

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales



Práctica Profesional Supervisada

*Incertidumbres en Mediciones de Caudal con
Perfiladores de Corriente Acústicos Doppler desde
Plataformas Móviles*

Autor: Victoria Flores Nieto

Tutor: PhD. Ing. Carlos Marcelo García

Supervisor externo: Dra. Ing. Leticia Tarrab

Córdoba, Noviembre de 2016

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a quienes colaboraron en forma desinteresada y contribuyeron de alguna forma a la realización de este trabajo:

A toda mi familia por su apoyo constante y sus consejos. Especialmente a mis padres, por el sacrificio que hacen día a día por brindarnos a sus hijos lo mejor que este a su alcance y por la educación que me dieron. A mi hermano por su compañía, ayuda, explicaciones y por estar siempre que lo necesite. Y a mi cuñada por siempre tener la sonrisa o la palabra justa para acompañarme, tanto en los momentos difíciles como en los felices.

A mi tutor Dr. Carlos Marcelo García y mi supervisora Leticia Tarrab, por guiarme y dedicarme su tiempo y atención, brindándome su ayuda y sus conocimientos siempre que lo necesite.

A los miembros del tribunal, Dr. Carlos Marcelo García, MSc. Ing. Mariano Corral y MSc. Ing. Cecilia Pozzi por la lectura del presente trabajo, sus críticas y consejos.

Al Dr. Ing. Horacio Herrero y a MSc. Ing. Antoine Patalano por sus aportes y contribución valiosa al presente trabajo.

A todo el equipo de trabajo del Laboratorio de Hidráulica (LH), de la facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, por poner a mi disposición los recursos necesarios para poder realizar este trabajo. Por su buena predisposición, su ayuda y su apoyo tanto personal como profesional.

A mis profesores de grado por su aporte en mi formación como ingeniera.

Y a mis amigos y compañeros por acompañarme en este camino, compartiendo horas de estudio, muchos mates, risas, nervios y momentos divertidos.

RESÚMEN

Actualmente el perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP por sus siglas en inglés) es el instrumento acústico utilizado comúnmente en el caso de mediciones de caudales en cursos fluviales. Este permite la medición precisa de caudales y la caracterización tanto del flujo medio como de la estructura de la turbulencia (Oberg y Mueller, 2007). Las mediciones con ADCP se hacen típicamente moviendo un bote con el instrumento a través de una sección transversal a una velocidad menor o igual a la velocidad media del agua. Un ADCP no puede muestrear simultáneamente el campo de flujo instantáneo de una sección transversal completa, sino que a medida que el instrumento se mueve en el bote a través de la sección transversal, muestrea un campo de flujo con velocidades que dependerán de las características propias del flujo y de sus fluctuaciones (velocidad del flujo, periodo de la fluctuación, amplitud, etc) como así también de la metodología empleada para realizar la medición (velocidad del bote, frecuencia del instrumento, etc.).

En el caso de tramos curvos de ríos o canales, el flujo suele separarse en la margen interna causando divergencia de las líneas de corriente y desarrollándose una zona de recirculación en la cual el flujo se vuelve inestable y presenta fluctuaciones periódicas de baja frecuencia.

La presencia de fluctuaciones de baja frecuencia (evolución temporal del flujo) en los sistemas fluviales genera una reducción cuasi-periódica en la sección efectiva de flujo (aumenta la zona de recirculación) y por lo tanto podría producir desviaciones significativas entre las mediciones individuales de caudal desde plataformas móviles, afectando de manera considerable la incertidumbre en este tipo de mediciones. Con lo cual, los protocolos acerca de las estrategias de muestreo recomendados en la actualidad para la medición de caudal no resultan en mediciones precisas para estos casos, ya que los mismos fueron desarrollados asumiendo procesos estacionarios.

El propósito de este trabajo es cuantificar la incertidumbre en las mediciones de caudal de flujo realizadas desde plataformas móviles utilizando ADCP cuando están presentes fluctuaciones de caudal generadas por efectos de la geometría en planta. Para ello, primero se realizó un análisis dimensional y del análisis de campos de flujos tridimensionales sintéticos generados con Simulación Numérica Directa (DNS) se desarrollaron ecuaciones que permiten estimar la incertidumbre en las mediciones de caudal con ADCP debido a la presencia de fluctuaciones de baja frecuencia en el flujo. Luego se procedió a cuantificar la incertidumbre en las mediciones de caudal a partir de

