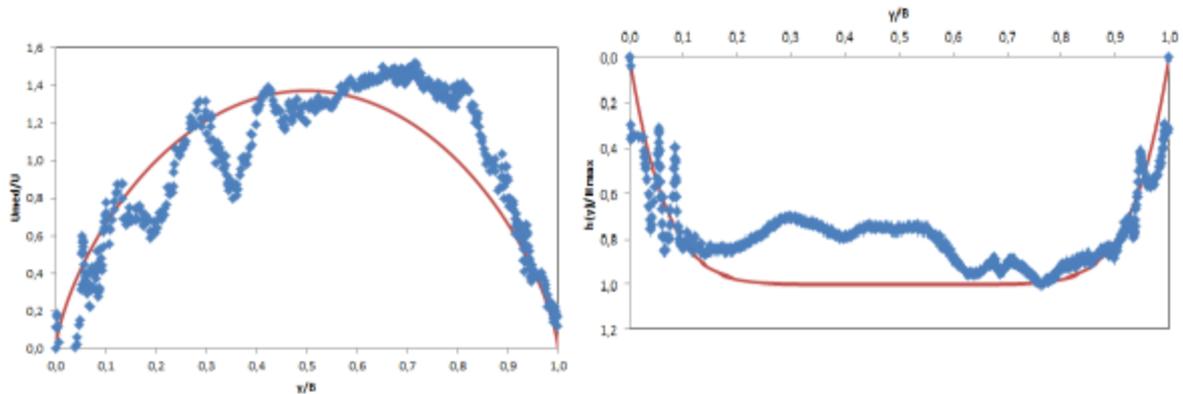


Figura 150: Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,709$ (derecha) y perfil de fondo con $\rho = 7,432$ (izquierda) para el para Río Carcarañá (Inrville), 10/06/2014.

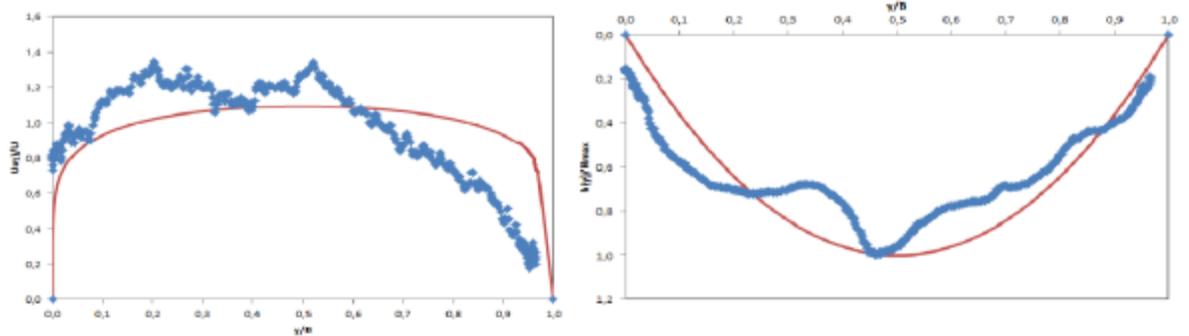


Figura 151: Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,709$ (derecha) y perfil de fondo con $\rho = 7,432$ (izquierda) para el para Río Saladillo (Ruta 6), 10/06/2014.

6.3.2.3 Resultados obtenidos ajustando perfiles analíticos de velocidad con α distinto de β y realizando ajustes polinómicos sobre los perfiles de fondo en las secciones promediadas

Como se pudo ver en la sección 6.3.2.2 las aproximaciones de fondo y velocidad en algunas secciones transversales no son del todo satisfactorias. Esto se debe a que los perfiles de velocidades y fondo en corrientes naturales adoptan cierta complejidad, la cual es difícil de aproximar utilizando una distribución transversal de velocidades en base a un parámetro α y un perfil de fondo en base a un parámetro ρ . Es por ello, que en las secciones donde las aproximaciones no fueron satisfactorias la aproximación de las velocidades se

CAPÍTULO VI – DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS NECESARIOS PARA EVALUAR LOS PROCESOS DE MEZCLA

realizó haciendo que el perfil analítico sea asimétrico, quitando un grado de libertad al considerar que α es distinto de β , mientras que la aproximación de los perfiles de fondo se realizó mediante funciones polinómicas (Figura 152 a Figura 164). Es importante destacar que aproximar perfiles de fondo con funciones polinómicas mejora los resultados obtenidos, pero tiene como contrapartida, la pérdida de generalidad del método.

En la Tabla 30 se muestran los coeficientes de dispersión longitudinales obtenidos mediante la metodología de ajuste detallada.

Tabla 30: Estimación del coeficiente de dispersión longitudinal en base a la ecuación integral propuesta por Fischer (1979) con un ajuste de perfiles de velocidad α distinto de β y ajuste polinómico del perfil de profundidades.

Fecha	Sección	D [m ² /s]	Q [m ³ /s]
11/06/2012	Río Tercero (Ctalamochita) – Balneario Río III	111,22	17,22
10/09/2012	Río Tercero (Ctalamochita) – Balneario Río III	54,59	14,79
12/11/2012	Río Tercero (Ctalamochita) – Balneario Río III	41,10	18,51
11/06/2013	Río Saladillo - Puente ruta 6	5,82	14,84
10/09/2013	Río Saladillo - Puente ruta 6*	1,00	9,21
30/09/2013	Río Carcarañá (Carcarañá)	49,84	32,32
30/09/2013	Río Carcarañá (Cruz Alta)	74,24	33,53
30/09/2013	Río Saladillo – Puente ruta 6	6,72	13,75
19/11/2013	Río Saladillo - Puente ruta 6**	-	14,75
19/11/2013	Río Carcarañá (Carcarañá)	39,37	72,97
19/11/2013	Río Carcarañá (Inriville)*	95,45	28,12
20/11/2013	Arroyo Tortugas – Puente ruta 9	6,01	24,22
10/06/2013	Río Tercero(Ctalamochita -) Bell Ville	33,57	29,11
10/06/2014	Río Saladillo – Puente ruta 6**	-	38,48
10/06/2014	Río Carcarañá - Inriville	171,18	74,62

* Sección en el cual el perfil analítico continuo de velocidades α igual a β ajustaba correctamente a la distribución de velocidades medida. Solo se ajustó el perfil de fondo mediante una función polinómica.

** Sección cuyo perfil de velocidades no pudo ser aproximado mediante un perfil analítico continuo de velocidades con α distinto de β debido el método de ajuste no converge a una solución.

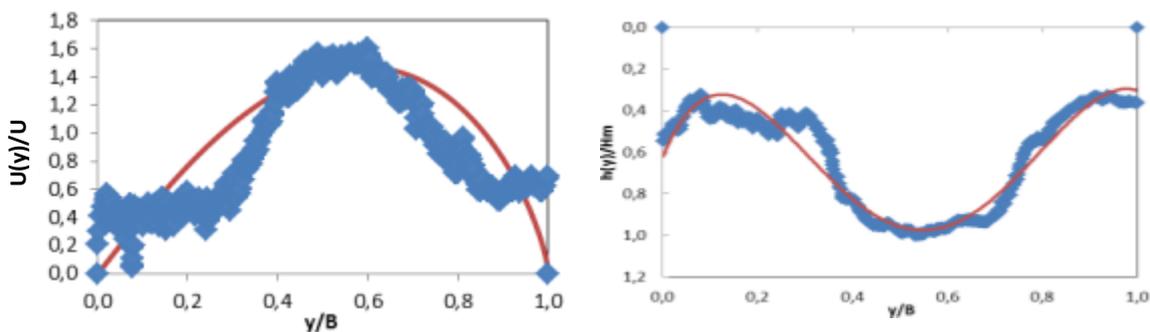


Figura 152 Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 2,057$ y $\beta = 1,763$ (derecha) y perfil de fondo con una función polinómica (izquierda) para río Tercero (Ctalamochita) en el balneario de la ciudad homonima, 11/06/2012.

CAPÍTULO VI – DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS NECESARIOS PARA EVALUAR LOS PROCESOS DE MEZCLA

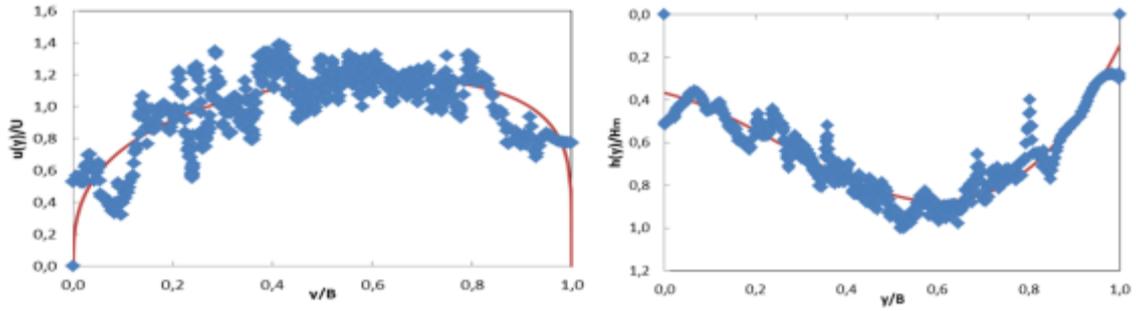


Figura 153: Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,352$ y $\beta=1,200$ (derecha) y perfil de fondo con una función polinómica (izquierda) para el río Tercero (Ctalamochita) en el balneario de la ciudad homónima(10/09/2012)

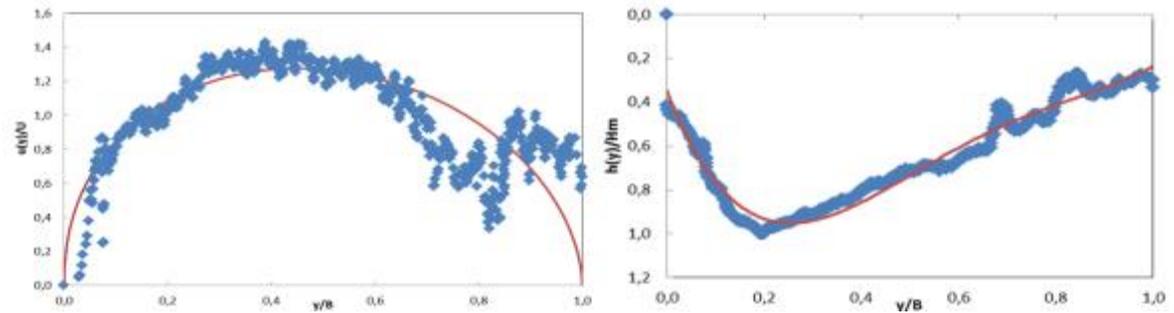


Figura 154: Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,451$ y $\beta=1,546$ (derecha) y perfil de fondo con una función polinómica (izquierda) para el río Tercero (Ctalamochita) en el balneario de la ciudad homónima(12/11/2012)

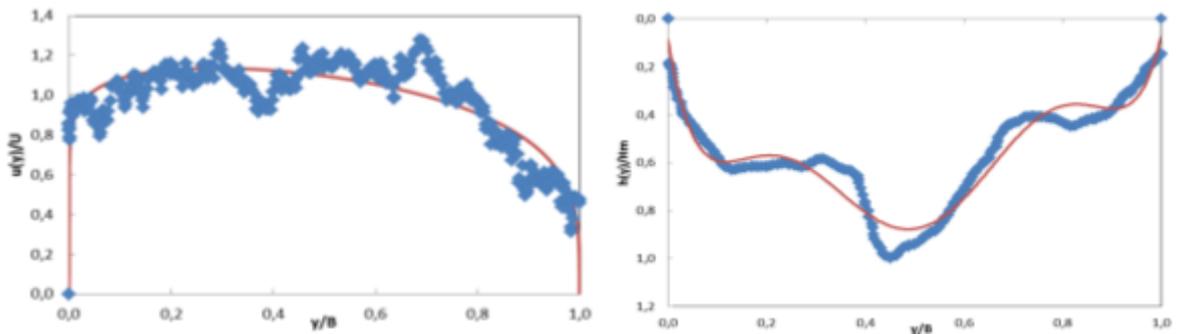


Figura 155: Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,102$ y $\beta=1,259$ (derecha) y perfil de fondo con una función polinómica (izquierda) para el río Saladillo (ruta 6) (11/06/2013).

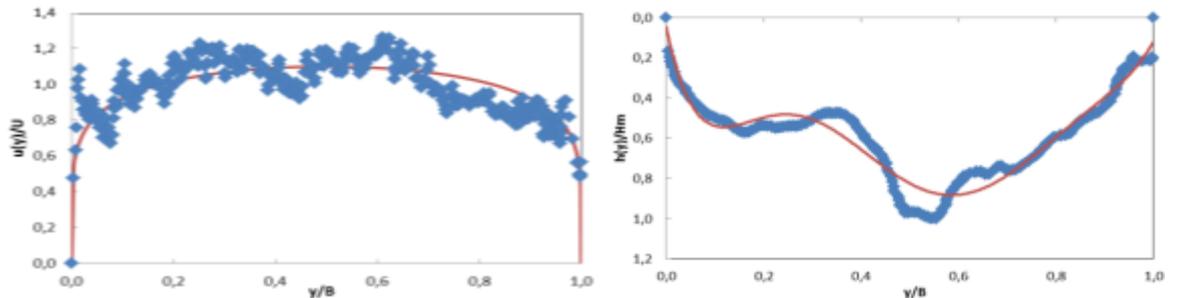


Figura 156: Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,172$ y $\beta=1,172$ (derecha) y perfil de fondo con una función polinómica (izquierda) para el río Saladillo (ruta 6) (10/09/2013).

CAPÍTULO VI – DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS NECESARIOS PARA EVALUAR LOS PROCESOS DE MEZCLA

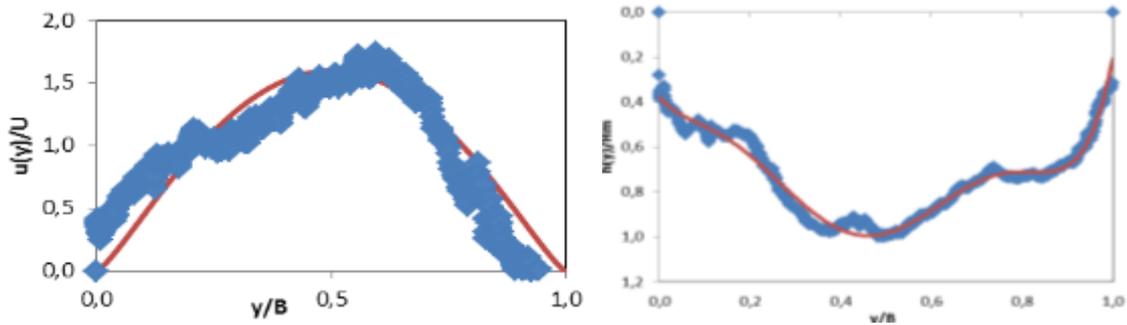


Figura 157: Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 2,244$ y $\beta = 2,244$ (derecha) y perfil de fondo con una función polinómica (izquierda) para el río Carcarañá (Carcarañá) (30/09/2013).

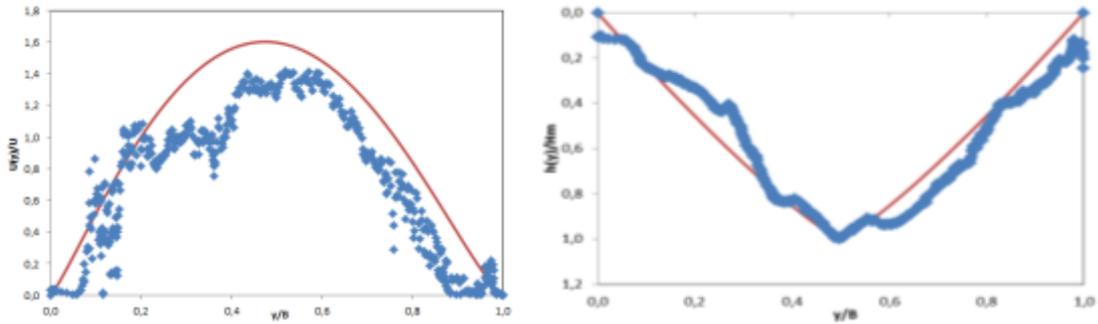


Figura 158: Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 2,180$ y $\beta = 2,309$ (derecha) y perfil de fondo con $\rho = 1,192$ para río Carcarañá (Cruz alta), 30/09/2013.

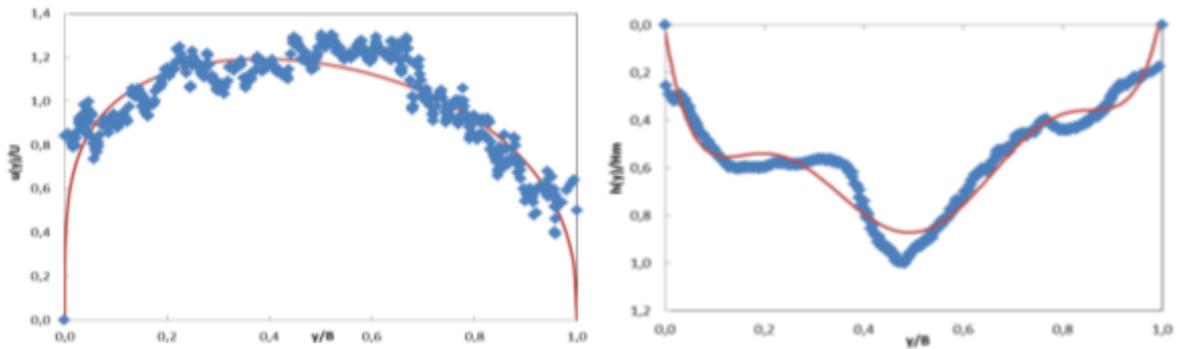


Figura 159: Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,242$ y $\beta = 1,391$ (derecha) y perfil de fondo con una función polinómica (izquierda) para el río Saladillo (ruta 6) (30/09/2013).

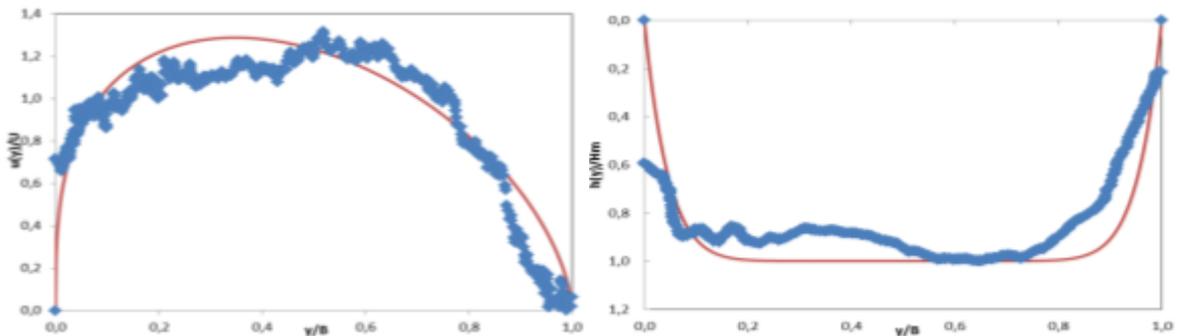


Figura 160: Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,324$ y $\beta = 1,608$ (derecha) y perfil de fondo con $\rho = 10,745$ (izquierda) para el río Carcarañá (Carcarañá) (19/11/2013).

CAPÍTULO VI – DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS NECESARIOS PARA EVALUAR LOS PROCESOS DE MEZCLA

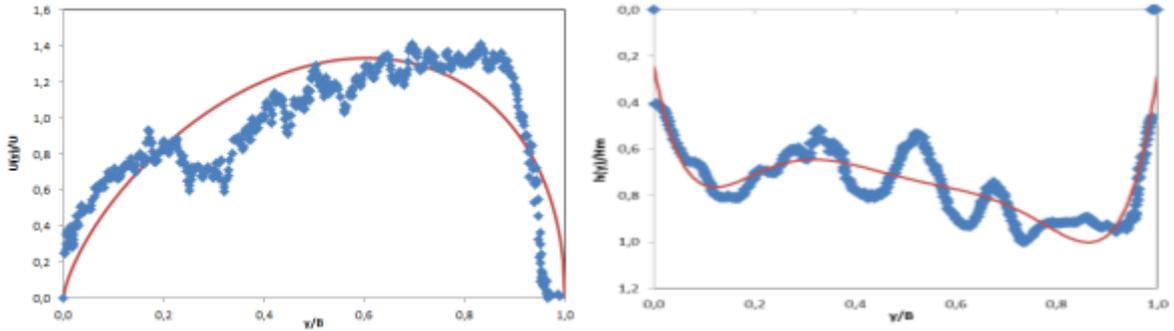


Figura 161: Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,712$ y $\beta=1,464$ (derecha) y perfil de fondo (izquierda) con funciones polinómica para río Carcarañá (Inriville), 19/11/2013.

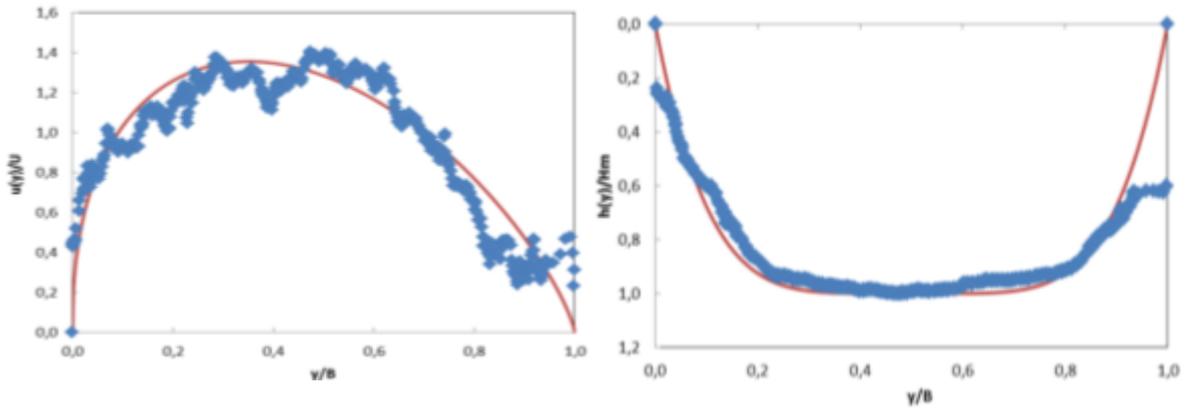


Figura 162: Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,483$ y $\beta=1,882$ (derecha) y perfil de fondo con $\rho = 5,061$ (izquierda) para el arroyo Tortugas (Tortugas – Santa Fe) (19/11/2013).

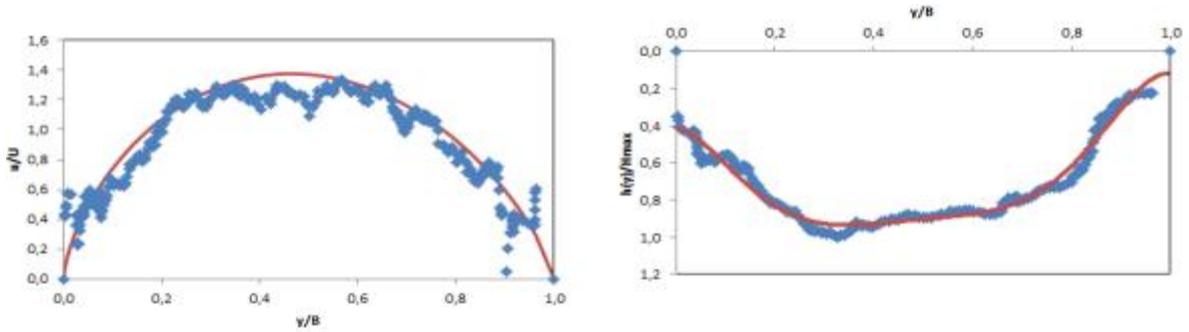


Figura 163: Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,662$ y $\beta=1,763$ (derecha) y perfil de fondo con funciones polinómicas (izquierda) para el río Tecero (Ctalamochita) -Bell Ville (10/06/2014).

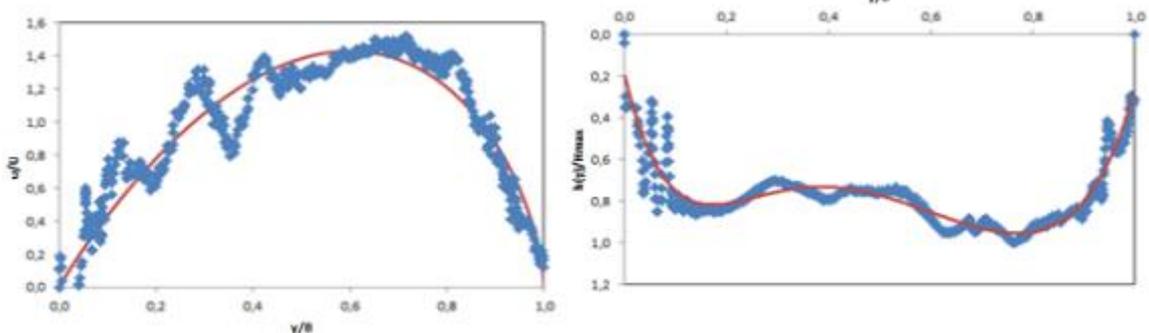


Figura 164: Ajuste de perfil de velocidades con $\alpha = 1,953$ y $\beta=1,637$ (derecha) y perfil de fondo con funciones polinómicas (izquierda) para el río Carcarañá (Inriville) (10/06/2014).

6.3.2.4 Resultados obtenidos ajustando polinomios para aproximar los perfiles de velocidad y profundidad

En aquellas secciones donde no fue posible ajustar la distribución de velocidades observada en campo mediante un perfil analítico continuo, se procedió a realizar este ajuste mediante el uso de perfiles polinómicos de velocidades, de igual manera que la efectuada con el perfil de fondo en la sección anterior (Figura 165 a Figura 169). Al igual que el ajuste de los perfiles de fondo con funciones polinómicas, el ajuste del perfil de velocidades mediante este tipo de funciones quita generalidad al método y dificulta la comparación entre los diferentes perfiles.

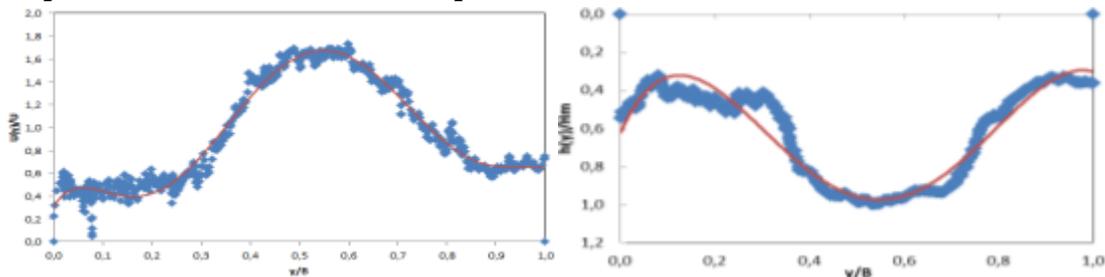


Figura 165 Ajuste de perfil de velocidades (derecha) y perfil de fondo (izquierda) con funciones polinómicas para el río Tercero (Ctalamochita) en el balneario de la ciudad homonima, 11/06/2012.

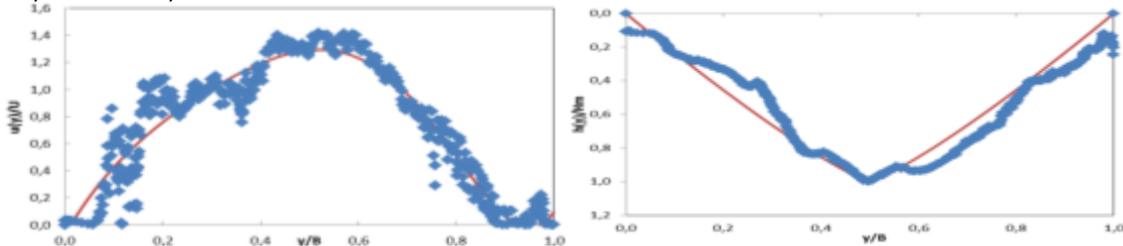


Figura 166: Ajuste de perfil de velocidades con una función polinómica (derecha) y perfil de fondo con $\rho = 1,192$ para río Carcaraña (Cruz alta), 30/09/2013.

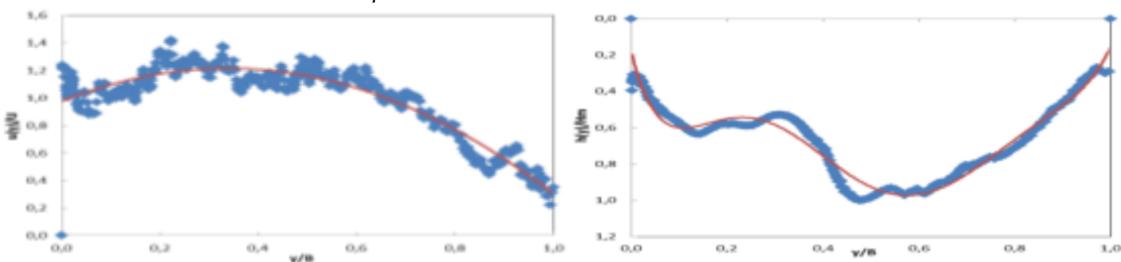


Figura 167: Ajuste de perfil de velocidades (derecha) y perfil de fondo (izquierda) con funciones polinómicas para el río Saladillo (ruta 6) (19/11/2013).

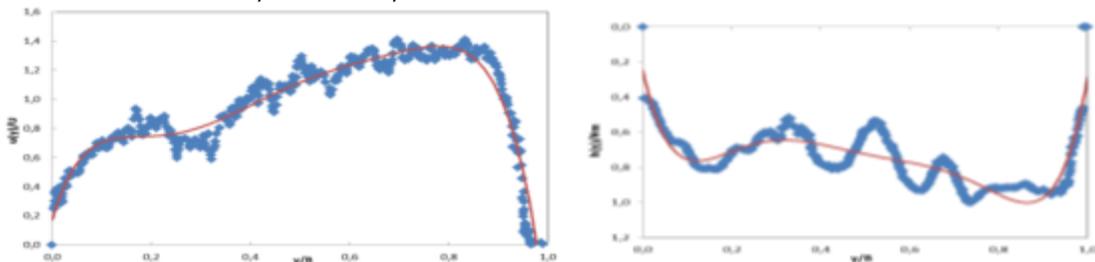


Figura 168: Ajuste de perfil de velocidades (derecha) y perfil de fondo (izquierda) con funciones polinómicas para río Carcaraña (Inrville), 19/11/2013.

CAPÍTULO VI – DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS NECESARIOS PARA EVALUAR LOS PROCESOS DE MEZCLA

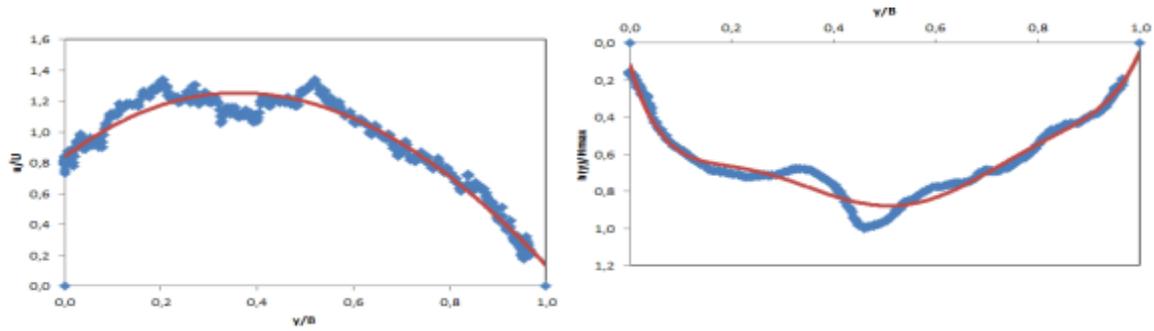


Figura 169: Ajuste de perfil de velocidades perfil de fondo con funciones polinómicas (izquierda) para el río Saladillo (Ruta 6) (10/06/2014).

En la Tabla 31 se presentan los resultados finales obtenidos del cálculo del coeficiente de dispersión longitudinal utilizando la mejor aproximación (MA) posible a los perfiles de fondo y velocidad observados en campo (ya sea mediante la utilización de perfiles polinómicos, de perfiles analíticos o la combinación de perfiles analíticos y polinómicos).

Tabla 31: Estimación del coeficiente de dispersión longitudinal en base a la ecuación integral propuesta por Fischer (1979) con un mejor ajuste de perfiles de velocidad y fondo.

Fecha	Sección	Ajuste	D [m ² /s]	Q [m ³ /s]
11/06/2012	Río Tercero (Ctalamochita) – Balneario Río III	polinómico	143,73	17,22
10/09/2012	Río Tercero (Ctalamochita) – Balneario Río III	$\alpha \neq \beta$	54,59	14,79
12/11/2012	Río Tercero (Ctalamochita) – Balneario Río III	$\alpha \neq \beta$	41,10	18,51
11/06/2013	Río Saladillo - Puente ruta 6	$\alpha \neq \beta$	5,82	14,84
10/09/2013	Río Saladillo - Puente ruta 6	$\alpha = \beta$	1,00	9,21
30/09/2013	Río Carcarañá (Carcarañá)	$\alpha = \beta$	49,84	32,32
30/09/2013	Río Carcarañá (Cruz Alta)	polinómico	29,00	33,53
30/09/2013	Río Saladillo – Puente ruta 6	$\alpha \neq \beta$	6,72	13,75
19/11/2013	Río Saladillo - Puente ruta 6	polinómico	10,14	14,75
19/11/2013	Río Carcarañá (Carcarañá)	$\alpha \neq \beta$	39,37	72,97
19/11/2013	Río Carcarañá (Inrville)	Polinómico	84,82	28,12
20/11/2013	Arroyo Tortugas – Puente ruta 9	$\alpha \neq \beta$	6,01	24,22
10/06/2013	Río Tercero(Ctalamochita -) Bell Ville	$\alpha \neq \beta$	33,57	29,11
10/06/2014	Río Saladillo – Puente ruta 6	polinómico	27,02	38,48
10/06/2014	Río Carcarañá - Inrville	$\alpha \neq \beta$	171,18	74,62

6.4. Contraste de los resultados obtenidos con las distintas metodologías en las secciones analizadas.

Finalizado el cálculo mediante la metodología propuesta, se procedió a comparar los resultados obtenidos mediante las seis formulas descriptas en la sección 6.3 con los obtenidos de la resolución de la ecuación integral de Fischer. Para realizar esta comparación, se graficó la relación entre los coeficientes obtenidos con ambos métodos.