datos medidos de campo con ADCP en ríos naturales y canales que presentan diferentes condiciones de flujo con el fin de validar los resultados encontrados. Los hallazgos presentados en este documento permiten definir estrategias de muestreo óptimas mediante la elección del tiempo de exposición requerido por el ADCP para medir con precisión el caudal.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	7
1.1. MOTIVACIÓN.....	9
1.1.1. Motivación tecnológica	9
1.1.2. Motivación científica	11
1.2. OBJETIVOS	12
1.3. METODOLOGÍA.....	13
2. REVISION DE ANTECEDENTES	15
2.1. FLUJO EN CURVAS	15
2.1.1. Separación del flujo en curvas.....	17
2.1.2. Fluctuaciones de baja frecuencia del flujo en curvas	19
2.2. MEDICIÓN DE CAUDALES MEDIANTE PERFILADORES DE CORRIENTE ACÚSTICOS DOPPLER (ADCP)	19
2.3. MEDICIÓN DE CAUDAL CON ADCP DESDE PLATAFORMAS MOVILES.....	20
2.4. INCERTIDUMBRES EN LA DETERMINACION DEL CAUDAL CON ADCP DESDE PLATAFORMAS MÓVILES.....	25
2.4.1. Incertidumbres en la medición de caudal con ADCP desde plataformas móviles debido a las fluctuaciones turbulentas	27
3. ANÁLISIS ADIMENSIONAL.....	35
3.1. INTRODUCCIÓN.....	35
3.2. TEOREMA π	36
3.3. Números adimensionales relevantes en fluctuaciones de baja frecuencia en flujo en curvas.	38
3.4. Forma funcional.....	40
4. MEDICIONES EN LABORATORIO.....	42
4.1. INTRODUCCIÓN.....	42
4.2. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL	42
4.3. TÉCNICAS DE MEDICIÓN UTILIZADAS	44

4.4.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	46
4.5.	ANALISIS DE FLUCTUACIONES PRESENTES EN EL FLUJO	48
4.6.	DETERMINACIÓN DE INCERTIDUMBRES EN LA MEDICIÓN DEL CAUDAL CON ADCP	54
4.7.	RESULTADOS	56
5.	MEDICIONES EN CAMPO	58
5.1.	DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE MEDICIÓN	58
5.2.	INSTRUMENTAL EMPLEADO	61
5.2.1.	Perfilador de Corrientes Acústico Doppler ADCP	61
5.2.2.	Drone	65
5.3.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL y METODOS DE PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.....	67
5.3.1.	Programa RiverSurveyor Live.....	70
5.4.	RESULTADOS	71
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES.....	77
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
8.	ANEXO.....	89

1. INTRODUCCIÓN

La medición de caudales en canales y ríos es una herramienta fundamental para la evaluación y el manejo del recurso hídrico superficial. El instrumental disponible para la medición de caudales de flujos turbulentos tanto en campo, como en laboratorio se ha incrementado notablemente en el último tiempo. El empleo de anemometría acústica basada en el efecto Doppler, se ha convertido en una práctica universal en hidráulica fluvial. Esta tecnología se basa en el principio de cambio de frecuencia que produce una partícula transportada por el flujo ante el rebote acústico. El instrumental que es utilizado para medir el caudal en campo se denomina perfilador de corrientes acústico Doppler (ADCP por sus siglas en inglés). Los ADCP se emplean en todo el mundo para medir el flujo en cuerpos de agua tales como ríos, canales y estuarios (Oberg et al., 2005; Oberg y Mueller, 2007) contribuyendo a una mejor caracterización de la dinámica fluvial y de los procesos hidrodinámicos asociados y además, también se han utilizado para caracterizar el campo de flujo tridimensional en canales artificiales y plantas de tratamiento de aguas (García et al., 2010).

Esta tecnología permite medir los caudales de manera precisa y caracterizar el flujo medio (Simpson, 2001; Mueller, 2002a; Dinehart y Burau, 2005; Oberg et al., 2005; García et al., 2007, Jackson et al., 2007). Entre las ventajas del uso del ADCP podemos nombrar su simplicidad, bajo costo relativo y una alta resolución temporal y espacial del campo 3D del flujo, adquiriendo de esta manera información que no es posible obtener por otros métodos convencionales como lo son por ejemplo los molinetes. De esta manera, el ADCP permite caracterizar e identificar las estructuras turbulentas tridimensionales en flujos naturales desde una embarcación en movimiento o estacionaria (Lipscomb, 1995).