CAPÍTULO VI – DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS NECESARIOS PARA EVALUAR LOS PROCESOS DE MEZCLA

En la Figura 170 (a) se puede observar que la ecuación de Elder (1959) subestima significativamente los valores del coeficiente de dispersión con respecto a los estimados mediante la ecuación integral de Fischer (1979). Las ecuaciones empíricas de Fischer (1979) y Seo and Cheong (1998) sobrestiman el coeficiente de dispersión de longitudinal respecto a la otra metodología y en algunos casos el resultado obtenido es de 2 órdenes de magnitud mayor (Figura 170 (b) y Figura 170 (e)). Las ecuaciones de Liu (1977), Iwasa y Aya (1991) y Koussis y Rodríguez-Mirasol (1998) en algunos casos sobrestiman el coeficiente de dispersión y en otros casos los subestiman (Figura 170 (c), Figura 170 (d) y Figura 170(f)). Para estas tres últimas ecuaciones, el error en el coeficiente de dispersión respecto a los obtenidos mediante la ecuación integral de Fischer (1979) es de un orden de magnitud en el peor de los casos.

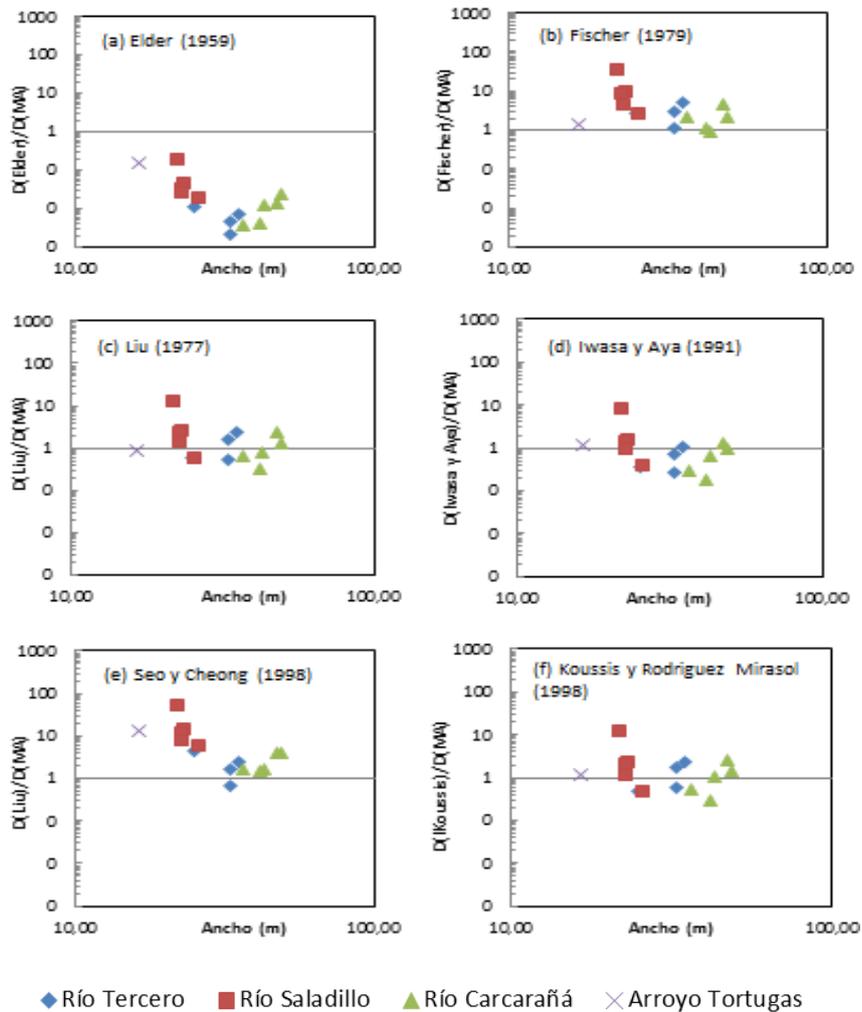


Figura 170: Comparación entre los coeficientes de dispersión obtenidos mediante las ecuaciones empíricas y los obtenidos mediante la ecuación integral de Fischer (1979) en base a una caracterización hidrodinámica detallada

6.5. Contraste de los resultados obtenidos con los disponibles en la bibliografía.

Además de comparar los resultados entre los métodos de análisis empleados, es de interés comparar dichos resultados con aquellos que se encuentran disponibles en la bibliografía, de tal forma de poder determinar si se arribó a valores “esperables” del coeficiente de dispersión longitudinal (D).

Para realizar esta comparación, se contrastaron los resultados obtenidos mediante la resolución de la ecuación integral detallada con mejores aproximaciones (MA), con los resultados reportados por Rutherford (1994), en el cual se recopilan valores del coeficiente de dispersión longitudinal de distintos ríos del mundo, y se los grafica en función del caudal de cada río (Figura 171).

Se observa que los coeficientes de dispersión obtenidos con la metodología propuesta en este trabajo se encuentran dentro de los órdenes de magnitud esperados para ríos de similares características (Figura 171). Por otra parte es posible verificar que los coeficientes de dispersión longitudinal para ríos de similares características son muy dispersos entre sí (Figura 171), es por ello que necesario realizar un análisis con una caracterización hidrodinámica detallada para obtener un coeficiente de dispersión representativo.

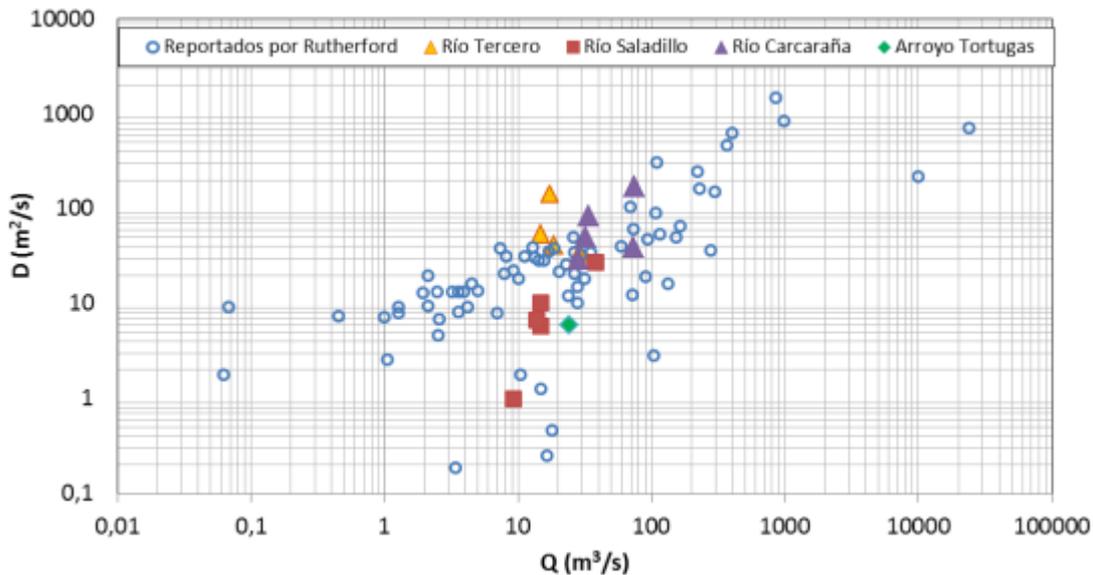


Figura 171: Coeficientes de dispersión longitudinal (D) de diferentes secciones del río Carcaraña y sus tributarios obtenidos mediante la resolución de la ecuación integral detallada con mejores aproximaciones (MA) en contraste con los resultados reportados por Rutherford (1994)

6.6. Metodología y recomendaciones para estimar el coeficiente de dispersión longitudinal (D)

Concluido el trabajo experimental que se explica en este capítulo, a continuación se procede a detallar la metodología y recomendaciones propuestas, las cuales pueden ser útiles tener en cuenta, al momento de estimar el coeficiente de dispersión longitudinal (D) en ríos.

- Seleccionar una sección recta y libre de obstáculos, como por ejemplo pilas de puente, islas, árboles caídos, etc. Las secciones en curvas o con presencia de obstáculos suelen estimar erróneamente el coeficiente de dispersión ya que aparecen corrientes secundarias y fenómenos turbulentos que no son tenidos en cuenta por las ecuaciones que se utilizan (Ver apartado 6.2.2).
- Aforar la sección mediante el uso del ADCP teniendo en cuenta las recomendaciones efectuadas en el capítulo 2 de esta tesis. Como mínimo, se recomienda realizar las suficientes transectas para obtener una buena estimación de caudal (ver capítulo 2), pero si es posible realizar más, mejor será la determinación del campo del flujo medio y por lo tanto mejor estimación del coeficiente de dispersión longitudinal.
- Procesar los datos obtenidos de la medición eliminando las transectas erróneas y seleccionar el sistema de referencia que tenga menor coeficiente de variación (COV).
- Promediar las transectas obtenidas mediante algún programa destinado a este fin. De este modo se reducen las fluctuaciones producidas por la turbulencia presente en el flujo y el ruido presente en la medición. En esta tesis se utilizó el programa VMT (Velocity Mapping Tool por sus siglas en inglés) desarrollado por el USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos, por sus siglas en inglés).
- Una vez obtenido el perfil promediado, se debe determinar el perfil de velocidades transversales. Para ello se promedia el perfil de velocidades en la vertical a lo largo de toda la dirección transversal.
- Posteriormente se obtiene del perfil transversal promediado, la batimetría de la sección de analizada.
- Aproximar mediante alguna función de interpolación el perfil de velocidades transversales y la batimetría de la sección. De esta manera se pueden obtener los valores de velocidad y profundidad que no han sido medidos, por ej. las márgenes, y permite obtener datos equiespaciados, lo cual facilita la integración numérica y la detección de errores. Se

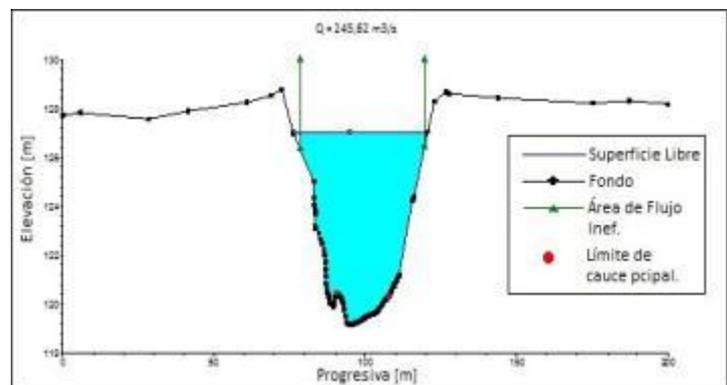
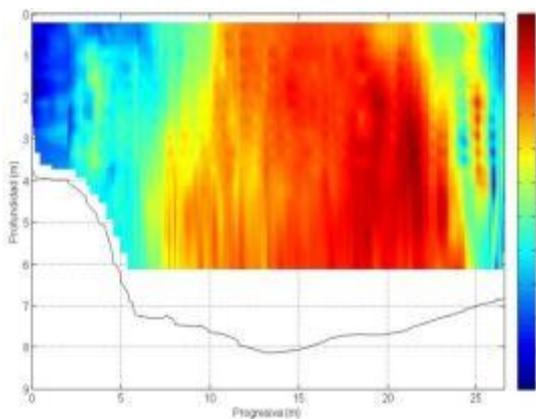
CAPÍTULO VI – DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS NECESARIOS PARA EVALUAR LOS PROCESOS DE MEZCLA

recomienda utilizar las formulas desarrolladas en el apartado 6.2.2.3 la cuales permiten comparar los resultados obtenidos y son muy utilizadas por diversos autores. En caso de que la aproximación por estas funciones sea inadecuada, utilizar un ajuste polinómico.

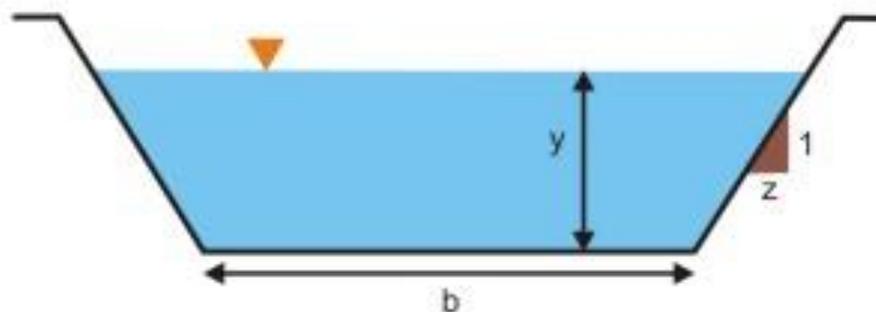
- Calcular el coeficiente de dispersión transversal (σ_t), para ello se recomienda utilizar aquella ecuación que ha sido calibrada para ríos de características similares al de estudio. En esta tesis, dado que los ríos de la cuenca son levemente meandriformes, se utilizó la ecuación de Fischer (1979) –ecuación 35- recomendada para este tipo de cauces.
- Resolver numéricamente la ecuación integral de Fischer (1979) – ecuación 25 -. Para resolverla, en este trabajo se utilizó el método de los trapecios.

CAPÍTULO VII

CONTRIBUCIÓN A LA DETERMINACIÓN TÉCNICA DE LÍNEAS DE RIBERA EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA



$$Q \left[\frac{m^3}{s} \right] = \frac{1}{n} \cdot A [m^2] \cdot S^{1/2} \cdot R [m]^{2/3}$$



Capítulo VII

**CONTRIBUCIÓN A LA DETERMINACIÓN TÉCNICA DE
LÍNEAS DE RIBERA EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA**

7.1. Introducción

La delimitación del valle aluvional (líneas de ribera) debe estar legalmente establecido con criterios técnicos apropiados. De ese modo, se podría impedir la construcción de edificios permanentes en terrenos que claramente pertenecen al cauce mayor de un curso de agua, aunque permitiendo en ciertas zonas que se instalen estructuras menores, galpones o construcciones transitorias (Lopardo, R.A. y Seoane, R., 2000). En la Provincia de Córdoba, las líneas de ribera se determinan según lo establecido por la resolución DPH N°25/1994, la cual indica que las líneas de ribera se delimitarán por el nivel que alcanzan las aguas superficiales en un cuerpo de agua para un periodo de retorno de 25 años. Para la predicción de esos niveles de las aguas, en la actualidad y por decreto DPH N° 448/1952, se utiliza la formulación de resistencia al flujo propuestas por Hermanek (1905). Los inconvenientes de esta ecuación se detallan más adelante en este capítulo. En este documento se evalúa el desempeño de esta formulación al contrastar sus resultados con evaluaciones hidrodinámicas realizadas en un tramo del Río Tercero (Ctalamochita) en la Provincia de Córdoba durante un evento de crecida extraordinaria (meses de febrero, marzo y abril de 2014). Además se contrastan los resultados obtenidos con la formulación de Hermanek (1905) con otras formulaciones de resistencia al flujo (por ejemplo Manning) y con los niveles de superficie libre simulados con un modelo hidráulico unidimensional que permite representar flujo gradualmente variado.

7.2. Marco Teórico

7.2.1. Resistencia al flujo en cauces fluviales

En la actualidad se encuentran en la literatura científica diversas formulaciones empíricas para calcular la resistencia al flujo en cauces fluviales. Los parámetros incluidos en dichas formulaciones han sido ajustados empíricamente (en una etapa de calibración) en base a datos experimentales obtenidos de mediciones realizadas en diferentes ríos y canales alrededor del mundo. Es por ello que es importante conocer para qué tipo de ríos fue calibrada cada formulación antes de aplicarla al caso de interés. Las ecuaciones de resistencia al flujo generalmente responden a la siguiente expresión potencial (ecuación 23)

$$V = a_0 d^{a_1} R_h^{a_2} S^{a_3} \quad (23)$$

Donde a_0 , a_1 , a_2 , a_3 son parámetros empíricos de calibración, V es la velocidad media de escurrimiento en una sección fluvial, d es el diámetro representativo del material del lecho, R_h es el radio hidráulico y S la pendiente de energía. Farías y Pilan (2000) analizaron varias formulaciones de resistencia al flujo, encontrando que en la mayor parte de las ecuaciones, los exponentes del radio Hidráulico y la pendiente varían dentro de rangos limitados, mientras que el exponente que presenta mayor variabilidad es el correspondiente al tamaño del sedimento aunque sus valores sean relativamente pequeños. Los valores de los parámetros incluidos en la ecuación 23 obtenidos por calibración por diversos autores se muestran en la Tabla 32:

Tabla 32: Formulas de resistencia al flujo

Formula	a₀	a₁	a₂	a₃
Manning *	1/n	0,000	0,667	0,500
Manning-Strickler	21,100	-0,167	0,667	0,500
Pavlovsky-Lacey	17,810	-0,133	0,736	0,515
Sugio	7,900	0,000	0,540	0,270
Chitale	7,340	0,000	0,646	0,293
Maza-Cruickshank	495,85	0,340	0,637	0,456
Brownlie	13,290	-0,029	0,529	0,389
Peterson & Peterson	7,546	0,017	0,437	0,276
Karim & Kennedy	18,190	-0,103	0,603	0,497
Camacho & Yen	97,930	0,216	0,636	0,401
Farías	4,780	0,026	0,499	0,213
<i>Mínimo</i>	<i>4,780</i>	<i>-0,167</i>	<i>0,437</i>	<i>0,213</i>
<i>Máximo</i>	<i>495,850</i>	<i>0,340</i>	<i>0,736</i>	<i>0,515</i>

**donde n es el parámetro de rugosidad de Manning*

7.2.2. Formulas de Hermanek

Johann Hermanek (Figura 172), originario de Mavria (Grecia), obtuvo el grado de ingeniero civil en la universidad técnica de Viena en 1889. Durante su carrera profesional publicó varios artículos referidos a la hidráulica, en el cual se destaca “Perfiles de velocidad media en canales artificiales y naturales” publicado en 1905 (Hager, 2003). En este artículo se presentan las formulaciones de resistencia al flujo (ecuación 24) calibradas por Hermanek (1905), las que permiten calcular la velocidad media del flujo considerando el tirante medio y la pendiente sin tener en cuenta la rugosidad del cauce. La Figura 173 muestra los parámetros hidráulicos intervinientes en esta ecuación.



Figura 172: Johann Hermanek

La calibración de estas ecuaciones se realizó utilizando más de 800 datos de canales naturales y artificiales. En la Tabla 33 se muestran los valores de los coeficientes de la ecuación 24 calibrados por Hermanek para distintos rangos de tirantes medidos (H_{med}).

$$V = a_0 H_{med}^a S^b \quad (24)$$

Tabla 33: Valores de los coeficientes de la ecuación 24 calibrados para distintos rangos de tirantes medios (D) del flujo donde V y H_{med} se expresan en [m/s] y [m], respectivamente.

Rango de tirante medio	a_0	a	B
$H_{med} \leq 1,50$ m	30,7	1,00	0,50
$1,50 < H_{med} \leq 6,00$ m	34,0	0,75	0,50
$H_{med} > 6,00$ m	44,5	0,60	0,50

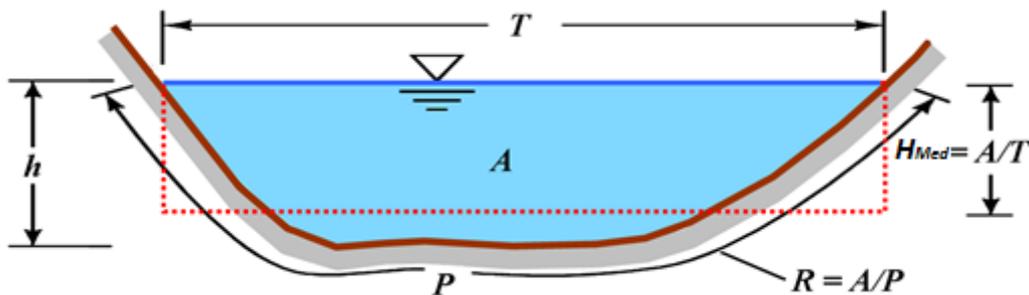


Figura 173: Parámetros hidráulicos intervinientes

7.2.3. Contraste entre Hermanek y otras fórmulas de resistencia al flujo

Del contraste de la formulación de Hermanek (1905) con la ecuación de Manning se observa que para ríos de “mediano porte”, es decir, con valores de $H_{med} = A/T$ en el rango “medio” (entre 1,5 m y 6,0 m), y con una geometría de la sección transversal lo suficientemente ancha como para aceptar que $H_{med} = R_h$, la fórmula de Hermanek se expresa como se muestra en la ecuación 25.

$$V = 34. R_h^{0,75} . S^{0,50} \quad (25)$$

Donde V y H_{med} están expresados en [m/s] y [m], respectivamente. Del contraste realizado se puede estimar para el rango de tirantes medio analizado, el coeficiente a_0 equivale a un coeficiente de rugosidad de Manning: $n = 1/34 = 0,0294$, con un valor del exponente del radio hidráulico levemente mayor al correspondiente a la Fórmula de Manning (0,75 vs 0,67).

7.2.4. Metodología de cálculo de líneas de ribera en la Provincia de Córdoba según decreto N° 448

Las líneas de ribera se definen actualmente en la provincia de Córdoba mediante una metodología iterativa (establecida en el decreto 448) utilizando las ecuaciones de Hermanek (ecuación 24). El caudal de diseño considerado en los cálculos es el correspondiente a una recurrencia de 25 años (Resolución 25/1994 DPH), el cual es determinado y aprobado por la autoridad de aplicación. La metodología de cálculo definida en el decreto es la siguiente:

- Relevar de perfiles transversales cada 20 o 25 metros normales al cauce del río o arroyo con ancho suficiente que sobrepase las líneas de crecidas máximas ordinarias.
- Relevar la pendiente del pelo de agua (superficie libre) y vaguada (fondo) del tramo de estudio y obtener el promedio entre ambas.
- Proponer un nivel de flujo en el perfil transversal relevado.
- Calcular el área de flujo.
- Calcular altura media ($H_{med} = \text{Área}/\text{Ancho de Boca}$).
- Mediante las ecuaciones de Hermanek (ecuación 24) según el rango de tirantes que corresponda se obtiene la velocidad media.
- Con el caudal de diseño y la velocidad media se procede a calcular el área de flujo ($A = Q_{25\text{años}}/V_{media}$).
- Si el Área propuesta inicialmente coincide o difiere en un porcentaje menor al 3% con el área calculada anteriormente se finaliza el cálculo en dicha sección y se procede análogamente con las siguientes secciones. Caso contrario se propone un área de flujo nueva y se vuelve a comenzar todo el proceso.

En la Figura 174 se sintetiza el algoritmo de cálculo mediante un diagrama de flujo.

CAPÍTULO VII –CONTRIBUCIÓN A LA DETERMINACIÓN TÉCNICA DE LÍNEAS DE RIBERA EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA

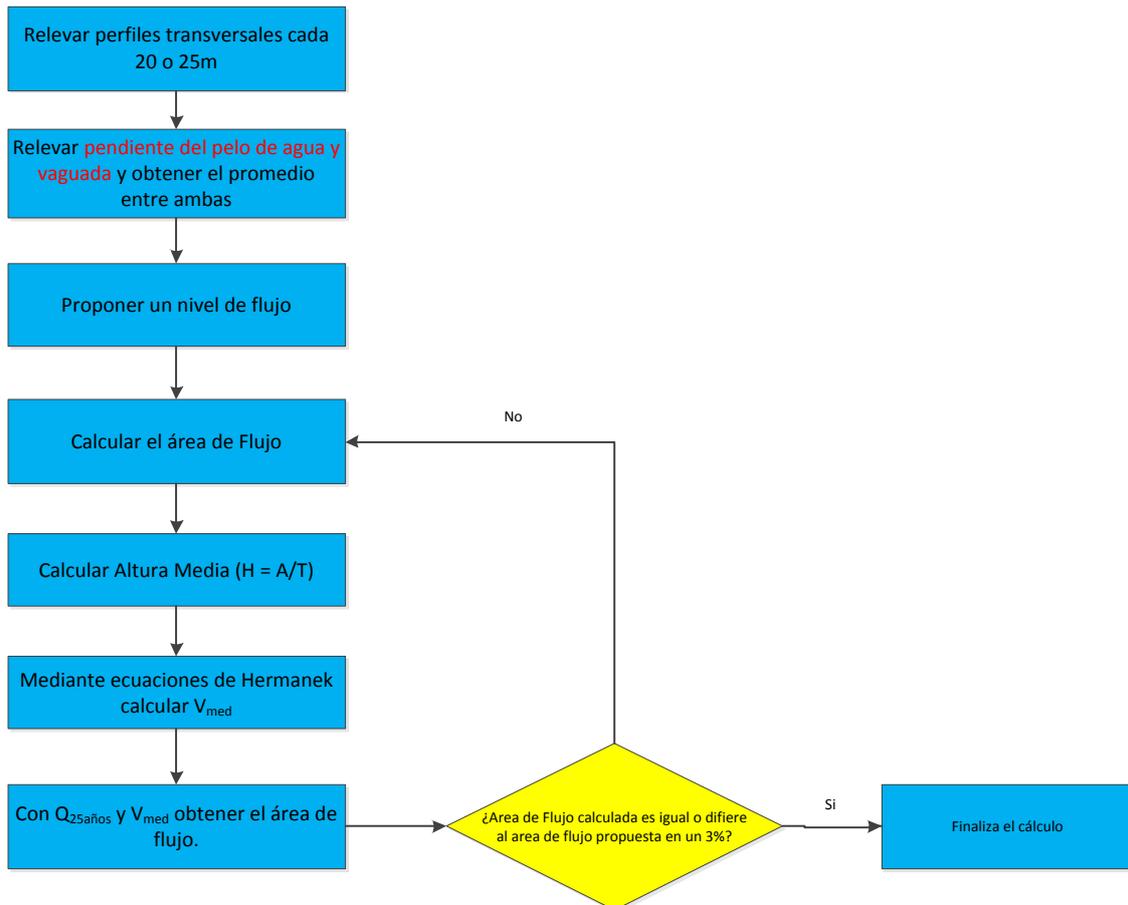


Figura 174: Esquema de cálculo de líneas de ribera en la Provincia de Córdoba, según lo establece el decreto N° 448

Como se indicó en el esquema anterior, la implementación de la metodología de cálculo requiere la determinación de la pendiente del pelo de agua y vaguada del tramo de estudio para luego calcular el promedio entre ambas. Este requerimiento genera un inconveniente para su implementación en la determinación de líneas de ribera en la Provincia de Córdoba ya que el cálculo requiere la predicción de la pendiente del pelo de agua para un evento extremo hipotético. Generalmente, en la predicción se asume que está pendiente es igual a la pendiente de fondo en eventos extremos, lo que genera una sobrestimación de los caudales escurridos.

7.3. Trabajos de campo

7.3.1. Zona de estudio

Para la realización de este estudio, se seleccionó un tramo del río Tercero (Ctalamochita) limitado entre los puentes Sarmiento y Sturla en la localidad de Bell Ville – Córdoba (Figura 175).



Figura 175: Localización del tramo del sistema fluvial de estudio en la ciudad de Bell Ville – Córdoba

Al encontrarse este tramo en un sector urbano, el cauce se encuentra fuertemente alterado debido a la presencia de puentes, alcantarillas, obstáculos, etc. En la Figura 176 se muestra el perfil longitudinal del tramo de estudio en donde se indica la cota de la vaguada y la ubicación de los puentes existentes en la zona de estudio. El tramo de estudio tiene una longitud de 2350m.

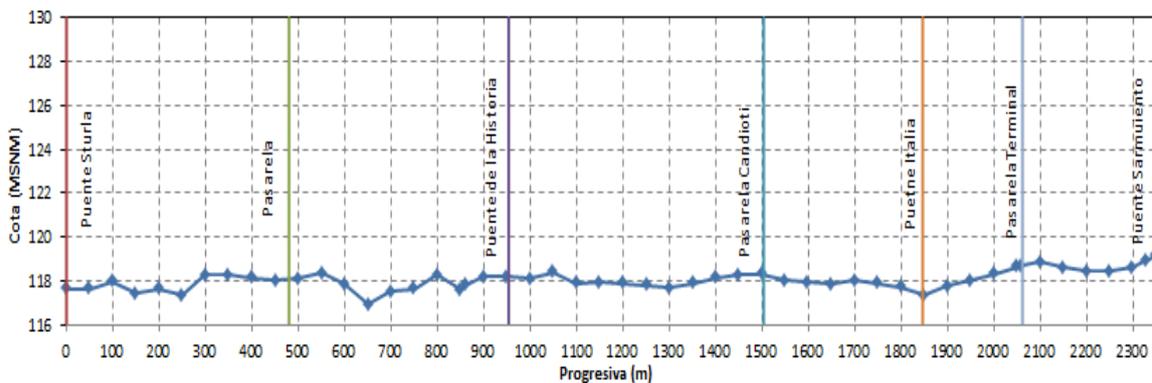


Figura 176: Perfil longitudinal del tramo de estudio en la ciudad de Bell Ville.

7.3.2.Resultados

Durante los meses de febrero, marzo, abril y junio de 2014 se realizaron campañas de aforos con el objeto de cuantificar y caracterizar el escurrimiento superficial en el tramo de estudio del río Tercero (Ctalamochita). Las tres primeras campañas (realizadas en los meses de febrero, marzo y abril de 2014) se efectuaron durante un evento de crecida extraordinario cuyos desbordes produjeron la inundación de la ciudad de Bell Ville como así también las localidades de Villa María, Ballesteros, Río Tercero, entre otras. La última campaña de aforo se realizó en condiciones de flujo medias. En la Tabla 34 se

CAPÍTULO VII –CONTRIBUCIÓN A LA DETERMINACIÓN TÉCNICA DE LÍNEAS DE RIBERA EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA

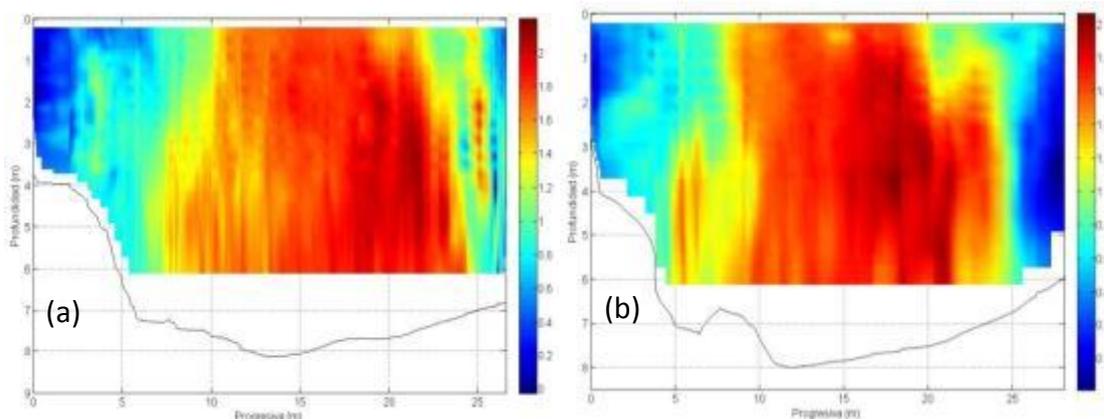
presentan las variables hidrológicas e hidráulicas relevadas en la sección ubicada inmediatamente aguas abajo del Puente Sarmiento – Bell Ville durante todas las campañas mencionadas. Las Figura 177 (a), (b), (c), (d) muestran los campos de velocidades medias longitudinales obtenidos para cada condición de flujo en la misma sección. La Tabla 34 muestra que las velocidades medias en la sección transversal no cambian significativamente (variaciones relativas menores al 20%) para diferentes condiciones aun cuando existieron cambios de aproximadamente un orden de magnitud de los caudales escurridos y profundidades máximas. En la Tabla 35 se indican las cotas de superficie libre relevadas en todas las campañas de mediciones y la pendiente media de la superficie libre en el tramo (pendiente de fondo = 0.034%).

Tabla 34: Variables hidrológicas e hidráulicas relevadas durante todas las campañas de medición en una sección del río Tercero (Ctalamochita) localizada inmediatamente aguas abajo del puente Sarmiento.

Condición de flujo	Fecha	Caudal [m ³ /s]	Profundidad Media [m]	Velocidad Media [m/s]	Área Inundada [m ²]	Profundidad Máxima [m]
1	05/03/14	256,66	5,90	1,13	232,55	8,20
2	06/03/14	245,62	5,44	1,07	229,20	8,12
3	08/04/14	112,85	3,07	1,09	103,62	4,69
4	10/06/14	29,11	1,22	0,95	30,72	1,89

Tabla 35: Cotas de la superficie libre en las secciones localizadas en los puentes Sarmiento y Sturla y la pendiente media en el tramo delimitado entre ambos puentes.