Existen ciertos trabajos donde el objetivo, además de cuantificar los caudales de flujo, fue caracterizar las componentes tridimensionales del flujo y la turbulencia mediante un ADCP (Droz et al., 1998; Stacey et al., 1999; Lu y Lueck, 1999a; 1999b, Schemper y Admiraal, 2002; Nystrom et al., 2002; Howarth, 2002; Kawanisi, 2004). Más recientemente se ha mostrado que es posible utilizar este instrumento para inferir esfuerzos de corte (Kostaschuk et al., 2004), caracterizar el campo de velocidades (González -Castro et al., 1996; Muste et al., 2004; Dinehart y Burau, 2005; Parsons et al., 2007; Szupiany et al., 2007; 2009; 2012), realizar relevamientos morfológicos (Guerrero y Lamberti, 2011, Jamieson et al., 2011), estimar el transporte de sedimentos total (Deines 1999; Rennie et al., 2002), estimar el transporte sedimentos en suspensión (Szupiany et al., 2009; Guerrero et al., 2011a; 2011b) y de fondo (Ramooz y Rennie, 2010; Jamieson et al, 2008,

2011), y la estimación del coeficiente de dispersión longitudinal en ríos (Carr y Rehmann, 2005, Carr et al., 2005) entre otras .

Los instrumentos convencionales (mecánicos) están siendo reemplazados rápidamente por los ADCPs tanto en las mediciones de cauces naturales como artificiales. Esto se debe a que se obtiene mayor eficiencia (menor tiempo de medición), mejor rendimiento y mejores condiciones de seguridad para el personal que debe realizar las mediciones. Si bien estos instrumentos se han convertido en una herramienta común, es necesario a la hora de utilizarlos, una correcta configuración y calibración del equipo, una adecuada metodología en la recolección de los datos y un pos-procesamiento de la información. Además se debe contar con personal técnico capacitado, para que puedan obtener datos precisos y confiables (Szupiany, 2013). Debido a la gran cantidad de usos y aplicaciones que tiene el ADCP, ha surgido la necesidad de identificar las fuentes de error en las mediciones y evaluar qué impacto tiene cada uno de ellos en la fiabilidad y calidad de los datos obtenidos, para así poder desarrollar protocolos que contemplen buenas prácticas de medición (Oberg y Mueller, 1994, Morlock, 1996, Shih et al., 2000, Mueller 2002a; 2002b; González-Castro et al., 2002; Marsden y Ingram, 2004; Abad et al., 2004; Mueller, 2004, Schmidt y Espey, 2004; Gaeuman y Jacobson, 2005; y Rennie y Rainville, 2006).

Las estimación de las incertidumbres en las mediciones de caudal con ADCP son necesarias en lo que respecta a la gestión del recurso (operación de compuertas, manejo de estructuras de control hidráulicas, etc. (Tarrab et al., 2011), en la validación de simulaciones numéricas (Cheng, et al., 2005), y en el control de la calidad de datos a fin de que sean válidos según los objetivos planteados y de utilidad para la comunidad científica en general (González-Castro, 2002).

Varios factores afectan la incertidumbre en las mediciones de caudal con ADCP desde plataformas móviles ya que las mismas incluyen las contribuciones de error de todos los procesos presentes durante el muestreo de flujo, como son la turbulencia del flujo, el ruido del instrumento y el ruido ambiental.

Una de las grandes incertidumbres en el caudal del flujo medido se puede atribuir a las fluctuaciones generadas por los efectos topográficos (fluctuación de la capa de corte que separa la zona de recirculación). La presencia de esta separación del flujo genera una reducción cuasi-periódica en la sección efectiva de flujo (aumenta la zona de recirculación). Este comportamiento impermanente genera incertidumbres en la

determinación de caudal desde plataformas móviles por lo que los protocolos recomendados en la actualidad para la medición de caudal con ADCP no resultan en mediciones precisas para estos casos.

En este trabajo se cuantificará la incertidumbre en las mediciones de caudal realizadas desde plataformas móviles utilizando ADCP cuando en el flujo se presenten fluctuaciones generadas por efectos de la geometría en planta. Para ello se realizó un análisis dimensional a los fines de identificar los grupos adimensionales relevantes que pueden afectar la incertidumbre en la medición del caudal. Luego se muestreo datos obtenidos por DNS y datos de caudales y velocidad obtenidos experimentalmente mediante la técnica de PTV en un canal artificial de fuerte curvatura, simulando el paso de un ADCP. Por último se realizaron mediciones de caudal con un ADCP en el río Suquía (Córdoba, Argentina). Posteriormente, con estos datos se evaluó analogías y diferencias entre los resultados obtenidos en campo y los datos muestreados en el laboratorio, con el fin de cuantificar la influencia que tienen las fluctuaciones de baja frecuencia que son inducidas por la geometría del cauce. Los hallazgos que surgen como resultado de este estudio permiten definir las estrategias de registro a los fines de optimizar las mediciones con ADCP.