Condición de flujo	Caudal [m ³ /s]	Cota sup. libre (Puente Sturla) [msnm]	Cota sup. libre (Puente Sarmiento) [msnm]	Pendiente de superficie libre [m/m]
1	256,66	126,78	127,10	0,0001362
2	245,62	126,66	127,04	0,0001617
3	112,85	123,04	123,60	0,0002383
4	29,11	120,40	120,93	0,0002255



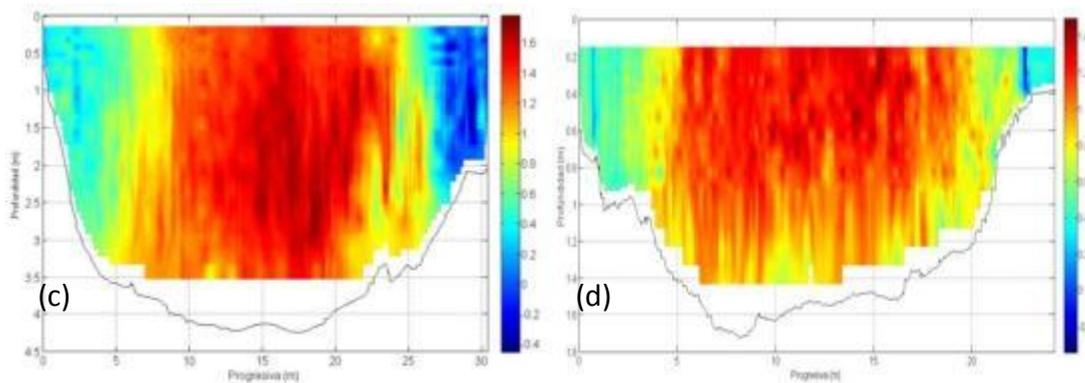


Figura 177: Campo de velocidades medias longitudinales obtenidos en la sección ubicada aguas abajo del puente Sarmiento – Bell Ville (a) 05/03/14 (b) 06/03/14 (c) 08/04/14 (d) 10/06/14

7.4. Aplicación de las formulaciones de Hermanek y otras fórmulas de resistencia para caracterizar el escurrimiento en las condiciones de flujo evaluadas en campo

En esta sección se detallan los resultados de aplicar las formulaciones de Hermanek y otra fórmula de resistencia (en este caso Manning) para caracterizar el escurrimiento en las condiciones de flujo observadas en campo (representadas por las variables detalladas en las Tabla 34 y Tabla 35). En las aplicaciones de las formulaciones realizadas se utilizaron distintas opciones de datos de entrada que se detallan a continuación: a) Formulación de Hermanek utilizando el promedio de los valores de pendiente de superficie libre y de pendiente de fondo medias en todo el tramo; b) Formulación de Hermanek utilizando el valor de pendiente media de fondo en el tramo; c) Formula de Manning utilizando un coeficiente de rugosidad único en toda la sección y valores de pendiente de superficie libre media en todo el tramo; d) Formula de Manning utilizando un coeficiente de rugosidad único en toda la sección y valores de pendiente de fondo media en todo el tramo; e) Formula de Manning utilizando un coeficiente de rugosidad compuesto (teniendo en cuenta su variabilidad en el cauce y en la planicie de inundación) y valores de pendiente de fondo media en todo el tramo. Las opciones b), d) y e) son las generalmente utilizadas para predecir condiciones de diseño de líneas de ribera ya que no se encuentra disponible la información de los valores de pendiente de superficie libre. A continuación se presentan los principales resultados obtenidos en cada una de las aplicaciones.

7.4.1. Formulación de Hermanek utilizando el promedio de los valores de pendiente de superficie libre y de pendiente de fondo medias en todo el tramo

En la Tabla 36 se muestran los valores de velocidades medias en la sección transversal y de caudal estimados con la formulación de Hermanek utilizando el promedio de los valores de pendiente de superficie libre y de pendiente de fondo medias en todo el tramo. Se incluyen además los errores relativos en la estimación de cada variable con respecto al valor observado. Se observa claramente que esta aplicación sobrestima los caudales escurridos para las condiciones extremas observadas en campo (condiciones 1, 2 y 3) siendo esta situación habitual en la determinación de líneas de ribera. Sin embargo, esta aplicación subestima los caudales escurridos en condiciones normales de flujo (condición 4).

Tabla 36: Estimaciones realizadas con la formulación de Hermanek utilizando el promedio de los valores de pendiente de superficie libre y de pendiente de fondo. Los errores relativos se calculan como (valor estimado - valor observado) / valor observado.

Condición	Valores observados		Valores estimados		Errores relativos	
	Vel. Media [m/s]	Caudal [m3/s]	Vel. Media [m/s]	Caudal [m3/s]	Vel. Media [%]	Caudal [%]
1	1,13	256,66	1,99	463,51	76,4	80,6
2	1,07	245,62	1,92	441,15	79,9	79,6
3	1,09	112,85	1,34	139,36	23,4	23,5
4	0,95	29,11	0,63	19,45	-33,3	-33,2

7.4.2. Formulación de Hermanek utilizando el valor de pendiente media de fondo en el tramo

En la Tabla 37 se muestran los valores de velocidades medias en la sección transversal y de caudal estimados con la formulación de Hermanek utilizando el valor de pendiente media de fondo en el tramo. Se incluyen además los errores relativos en la estimación de cada variable con respecto al valor observado. Se observa claramente que esta aplicación sobrestima los caudales escurridos para las condiciones extremas observadas en campo (condiciones 1, 2 y 3) siendo esta situación habitual en la determinación de líneas de ribera. Los errores relativos observados para las condiciones de aguas altas son significativamente superiores a los obtenidos utilizando la pendiente de superficie libre observada. Sin embargo, esta aplicación subestima los caudales escurridos en condiciones normales de flujo (condición 4).

CAPÍTULO VII –CONTRIBUCIÓN A LA DETERMINACIÓN TÉCNICA DE LÍNEAS DE RIBERA EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA

Tabla 37: Estimaciones realizadas con la formulación de Hermanek utilizando el valor de pendiente media de fondo en el tramo. Los errores relativos se calculan como (valor estimado - valor observado) / valor observado.

Condición	Valores observados		Valores estimados		Errores relativos	
	Vel. Media [m/s]	Caudal [m3/s]	Vel. Media [m/s]	Caudal [m3/s]	Vel. Media [%]	Caudal [%]
1	1,13	256,66	2,39	554,70	111,1	116,1
2	1,07	245,62	2,24	514,41	109,8	109,4
3	1,09	112,85	1,46	151,43	34,1	34,2
4	0,95	29,11	0,70	21,37	-26,8	-26,6

7.4.3.Fórmula de Manning utilizando un coeficiente de rugosidad único en toda la sección y valores de pendiente de superficie libre media en todo el tramo

En la Tabla 38 se muestran los valores de velocidades medias en la sección transversal y de caudal estimados con Fórmula de Manning utilizando un coeficiente de rugosidad único en toda la sección de 0,029 y valores de pendiente de superficie libre media en todo el tramo. Se incluyen además los errores relativos en la estimación de cada variable con respecto al valor observado. Se observa un buen desempeño de esta formulación para la estimación de los caudales escurridos para las condiciones extremas observadas en campo (condiciones 1, 2 y 3) siendo esta situación habitual en la determinación de líneas de ribera. Sin embargo esta aplicación subestima los caudales escurridos en condiciones normales de flujo (condición 4) lo que implicaría que para estas condiciones el valor del coeficiente de rugosidad n esta sobrestimado. El mejor ajuste para la condición 4 y la pendiente de superficie libre observada se obtiene utilizando $n = 0,0212$.

Tabla 38: Estimaciones realizadas con la Fórmula de Manning utilizando un coeficiente de rugosidad único en toda la sección y valores de pendiente de superficie libre media en todo el tramo. Los errores relativos se calculan como (valor estimado - valor observado) / valor observado.

Condición	Valores observados		Valores estimados		Errores relativos	
	Vel. Media [m/s]	Caudal [m3/s]	Vel. Media [m/s]	Caudal [m3/s]	Vel. Media [%]	Caudal [%]
1	1,13	256,66	1,13	261,92	-0,3	2,0
2	1,07	245,62	1,23	281,45	14,8	14,6
3	1,09	112,85	1,05	109,22	-3,3	-3,2
4	0,95	29,11	0,56	17,35	-40,5	-40,4

7.4.4.Fórmula de Manning utilizando un coeficiente de rugosidad único en toda la sección y valores de pendiente de fondo media en todo el tramo

CAPÍTULO VII –CONTRIBUCIÓN A LA DETERMINACIÓN TÉCNICA DE LÍNEAS DE RIBERA EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA

En la Tabla 39 se muestran los valores de velocidades medias en la sección transversal y de caudal estimados con Fórmula de Manning utilizando un coeficiente de rugosidad único en toda la sección de 0,029 y valores de pendiente de fondo media en todo el tramo. Se incluyen además los errores relativos en la estimación de cada variable con respecto al valor observado. Se observa claramente que esta aplicación sobrestima significativamente los caudales escurridos para las condiciones extremas observadas en campo (condiciones 1, 2 y 3) siendo esta situación habitual en la determinación de líneas de ribera aunque el desempeño de esta formulación es mejor que el de Hermanek cuando se usan también los valores de pendiente de fondo media en todo el tramo. Sin embargo esta aplicación subestima los caudales escurridos en condiciones normales de flujo (condición 4).

Tabla 39: Estimaciones realizadas con la Fórmula de Manning utilizando un coeficiente de rugosidad único en toda la sección y valores de pendiente de fondo media en todo el tramo. Los errores relativos se calculan como (valor estimado - valor observado) / valor observado.

Condición	Valores observados		Valores estimados		Errores relativos	
	Vel. Media [m/s]	Caudal [m3/s]	Vel. Media [m/s]	Caudal [m3/s]	Vel. Media [%]	Caudal [%]
1	1,13	256,66	1,79	415,95	58,3	62,1
2	1,07	245,62	1,79	410,16	67,2	67,0
3	1,09	112,85	1,27	131,12	16,1	16,2
4	0,95	29,11	0,70	21,41	-26,6	-26,4

7.4.5.Fórmula de Manning utilizando un coeficiente de rugosidad compuesto (teniendo en cuenta su variabilidad en el cauce y en la planicie de inundación) y valores de pendiente de fondo media en todo el tramo

En la Tabla 40 se muestran los valores de velocidades medias en la sección transversal y de caudal estimados con Fórmula de Manning utilizando un coeficiente de rugosidad compuesto (teniendo en cuenta su variabilidad en el cauce y en la planicie de inundación) y valores de pendiente de fondo media en todo el tramo. Se incluyen además los errores relativos en la estimación de cada variable con respecto al valor observado.

Debido a que durante el evento de crecida el río inunda las planicies de inundación, es necesario calcular un coeficiente de rugosidad n de Manning compuesto, ya que la rugosidad de las planicies de inundación no es la misma que la rugosidad del cauce. Se adoptó un n de Manning de 0,12 para las planicies de inundación debido a la gran densidad de vegetación existente en

CAPÍTULO VII –CONTRIBUCIÓN A LA DETERMINACIÓN TÉCNICA DE LÍNEAS DE RIBERA EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA

las mismas (Figura 178) mientras que para el cauce se utilizó un n de Manning de 0,029

Tabla 40: Estimaciones realizadas con la Fórmula de Manning utilizando un coeficiente de rugosidad compuesto (teniendo en cuenta su variabilidad en el cauce y en la planicie de inundación) y valores de pendiente de fondo media en todo el tramo. Los errores relativos se calculan como (valor estimado - valor observado) / valor observado.

Condición	Valores observados		Valores estimados		Errores relativos	
	Vel. Media [m/s]	Caudal [m3/s]	Vel. Media [m/s]	Caudal [m3/s]	Vel. Media [%]	Caudal [%]
1	1,13	256,66	1,30	301,57	14,8	17,5
2	1,07	245,62	1,23	297,37	14,8	21,1
3	1,09	112,85	1,02	105,62	-6,5	-6,4
4	0,95	29,11	0,61	18,82	-35,5	-35,4



Figura 178: Cauce principal y Planicies de inundación en el tramo de estudio.

Para obtener el coeficiente n de Manning compuesto se utilizó la siguiente expresión

$$n_{eq} = \frac{A_t \cdot R_t^{2/3}}{\sum K_j} \quad (4)$$

Donde A_t es el área total de la sección, R_t es el radio hidráulico total de la sección y K_j factor de fricción.

$$K_j = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{\frac{2}{3}} \quad (5)$$

Donde n es el n de Manning de cada una de las planicies de inundación y del cauce, A es el área de cada una de las planicies de inundación y el cauce y R es

el radio hidráulico de cada una de las planicies de inundación y del cauce. En la Figura 179 se ilustra cada parámetro para mayor claridad

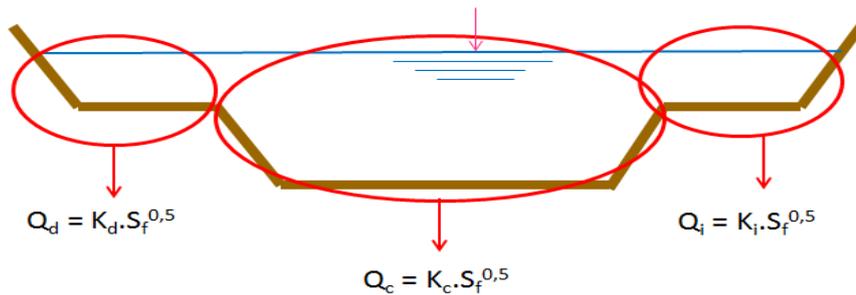


Figura 179: Parámetros intervinientes en el cálculo de n compuesto

El valor de n obtenido con esta metodología para las condiciones 1 y 2 es de 0,04, mientras que para las condiciones 3 y 4 los valores son de 0,036 y 0,033. Esta metodología de cálculo del n compuesto supone que se conoce el caudal que escurre en cada parte de la sección, lo que no es posible determinar cuándo se quiere realizar predicción en caudales extremos como es el caso de la delimitación de líneas de ribera.

Se observa que esta aplicación sobrestima los caudales escurridos para las condiciones extremas observadas en campo (condiciones 1, 2) siendo esta situación habitual en la determinación de líneas de ribera. Sin embargo esta aplicación subestima los caudales escurridos en condiciones normales de flujo (condición 4).

7.4.6. Análisis de resultados obtenidos con las distintas formulaciones

El análisis de resultados obtenidos con la formulación de Hermanek confirma lo expresado en la sección 2.1.4 en relación a las principales debilidades de la implementación de la formulación de Hermanek para la determinación de líneas de ribera:

- Las fórmulas de Hermanek son ecuaciones de resistencia al flujo que no tienen en cuenta la variabilidad de la rugosidad del cauce. En las condiciones de flujo de aguas altas, la rugosidad aparente del cauce es mucho mayor que el valor de 0,0294 representado por el coeficiente incluido en la formulación de Hermanek por lo que esta expresión sobrestima significativamente los caudales escurridos en una sección de cauce definida aun cuando se utilice las pendiente de superficie libre y de fondo observadas.
- Hermanek, al igual que todas las fórmulas de resistencia al flujo, son útiles para caracterizar una situación observada de un curso fluvial y

CAPÍTULO VII –CONTRIBUCIÓN A LA DETERMINACIÓN TÉCNICA DE LÍNEAS DE RIBERA EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA

presentan errores importantes cuando se las utiliza para hacer predicción de eventos extremos necesarios para el diseño de medidas no estructurales (por ejemplo líneas de ribera) y medidas estructurales requeridas para mitigar el riesgo hídrico.

A continuación se evalúa, a partir del contraste con los resultados experimentales mostrados previamente, la conveniencia de la implementación de un modelo hidráulico unidimensional que simula condiciones de flujo gradualmente variado para la caracterización del escurrimiento en las condiciones de flujo de aguas altas (eventos extremos).

7.5. Implementación de modelo hidráulico unidimensional He-RAS

7.5.1. Descripción del Modelo.

Hec-RAS es un programa de simulación hidráulica creado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center) del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los EE.UU. (US Army Corps of Engineering). El modelo numérico incluido en este programa permite realizar análisis de flujo permanente unidimensional gradualmente variado a superficie libre para distintos caudales escurridos. Mediante este programa se procedió a simular hidráulicamente el tramo de estudio del río Tercero (Ctalamochita) ubicado en la localidad de Bell Ville – Córdoba. El modelo fue provisto por la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba y poseía las siguientes características: (a) Secciones relevadas cada 50 m y (b) Puentes y obstáculos existentes en toda la trama urbana de Bell Ville. En Figura 180 se muestra el modelo provisto.

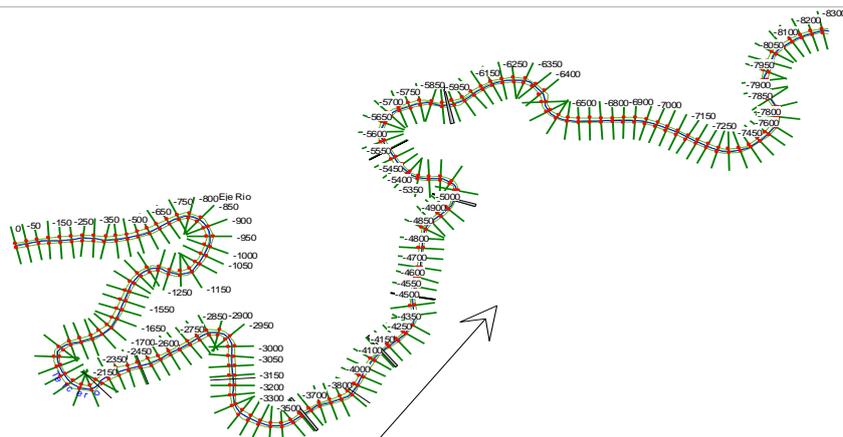


Figura 180: Modelo Hidráulico Hec-RAS provisto por la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba

En primer lugar, se realizaron modificaciones en el modelo para representar las condiciones de flujo observadas en campo (Figura 181). Las

modificaciones realizadas son: (a) Selección de las secciones pertenecientes al tramo de estudio. (b) Colocación de las pilas de puente. (c) Modificación de las condiciones de borde. (d) Colocación de las áreas inefectivas de flujo. (e) Interpolación de secciones para modelar correctamente las expansiones y contracciones del flujo. Con el modelo modificado se representaron las 4 condiciones de flujo relevadas experimentalmente (ver Tabla 34 y Tabla 35).

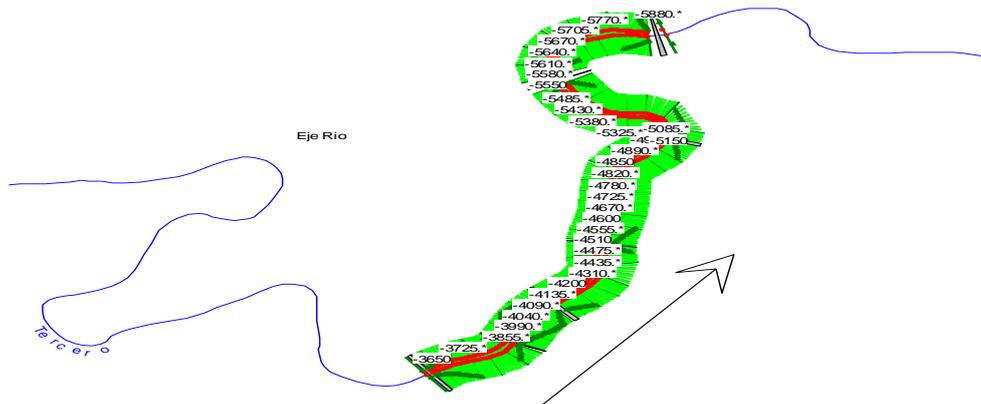


Figura 181: Modelo Hidráulico Unidimensional Hec-RAS con las modificaciones realizadas por los autores de este trabajo

7.5.2. Resultados

Para las 4 condiciones modeladas (Tabla 34) se obtuvieron los resultados mostrados a continuación:

7.5.2.1 Condición 1: Caudal = 256 m³/s

En la Figura 182 se muestra la sección inundada, para la condición evaluada, pocos metros aguas abajo del puente Sarmiento de Bell Ville.

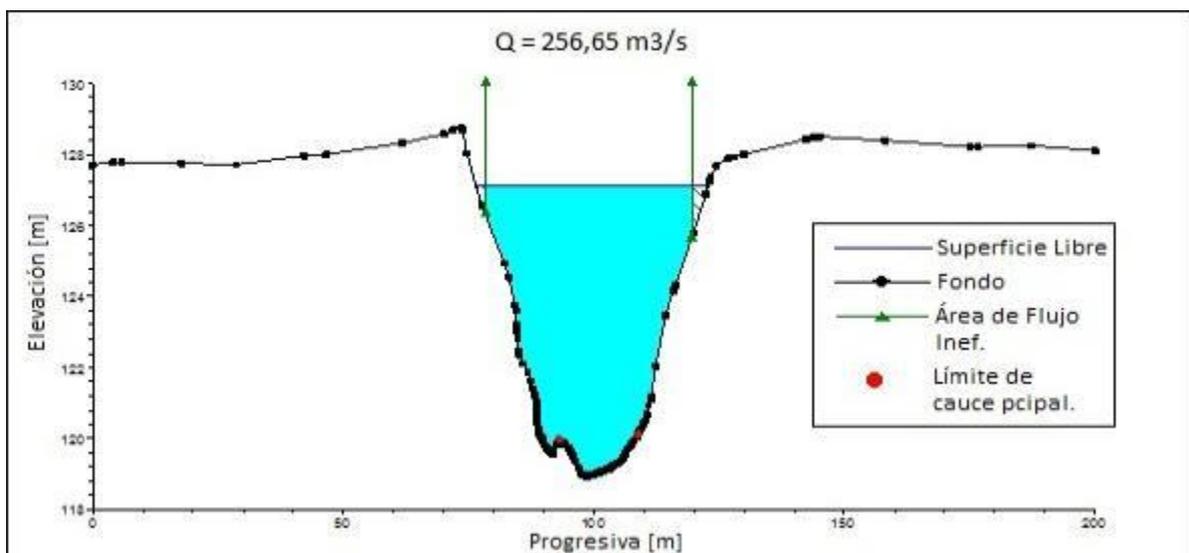


Figura 182: Sección inundada aguas abajo del puente Sarmiento obtenida con el modelo unidimensional para la condición 1: Caudal = 256 m³/s.

CAPÍTULO VII –CONTRIBUCIÓN A LA DETERMINACIÓN TÉCNICA DE LÍNEAS DE RIBERA EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA

Para esta sección los parámetros hidráulicos obtenidos del modelo son los mostrados en la Tabla 41.

Tabla 41: Parámetros Hidráulicos aguas abajo del puente Sarmiento obtenida con el modelo unidimensional para la condición 1: Caudal = 256 m³/s

Parámetro	Valor simulado	Valor observado	Errores Relativos
Velocidad Media [m/s]	1,10	1,13	-2,6%
Área del Flujo [m ²]	232,65	232,55	0,04%
Nivel Alcanzado por las aguas [msnm]	127,14	127,10	0,03%
Profundidad Máxima [m]	8,19	8,20	-0,12%

7.5.2.2 Condición 2: Caudal = 245 m³/s

En la Figura 183 se muestra la sección inundada, para la condición evaluada, pocos metros aguas abajo del puente Sarmiento de Bell Ville.

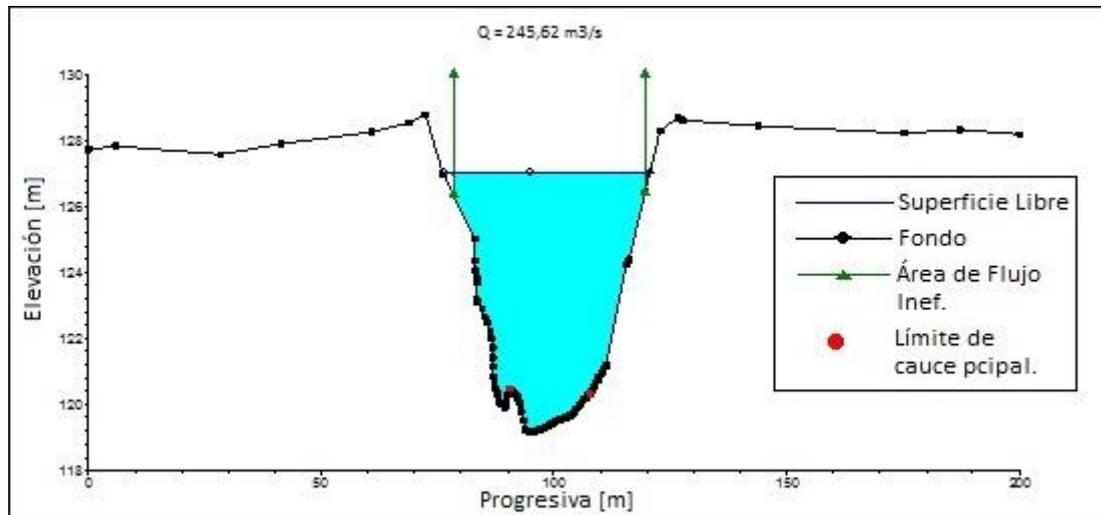


Figura 183: Sección inundada aguas abajo del puente Sarmiento obtenida con el modelo unidimensional para la condición 2: Caudal = 245 m³/s

Para esta sección los parámetros hidráulicos obtenidos del modelo son los mostrados en la Tabla 42

Tabla 42: Parámetros Hidráulicos aguas abajo del puente Sarmiento obtenida con el modelo unidimensional para la condición 2: Caudal = 245 m³/s

Parámetro	Valor simulado	Valor observado	Errores Relativos
Velocidad Media [m/s]	1,08	1,07	0,93%
Área del Flujo [m ²]	227,07	229,20	-0,93%
Nivel Alcanzado por las aguas [msnm]	127,00	127,04	-0,03%
Profundidad Máxima [m]	8,05	8,12	-0,86%

7.5.2.3 Condición 3: Caudal 112 m³/s

En la Figura 183 se muestra la sección inundada, para la condición evaluada, pocos metros aguas abajo del puente Sarmiento de Bell Ville.

CAPÍTULO VII –CONTRIBUCIÓN A LA DETERMINACIÓN TÉCNICA DE LÍNEAS DE RIBERA EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA

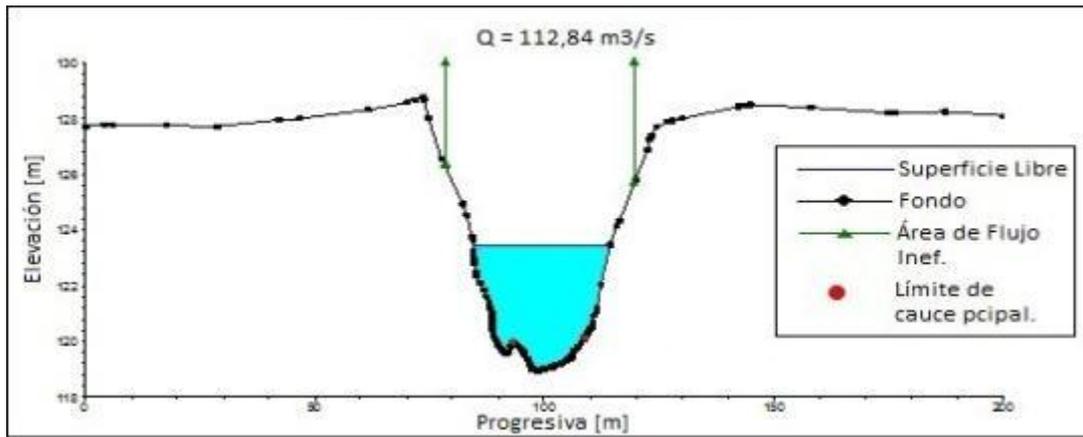


Figura 184: Sección inundada aguas abajo del puente Sarmiento obtenida con el modelo unidimensional para la condición 3. Caudal = 112 m³/s

Para esta sección los parámetros hidráulicos obtenidos del modelo son los mostrados en la Tabla 43.

Tabla 43: Parámetros Hidráulicos aguas abajo del puente Sarmiento obtenida con el modelo unidimensional para la condición 3: Caudal = 112 m³/s

Parámetro	Valor simulado	Valor observado	Errores Relativos
Velocidad Media [m/s]	1,16	1,09	6,42%
Área del Flujo [m²]	97,14	103,62	-6,25%
Nivel Alcanzado por las aguas [msnm]	123,45	123,60	-0,12%
Profundidad Máxima [m]	4,51	4,69	-3,84%

7.5.2.4 Condición 4: Caudal = 29 m³/s

En la Figura 185 se muestra la sección inundada, para la condición evaluada, pocos metros aguas abajo del puente Sarmiento de Bell Ville.

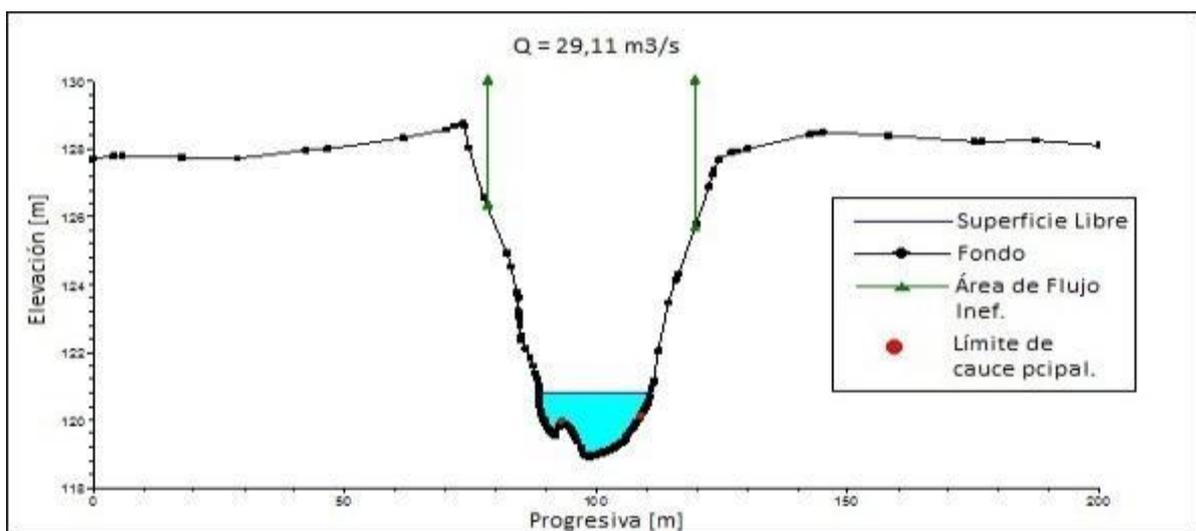


Figura 185: Sección inundada aguas abajo del puente Sarmiento obtenida con el modelo unidimensional para la condición 4: Caudal = 29 m³/s.

CAPÍTULO VII –CONTRIBUCIÓN A LA DETERMINACIÓN TÉCNICA DE LÍNEAS DE RIBERA EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA

Para esta sección los parámetros hidráulicos obtenidos del modelo son los mostrados en la Tabla 44.

Tabla 44: Parámetros Hidráulicos aguas abajo del puente Sarmiento obtenida con el modelo unidimensional para la condición $Q = 29 \text{ m}^3/\text{s}$

Parámetro	Valor simulado	Valor observado	Errores Relativos
Velocidad Media [m/s]	1,06	0,95	11,57%
Área del Flujo [m ²]	27,36	30,72	-11,03%
Nivel Alcanzado por las aguas [msnm]	120,80	120,93	-0,11%
Profundidad Máxima [m]	1,85	1,89	-2,11%

7.5.2.5 Contraste entre los valores simulados y medidos en campo para todas las condiciones de flujo

Las Figura 186 (a), (b) y (c) se muestra el contraste entre los valores simulados y medidos de las principales variables hidráulicas para todas las condiciones de flujo. La recta a 45°, roja, es la línea de correspondencia perfecta.

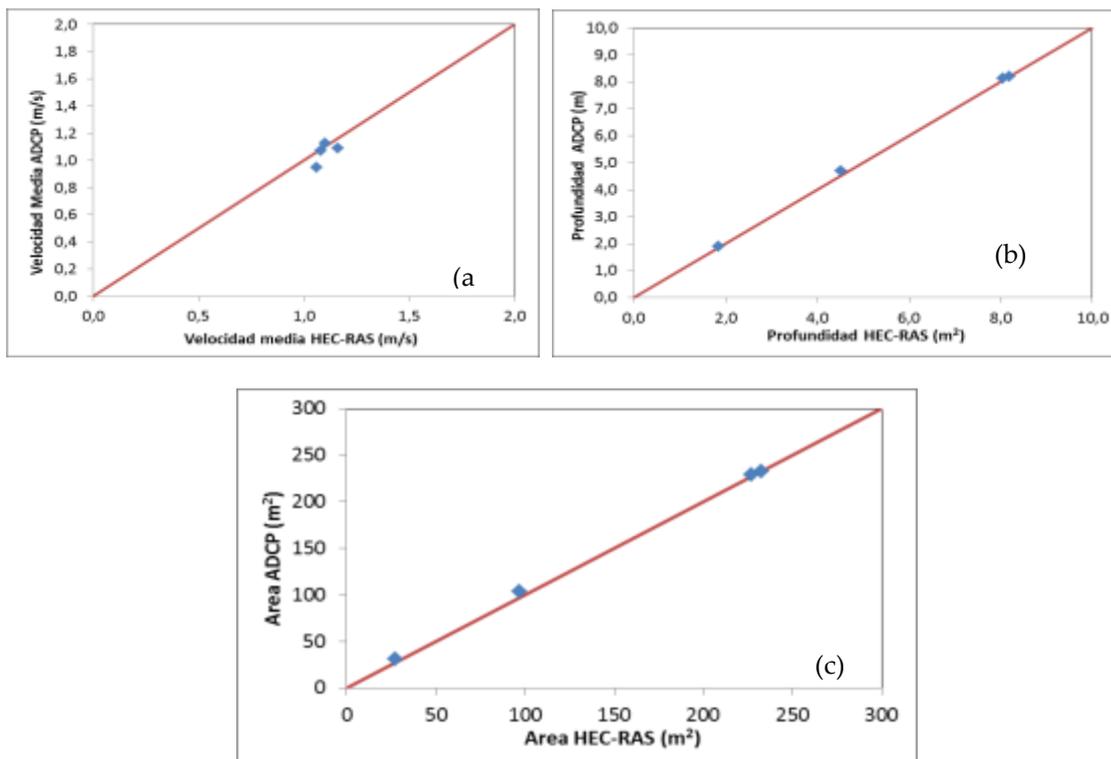


Figura 186: Contraste entre los parámetros modelado y los medidos en campo. (a) Velocidades (b) Profundidades (c) Áreas. La línea a 45° indica correspondencia perfecta.

CAPITULO VIII

CONCLUSIONES



Capítulo VIII CONCLUSIONES

Como conclusiones del desarrollo del presente trabajo de tesis se puede expresar lo siguiente.

Se realizaron en el sistema fluvial analizado un total de 20 campañas de aforo con 87 determinaciones de caudal y más de 350 transectas dentro de las cuales se incluye el relevamiento completo de un evento de crecida extraordinario en el río Tercero (Ctalamochita) en la se logró medir un caudal máximo de 480 m³/s en la localidad de Villa Ascasubi. Durante este evento de crecida se observó la máxima velocidad media, cuyo valor fue de 1,57 m/s en la sección del Río Carcarañá ubicada en el puente de la ruta 12 en Inrville, y la máxima velocidad local aforada, con un valor de 3,66 m/s en la sección del Río Tercero (Ctalamochita) ubicada en el puente Sarmiento de la localidad de Bell Ville. El autor de esta tesis considera que, durante este evento extraordinario se alcanzó el límite de aplicación del ADCP YSI/SonTek S5 en el sistema de estudio debido a las limitaciones del instrumento para medir a profundidades mayores a las registradas y el riesgo asociado.

Del análisis de los caudales medidos se pudieron conocer las variaciones que presenta el sistema fluvial analizado, tanto espacialmente, debido a los aportes recibidos en su recorrido y a las descargas industriales y de líquidos cloacales tratados, como así también temporalmente, relacionadas con los patrones hidrometeorológicos e hidrológicos observados y las características de regulación del sistema.

Dentro de este sistema fluvial, el río Saladillo presenta una variación estacional importante debido a que no está regulado y además esta canalizado con lo se reduce el efecto regulador de los bañados. Debido a esto, los valores de caudal aforados en épocas de aguas altas, algunas veces, son mayores a los observados en el río Tercero (Ctalamochita), lo que no es habitual en otros momentos del año. En época de lluvias, se observa que el aporte del arroyo Tortugas al río Carcarañá presenta un caudal similar al del río al que tributa, y en algunos casos mayor valor, que las contribuciones que realizan los otros tributarios (ríos Tercero y Saladillo).

Por otra parte se aprecia una correspondencia entre las estimaciones de caudales erogados por la central hidroeléctrica Piedras Moras y aquellos monitoreados durante las campañas realizadas en el balneario de la ciudad de Río Tercero y Villa Ascasubi, lo que implica que, en casos donde no se disponga

de aforos en la sección en el balneario y no se encuentre en funcionamiento el vertedero del embalse Piedras Moras, los valores de potencia diaria reportados por la central pueden ser usados para estimar el caudal escurrido en esa sección. Además se observa un buen acuerdo entre las estimaciones de caudales erogados por el vertedero del dique Piedras Moras y aquellos monitoreados durante las campañas realizadas en el puente de ingreso a la localidad de Villa Ascasubi.

Mediante un conocimiento detallado del sistema y a través de la información de campo, se determinaron las curvas de altura de superficie libre-caudal escurrido en diferentes secciones de la cuenca, las cuales permiten obtener valores de caudales escurridos de forma rápida y sencilla en cada una de las secciones. La utilización de las curvas calibradas, posibilitó la reconstrucción de los hidrogramas durante el evento de crecida extraordinario, lo que permitió conocer los volúmenes escurridos y los tiempos para llegar a cada sitio de los picos de crecida.

Se debe también referir que durante la campaña de medición N° 12, fue posible contrastar el caudal escurrido aforado en la sección ubicada en la localidad de Pueblo Andino ($73,93\text{m}^3/\text{s}$) contra el caudal medido por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación ($71,20\text{m}^3/\text{s}$). De esta forma se obtuvo una diferencia menor al 3%, valor de igual orden de magnitud que el error del instrumento de medición utilizado (ADCP). Lo cual valida la metodología de las mediciones efectuadas.

Por otra parte se impone mencionar que del análisis de los datos se obtiene que el valor ancho/profundidad media mínimo observado fue de 8 en la sección del arroyo Tortugas relevada en cercanías de la ciudad homónima, mientras que el valor máximo fue de 122 para la sección del río Tercero (Ctalamochita), ubicada en el puente de ingreso a la localidad de Villa Ascasubi, observado durante el periodo de crecida extraordinaria.

En cuanto a las conductividades se puede decir que el mayor valor registrado en este estudio correspondió al arroyo Tortugas con un valor de $16,35\text{ mS/cm}$ para una condición de aguas bajas.

Con respecto a la determinación del coeficiente de dispersión longitudinal, cabe señalar que la gran dificultad que tiene su determinación mediante técnicas convencionales, como un ensayo de trazadores, sumado a la gran variabilidad que presentan los resultados reportados en la bibliografía, en base a estimaciones de dicho coeficiente para distintos ríos del mundo, justifica el uso de una metodología que incluya las características particulares de

escurrimiento del tramo de río seleccionado (perfiles transversales de velocidad y batimetría). En la actualidad, las caracterizaciones hidrodinámicas que se realizan en el sistema fluvial de estudio en forma periódica, permiten mediante la metodología propuesta por esta tesis, obtener una estimación del coeficiente de dispersión longitudinal para distintas condiciones de flujo en las diferentes secciones aforadas de forma rápida y con muy bajo costo. Lo que posibilita conocer la variación espacial y temporal de este coeficiente para diferentes tramos del río Carcarañá y sus tributarios.

Para realizar el ajuste del perfil de velocidades se utilizaron funciones de aproximación basadas en distribuciones gamma, con $\alpha = \beta$, la cual no ajusta correctamente a la mayoría de los casos, debido a que es muy complejo aproximar distribuciones de velocidad de cauces naturales con un solo parámetro. Es por ello que se obtuvo un mejor ajuste en más secciones cuando se optó por utilizar $\alpha \neq \beta$. En los casos en que no fue posible realizar la aproximación mediante la función de aproximación basada en distribuciones gamma se realizó una regresión mediante funciones polinómicas, las cuales permiten un mejor ajuste ya que poseen más parámetros. En contrapartida se puede decir que el método pierde generalidad.

En el caso del ajuste de los perfiles de fondo mediante un perfil de aproximación basado en el parámetro ρ se observó que no ajustaba correctamente en cauces naturales, pero si en algunos cauces artificiales. Al igual que el ajuste de velocidades, en los casos donde el ajuste de fondo no fue bueno, se utilizó un ajuste polinómico, lo cual como ya se anteriormente quita generalidad al método.

Del análisis de los resultados obtenidos en el Río Saladillo y en el arroyo Tortugas, se determinó que estos poseen una capacidad de mezcla muy baja (bajos valores de los coeficientes de dispersión longitudinal en las secciones analizadas), ya que dichos cursos poseen perfiles de velocidad con escasa variación en la dirección transversal. Así, un contaminante descargado demoraría mucho tiempo en reducir su concentración por dispersión longitudinal.

En la actualidad, las campañas de aforos realizadas mediante el uso de ADCP, son cada vez más comunes y por lo tanto, mediante la metodología propuesta en esta tesis, se podría obtener en cada campaña de medición una estimación del coeficiente de dispersión longitudinal para cada una de las diferentes secciones del sistema de estudio.

Por último cabe decir que las fórmulas de Hermanek, utilizadas recientemente para definir líneas de ribera en la provincia de Córdoba, son ecuaciones de resistencia al flujo que no tienen en cuenta la variabilidad de la rugosidad del cauce. En las condiciones de flujo de aguas altas, la rugosidad aparente del cauce es mayor, debido a los efectos del escurrimiento por la planicie de inundación, que el valor de 0,0294 representado por el coeficiente incluido en la formulación de Hermanek, por lo que esta expresión sobrestima significativamente los caudales escurridos en una sección de cauce definida aun cuando se utilicen las pendientes de superficie libre y de fondo observadas.

Hermanek, al igual que todas las fórmulas de resistencia al flujo, son útiles para caracterizar una situación observada de un curso fluvial y presentan errores importantes cuando se las emplea para hacer predicción de eventos extremos, necesarios para el diseño de medidas no estructurales (por ejemplo líneas de ribera) y medidas estructurales requeridas para mitigar el riesgo hídrico ya que estas formulaciones requieren conocer la pendiente de la superficie libre, que difiere significativamente de la pendiente de fondo para eventos extremos. Es por esto, que es fundamental la implementación de un modelo hidráulico, en donde la condición de borde aguas abajo se encuentre en un sitio alejado de obstrucciones, en donde pueda asegurarse que la pendiente de energía es igual a la pendiente de fondo (flujo uniforme). La implementación de un modelo 1D con una correcta selección de las condiciones de borde, tomando en cuenta la presencia de infraestructura hídrica y con una correcta selección de los coeficientes de rugosidad, ha permitido obtener una buena delimitación de áreas inundables.

CAPITULO IX

RECOMENDACIONES



Capítulo IX
RECOMENDACIONES

En virtud de las conclusiones anteriores y la experiencia de la investigación desarrollada se recomienda:

- Continuar con el monitoreo del sistema fluvial incluyendo mediciones en distintas secciones de los ríos Tercero (Ctalamochita), Saladillo y Carcarañá, y del arroyo Tortugas, con el objetivo de ampliar la base de datos de los parámetros hidráulicos y permitir un monitoreo más intenso de la calidad ambiental de ellos.
- Realizar un análisis de incertidumbre de las mediciones con ADCP, para estimar la incertidumbre asociada a las mediciones efectuadas.
- Instalar una estación limnimétrica automática sobre el Río Carcarañá en la localidad de Cruz Alta.
- Comenzar a utilizar la técnica LS-PIV/PTV para la evaluación de caudales de crecida en donde el ADCP, no pueda ser utilizado o implique riesgo en su uso.
- Continuar con la determinación del coeficiente de dispersión longitudinal para diferentes condiciones de flujo a lo largo del sistema fluvial del Río Carcarañá como así también en sus principales tributarios.

REFERENCIAS

- **Bedogni, M.D. (2011).** “Determinación del Caudal Ecológico para el Río Tercero (Ctalamochita)”. Trabajo final de la carrera Ingeniería Civil de la FCEfyN, UNC. Córdoba, Argentina.
- **Brandolin, P.G., Ávalos, M.A. De Angelo, C. (2013).** “The impact of flood control on the loss of wet lands in Argentina” *Aquatic Conserv: Mar. Freshw. Ecosyst.* 23: 291– 300.
- **Carr, M. L., Rehmann, C. R. (2007).** “Measuring the dispersion coefficient with acoustic Doppler current profilers”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(8), 977-982.
- **CIAMA (1992)** “Declaración de Dublín sobre el Agua y Desarrollo Sostenible” - Dublín – Irlanda – Enero de 1992
- **Cossavella, A.M.; Carranza, P.; Monarde, F.; Larrosa, N.; Roqué, M; Nuño, C.; Hunziker, M.L; Ferreyra, M. y Melián J et al. (2003).** “Gestión de efluentes líquidos en la cuenca del Río Tercero (Ctalamochita)”. XXIVº Congreso Nacional del Agua 2013, San Juan, Argentina.
- **Deng, Z. Q., Singh, V. P., Bengtsson, L.(2001).** “Longitudinal dispersion coefficient in straight rivers.”. *J. Hydraul. Eng.*, 127(11), 919–927.
- **Dirección Provincial de Hidráulica (1994)** - Resolución 25/1994– Gobierno de la Provincia de Córdoba - Argentina
- **Dirección Provincial de Hidráulica DPH (1952)** “Decreto N^o 448” – Gobierno de la Provincia de Córdoba - Argentina.
- **Elder, J. W.(1959).** “The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow.” *J. Fluid Mech.*, 5(4), 544–560.
- **Farias H.D y Pílan M. T (2000)** “Análisis de fórmulas de fricción aplicables a canales arenosos en régimen”. XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Córdoba, Argentina. Tomo I, pp. 511-520

REFERENCIAS

- **Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J., Brooks, N. H. (1979).** "Mixing in inland and coastal waters". Academic, New York.
- **Hager, W. (2009)** "Hydraulicians in Europe 1800-2000". 1º Edición. IAHR – Monograph. CRC Press. ISBN: 978-9078046066
- **Hermanek J. (1905)** "The mean velocity profile in natural and artificial channels" Oesterr. Ing. Arch., Nº. 16, pp. 237-243.
- **Herrero, H.; Szupiany, R.; García, C.M.; Blettler, M.; Espinola, L.; y Amsler M. (2013).** "Evaluación Experimental de la Hidrodinámica y Procesos de Mezcla en la Confluencia de los ríos Tercero y Saladillo". VI Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. Santa Fe, Argentina.
- **Iwasa, Y., y Aya, S. (1991).** "Predicting longitudinal dispersion coefficient in open-channel flows." Proc., Int. Symp. on Environmental Hydraulics, J. H. W. Lee and Y. K. Cheung, eds., Rotterdam, The Netherlands, 505–510
- **Koussis, A. D. y J. Rodriguez-Mirasol (1998),** "Hydraulic estimation of dispersion coefficient for streams". J. Hydraul. Eng.-ASCE , 124, 317{320.
- **Larrosa, N. et al. (2008).** "Estudio de Contaminación del Río Tercero (Ctalamochita) y control de vertidos". UNC. Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Departamento de Hidráulica. Córdoba. Argentina.
- **Lenarduzzi, M.G. (2013).** "Caracterización hidrodinámica experimental de un tramo del Río Tercero (Ctalamochita) con fines hidroambientales". Práctica Supervisada de la carrera Ingeniería Civil de la FCEFyN UNC. Córdoba, Argentina.
- **Lipscomb, S.W., (1995),** "Quality assurance plan for discharge measurements using broad-band acoustic Doppler profilers"- U.S. Geological Survey Open-File Report 95–701, 7 p.
- **Liu, H (1977)** - "Predicting dispersion coefficient of stream" J. Enviromental Engineering ASCE 103(1), 59-69.

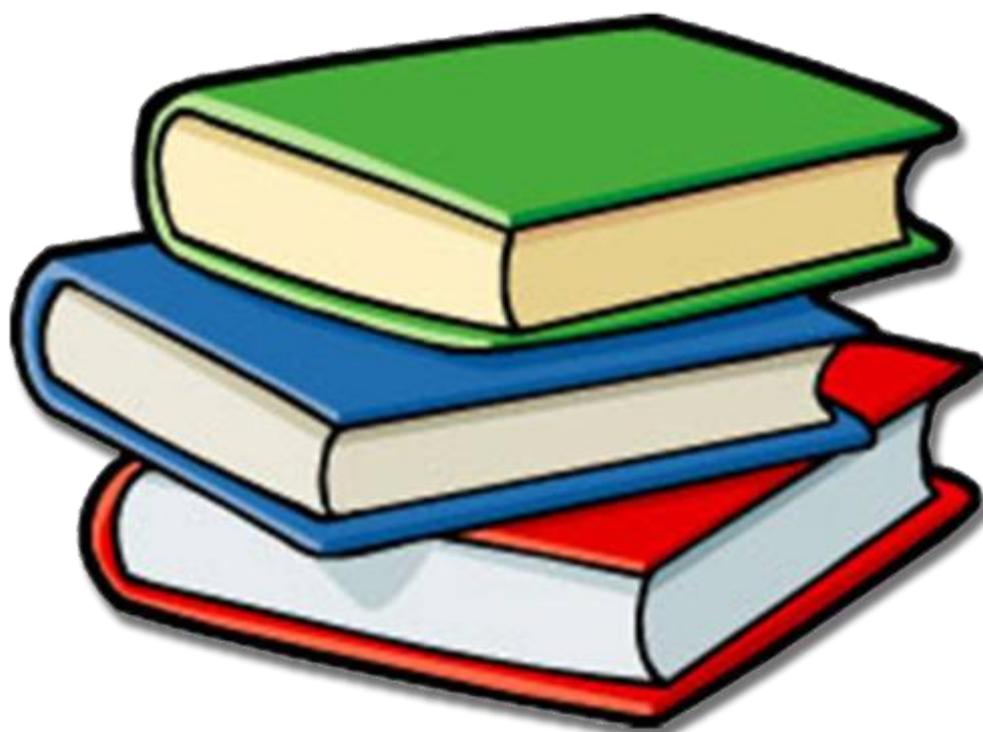
REFERENCIAS

- **Lopardo, R.A. y Seoane, R. (2000)** "Algunas reflexiones sobre crecidas e inundaciones", Ingeniería del Agua, Vol. 7, N° 1, ISBN 1134-2196, Valencia, España, marzo 2000, pág. 11-21
- **Martin L. James y McCutcheon C. Steven (1999)** – "Hydrodynamic and transport for water quality modeling" ISBN 0-87371-612-4 – Ed. Lewis Publishers
- **Moreyra, F. (2008)**. "Aspectos medioambientales de la cuenca del Río Tercero y su relación con la calidad del agua". Trabajo final de la carrera Ingeniería Civil de la FCEFyN UNC. Córdoba, Argentina.
- **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. Geological Survey Scientific Investigations Report 2006–5079, 26 p.
- **Mueller, D.S., y Wagner, C.R., (2009)**, "Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat": U.S. Geological Survey. Techniques and Methods 3A–22, 72 p. (available online at <http://pubs.water.usgs.gov/tm3a22>).
- **Oberg, K.A., Morlock, S.E., y Caldwell, W.S., (2005)**, "Quality-assurance plan for discharge measurements using acoustic Doppler current profilers" - U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005–5183, 35 p.
- **Oviedo Zabala, S. et al. (2009)**. "Impacto de vertidos industriales y cloacales en el Río Tercero (Ctalamaochita)". Congreso Nacional del Agua - CONAGUA 2009 Trelew – Chubut – Argentina.
- **Riccardi, Gerardo.; Basile, Pedro; Zimmermann, Erik; Stenta, Hernán; Bussi, Pablo; Mangiameli, Pablo y Pesci, María (2013)**. "Diseño de presas de navegación en el estudio de prefactibilidad para el aprovechamiento del Río Carcarañá como vía fluvial navegable". VI Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. Santa Fe, Argentina.

REFERENCIAS

- **Rutherford, J. C.(1994).** "River mixing". John Wiley & Son, Chichester ISBN: 0-471-94282-0
- **Saldaño, V. (2010).** "Modelación Hidrológica y de Calidad de Agua del Río Tercero (Ctalamochita)". Trabajo final de la carrera Ingeniería Civil de la FCEFyN UNC. Córdoba, Argentina.
- **Seo, I. W., Baek, K. O. (2004).** "Estimation of the longitudinal dispersion coefficient using the velocity profile in natural streams". J. Hydraul. Eng., 130(3), 227–236.
- **Seo, I. W., and Cheong, T. S.(1998).** "Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams."J. Hydraul. Eng., 124(1), 25–32.
- **Simpson, M.R., (2002),** "Discharge measurements using a broadband acoustic Doppler current profiler" - U.S. Geological Survey Open-File Report 01–01, 123 p., accessed June 22, 2007, at <http://pubs.usgs.gov/of/2001/ofr0101/>.
- **Taylor, G. I. (1954)** "The Dispersion of Matter in Turbulent Flow through a Pipe", Proc. Roy. Soc. A, 223, 446–468
- **Teledyne RD Instruments, (1996),** "Principals of operation—A practical primer for broadband acoustic Doppler current profilers" (2d ed.): San Diego, CA, Teledyne RD Instruments, 51 p.
- **Urick, R.J., (1993),** "Principles of underwater sound (3d ed.)" - New York, McGraw-Hill, 423 p.
- **World Commission on Environment and Development (1987)** "Our Common Future", Oxford University Press, New York.

ANEXO: PUBLICACIONES EN CONGRESOS NACIONALES E INTERNACIONALES



**PRIMER CONGRESO IBEROAMERICANO DE PROTECCIÓN, GESTIÓN,
EFICIENCIA, RECICLADO Y REÚSO DEL AGUA**

**PRIMER SEMINARIO DE UNIVERSALIZACIÓN DEL ACCESO AL AGUA APTA
PARA EL CONSUMO HUMANO**

**CARACTERIZACIÓN DEL FLUJO EN EL RÍO TERCERO (CTALAMOCHITA)
PARA DETERMINAR PARÁMETROS HIDRÁULICOS REQUERIDOS EN EL
MONITOREO AMBIENTAL**

*Horacio Herrero¹; José M. Díaz Lozada¹; Marcos Lenarduzzi¹; Ana María Cossavella² y Carlos
M. García¹*

*1 Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad
Nacional de Córdoba, Av. Filloy s/n, Ciudad Universitaria, CP 5000, Córdoba, Argentina,*

email:hsherrero@yahoo.com.ar

*2 Área Preservación y Control del Recurso de la Secretaría de Recursos Hídricos del Gobierno de la Provincia de
Córdoba, CP 5000, Córdoba, Argentina.*

RESUMEN:

El sistema fluvial del Río Tercero (Ctalamochita) es uno de los principales recursos de agua superficial de la Provincia de Córdoba, por lo que es necesario garantizar la calidad de este recurso como fuente de agua potable para consumo de la población. La FCEFyN – UNC, realiza en forma periódica monitoreos de calidad de agua y aforos en distintas secciones del río Tercero. Tradicionalmente se utilizaron para los aforos métodos y técnicas convencionales (aforo por vadeo con molinetes). En la actualidad se utilizan los Perfiladores de Corriente Acústica Doppler (ADCP), lo que permite mejorar los muestreos obtenidos con técnicas convencionales logrando mayor resolución espacial y temporal de las velocidades del flujo, como así mayor precisión en el relevamiento de la morfología del cauce. Este trabajo tiene como objetivo general la caracterización experimental del escurrimiento superficial en dos tramos del Río Tercero, uno ubicado aguas abajo del polo industrial y otro en la confluencia con el Río Saladillo donde recibe un importante aporte de caudal de este último, con el fin de determinar parámetros hidráulicos (caudales, distribuciones de velocidad de flujo, etc.) que permitan monitorear el seguimiento de la calidad ambiental.

ASBTARCT:

The Tercero(Ctalamochita) River system is the largest supply of fresh water of the Province of Córdoba, making it necessary to ensure the quality of this resource as a source of drinking water for public consumption. The FCEFyN - UNC, periodically performs water quality and flow discharge monitoring in different sections of the Tercero River. Traditionally, flow discharge measurements using conventional current meters had been performed in this River system. Nowadays, Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP) are being used, which improves the sampling obtained with conventional techniques achieving greater spatial and temporal resolution of the flow field, as well as accuracy in the survey of the channel morphology. This work aims to perform an experimental characterization using ADCP of the flow in two sections of the Tercero River, one located downstream of the industrial area and another at the confluence with the SaladilloRiver where the Tercero River receives a significant amount of flow discharge. The experimental characterization is performed in order to determine hydraulic parameters (flow discharge, flow velocity distribution, etc.) which allows monitoring environmental quality.

PALABRAS CLAVES:Recurso Hídrico, cuantificación, Hidrodinámica, ADCP



Sexto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos

Santa Fe, Argentina, 6 al 8 de noviembre 2013

CUANTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL ESCURRIMIENTO EN LA CUENCA DEL RÍO CARCARAÑÁ

Gustavo Matías Barchiesi¹, José Manuel Díaz Lozada¹, Federico Caminal¹, Horacio Herrero^{1,4}, C. Marcelo García^{1,4}, Ana Cossavella², Edgar Castello², Martín Romagnoli³ y Margarita Portapila³.

¹Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. Av. Filloy s/n, Ciudad Universitaria, CP 5000, Córdoba, Argentina

²Secretaría de Recursos Hídricos del Gobierno de la Provincia de Córdoba, CP 5000, Córdoba, Argentina

³Centro Internacional Franco Argentino de Ciencias de la Información y de Sistemas, CONICET, 27 de Febrero 210 bis, S2000EZP, Rosario, Argentina.

⁴Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

RESUMEN

El río Carcarañá nace en la provincia de Córdoba, Argentina por la confluencia de los ríos Tercero o Ctalamochita y Saladillo (nombre del curso inferior del río Cuarto). Luego, este río ingresa en la provincia de Santa Fe, a la cual cruza desembocando en la localidad de Gaboto en el río Coronda, que a su vez lo hace en el río Paraná. Debido a la escasez de información hidrológica disponible de los cursos de agua del sistema fluvial del río Carcarañá es necesario un programa de mediciones in situ para la cuantificación y caracterización del escurrimiento en el sistema, para conocer sus variaciones tanto espaciales como temporales. Por ello se lleva adelante un esfuerzo conjunto entre tres instituciones de las Provincias de Córdoba y Santa Fe (Universidad Nacional de Córdoba, CIFASIS CCT Rosario y la Secretaría de Recursos Hídricos del Gobierno de la Provincia de Córdoba). En este trabajo se reportan los resultados obtenidos durante las campañas de monitoreo desarrolladas en el primer año de trabajo conjunto que incluyen la determinación de caudales escurridos superficialmente y parámetros hidráulicos globales característicos del escurrimiento en distintas secciones (caudal, profundidad y velocidades media, pendiente de la superficie libre, etc.). Dadas las características del sistema fluvial estudiado, para la determinación de los parámetros hidráulicos se realizaron mediciones de velocidad del flujo utilizando un Perfilador de Corriente Acústico Doppler para aguas poco profundas (ADCP). Además, para complementar la caracterización del sistema fluvial, en cada sección de aforo se realizaron determinaciones in situ de temperatura y conductividad de la masa de agua con distintas sondas multi-paramétricas.

ABSTRACT

Carcarañá River starts in the province of Córdoba, Argentina formed by the confluence of the Tercero River (also called Ctalamochita) and Saladillo River. Then, the Carcarañá River enters the province of Santa Fe, which crosses discharging in the Coronda River near Gaboto, which in turn discharge in the Paraná River. Because of the hydrological data scarcity in the Carcarañá River system it is necessary to develop a general program for quantification and characterization of flow discharge evaluating its spatial and temporal evolution. A joint effort has been developed involving three institutions of the Córdoba and Santa Fe provinces of (National University of Córdoba, CIFASIS CCT Rosario and Secretary of Water Resources, Government of the Province of Córdoba). This work summarizes results obtained during monitoring field work carried out during the first year of the joint effort determining flow discharge and bulk hydraulics parameters (mean flow depth and velocity, free surface water surface slopes, etc.). On the basis of the characteristics of the Carcarañá River system, an Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) for shallow water has been selected to perform water velocity measurements and to determine the bulk hydraulic parameters. Furthermore, in situ measurements of water temperature and conductivity have been performed using multi-parametric probe complementing the characterization of the Carcarañá River system.



Sexto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos

Santa Fe, Argentina. 6 al 8 de noviembre 2013.

EVALUACIÓN DEL COEFICIENTE DE DISPERSIÓN LONGITUDINAL EN RÍOS UTILIZANDO ADCP

Federico Caminal¹, Gustavo Matías Barchiesi¹, José Manuel Díaz Lozada¹, Horacio Herrero¹, Marcos Lenarduzzi¹, C. Marcelo García¹, Florencia Nadal³, Ana Cossavella^{2,4}

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

Av Filloy s/n, Ciudad Universitaria, CP 5000, Córdoba, Argentina

2 - Área Preservación y Control del Recurso de la Secretaría de Recursos Hídricos del Gobierno de la Provincia de Córdoba, CP 5000, Córdoba, Argentina

3 - Área de Limnología y Calidad de Agua, CIRSA, Instituto Nacional del Agua, Avenida Ambrosio Olmos 1142, CP 5000, Córdoba, Argentina

4 - Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. Av Filloy s/n, Ciudad Universitaria, CP 5000, Córdoba, Argentina

E-mail: fedecaminal@gmail.com

RESUMEN

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

ABSTRACT

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

Cuantificación del escurrimiento superficial de la cuenca del Río Carcarañá

José M. Díaz Lozada¹, Gustavo Matías Barchiesi¹, Horacio Herrero^{1,4}, Carlos. M. García^{1,4}, Edgar Castello², Martín Romagnoli³ y Margarita Portapila³

¹ Centro de Estudios y Tecnología del agua (CETA), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. Av. Filloy s/n, Ciudad Universitaria, CP 5000, Córdoba, Argentina

² Secretaría de Recursos Hídricos del Gobierno de la Provincia de Córdoba, CP 5000, Córdoba, Argentina

³ Centro Internacional Franco Argentino de Ciencias de la Información y de Sistemas, CONICET, 27 de Febrero 210 bis, S2000EZP, Rosario, Argentina

⁴ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

Mail de contacto: jmdiazlozada@gmail.com

RESUMEN

La cuenca del Río Carcarañá, incluyendo a sus principales tributarios, tales como el río Tercero (Ctalamochita), río Saladillo, Arroyo Tortugas, entre otros, es una importante cuenca superficial ubicada en la zona central de las Provincias de Córdoba y Santa Fe, lo que la convierte en una fuente potencial de agua para diferentes usos. A pesar de la importancia de esta cuenca, la información hidrológica disponible es escasa por lo que es necesario realizar un programa de mediciones in situ para cuantificar y caracterizar el escurrimiento superficial del sistema para conocer sus variaciones tanto espaciales como temporales. Por ello se lleva adelante 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). En este trabajo se reportan los resultados obtenidos de la cuantificación y caracterización del escurrimiento superficial en la cuenca del Río Carcarañá (hasta su desembocadura en el río Coronda) durante las campañas de monitoreo desarrolladas en el primer año de trabajo conjunto. Dadas las características del sistema estudiado se realizaron los aforos utilizando un Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP) específico para aguas poco profundas.

Palabras clave: ADCP, Cuantificación del recurso hídrico, Río Carcarañá

ABSTRACT

The Carcarañá river basin, including its main tributaries, such as the Tercero (Ctalamochita), River, the Saladillo River and the Tortugas Creek, among others, is an important basin located in the central area of the provinces of Córdoba and Santa Fe, which makes a potential source of water for different uses. The available hydrological information of the basin is limited, so it is necessary to perform an Streamflow Monitoring to quantify and characterize the system runoff flow and to evaluate its spatial and temporal variations. Therefore, a joint effort between three institutions in the provinces of Córdoba and Santa Fe (CETA National University of Córdoba, CIFASIS CCT Rosario and Water Resources Secretary of the Government of the Province of Córdoba) is carried on. This paper shows the results of the quantification and characterization of the streamflow of different tributaries of the Carcarañá river (up to its mouth in the Coronda River). The results were obtained along different surveys during the first year of joint work. Given the characteristics of the river system, it has been necessary to use for the streamflow monitoring an specific Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) for shallow water.

Keywords: ADCP, quantification of water resource, Carcarañá River

Determinación del Coeficiente de Dispersión Longitudinal en ríos usando ADCP.

José M. Díaz Lozada¹, Federico Caminal¹, Gustavo Matías Barchiesi¹, Horacio Herrero^{1,2}, C.M. García^{1,2}

¹ Centro de Estudios y Tecnología del agua (CETA), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. Av. Filloy s/n, Ciudad Universitaria, CP 5000, Córdoba, Argentina

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

Mail de contacto: jmdiazlozada@gmail.com

RESUMEN

El Coeficiente de Dispersión Longitudinal es un parámetro fundamental requerido para implementar un modelo de dispersión de contaminantes en un curso fluvial. Sin embargo su determinación mediante técnicas convencionales, como por ejemplo ensayo de trazadores, requieren una gran inversión en planificación, personal y análisis posterior. Debido a esta dificultad diversos autores han desarrollado fórmulas empíricas que permiten estimar el coeficiente de dispersión longitudinal en base a parámetros hidráulicos globales (profundidad media, velocidad media, ancho, etc). Sin embargo estas expresiones presentan gran dispersión en sus resultados y solo se ajustan adecuadamente en ríos con características similares a las que fueron calibradas. Es por ello que en este trabajo se busca estimar de manera alternativa el coeficiente de dispersión longitudinal mediante una caracterización hidrodinámica detallada realizada en un curso fluvial determinado con un Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP). Se adoptó como sistema fluvial de estudio al río Carcarañá, el cual es monitoreado periódicamente en todo su desarrollo por el grupo de trabajo, de forma de analizar como varía temporal y espacialmente el coeficiente de dispersión longitudinal.

1. INTRODUCCION

La cuenca del Río Carcarañá, en una importante cuenca superficial ubicada en el área central de la República Argentina, la cual abarca gran parte de las provincias de Córdoba y Santa fe. Dentro de la misma se encuentran los ríos Tercero (Ctalamochita), Saladillo y Arroyo Tortugas, los cuales son los principales tributarios del Río Carcarañá (Figura 1). Dada su ubicación en una de las regiones más prosperas del país, los ríos de la cuenca se ven afectados por: (a) Descargas industriales - reconociendo un peligro importante en la localidad de Río Tercero, en donde se localiza un foco industrial-. (b) Descargas cloacales no tratadas adecuadamente (c) Contaminación por agroquímicos, ya que la cuenca abarca una de las zonas agrícolas más ricas del planeta. Debido a esto, se lleva adelante 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) monitoreos de calidad de agua y aforos con el objeto de preservar la calidad del recurso y cuantificar y caracterizar el escurrimiento superficial de los cursos que componen dicha cuenca.