1.1. MOTIVACIÓN

1.1.1. Motivación tecnológica

Actualmente, la tecnología acústica Doppler se ha convertido en una herramienta muy utilizada internacionalmente a la hora de realizar mediciones. Sin embargo, en la República Argentina su implementación todavía representa un desafío tecnológico importante. Su gran aceptación y su creciente protagonismo a la hora de realizar mediciones, se debe a que presenta como ventaja una amplia resolución espacial y temporal. De esta manera permite caracterizar con mayor precisión los flujos tridimensionales de campo y sus procesos. A su vez, permite determinar caudales de manera más precisa que otros métodos convencionales. Se considera necesario e importante comprender el comportamiento del flujo y cuáles son las causas y la incidencia que tienen cada uno de los procesos en la incertidumbre asociada a la medición, para a partir de esto, poder desarrollar recomendaciones y procedimientos de medición que permitan disminuir los errores y así realizar un manejo apropiado de los cauces, aplicando medidas correctivas en los cauces naturales cuando sea necesario y optimizando el diseño y funcionamiento de las obras hidráulicas.

La importancia de la determinación de los caudales de ríos, canales y estuarios de manera precisa radica en que, el sobredimensionamiento de las obras hidráulicas genera grandes costos e impactos negativos sobre el ambiente que se podrían evitar. Por otro lado las consecuencias de subestimar y subdimensionar, podrían ser catastróficas e implicar un gran impacto sobre el ambiente y la sociedad. Entre las posibles consecuencias se pueden nombrar, la pérdida de vías humanas, de flora y fauna, bienes públicos y privados, etc.

La precisión en las mediciones de caudal con ADCP desde plataformas móviles se logra aplicando técnicas experimentales y metodologías de medición óptimas siguiendo prácticas y recomendaciones que permitan minimizar los errores. Para desarrollar estas recomendaciones, primero se debe realizar un análisis en profundidad de las diferentes incertidumbres presentes en la medición y de los intervalos de confianza asociados a cada una de ellas. Este trabajo, se enfocó específicamente en las incertidumbres debido a fluctuaciones de baja frecuencia de flujo en curvas, debido a que es un tema sobre el cual todavía no se posee demasiada información ni se ha estudiado en profundidad y se cree que su estudio y entendimiento podría contribuir de manera significativa a desarrollar buenos procedimientos en las mediciones y disminuir los errores de las mismas.

Sumado a esto, desarrollar recomendaciones y buenas metodologías de medición con ADCP tiene como beneficio, contribuir al conocimiento de la incidencia de ciertos parámetros característicos y variables como ser velocidades medias, fluctuaciones, escalas de turbulencia, etc. que permiten lograr una caracterización del flujo de mayor calidad y exactitud. El conocimiento de estas características propias del flujo resulta de gran utilidad práctica para, por ejemplo:

- a) cuantificar los patrones de transporte de sedimentos (i.e. erosión y deposición),
- b) la determinación de patrones de dilución y mezcla de contaminantes,
- c) la construcción de estructuras de protección contra la erosión,
- d) estudios de ocupación del suelo,
- e) prevención de inundaciones, etc.

Estos estudios permitirán ante cada situación particular tomar las decisiones pertinentes que permitan hacer un uso adecuado del recurso natural y protege los bienes materiales, el ambiente (flora y fauna) y la vida humana.

1.1.2. Motivación científica

La motivación científica surge de que, aunque se trata de una tecnología muy utilizada actualmente en otros países y que ha sido estudiada por estos y por los fabricantes, hay a nivel internacional una gran falta de información científica acerca de la influencia que tienen las fluctuaciones de baja frecuencia en la incertidumbre de las mediciones de caudales en curvas. Al no haber estudios al respecto, tampoco se han desarrollado métodos de muestreo espacial y temporal que tengan en cuenta la influencia de este fenómeno a la hora de obtener datos precisos y confiables. La precisión en las mediciones se determina a partir de un análisis de incertidumbre y planteando a partir de esta información recomendaciones a tener en cuenta a la hora de realizar los muestreos.

A pesar del gran nivel de aceptación y uso que tienen los ADCP, no existe una metodología rigurosa para la estimación de la incertidumbre de medición de caudales con ADCP (Simpson y Oltman, 1993; Simpson, 2001). De esta manera, es frecuente que se presenten resultados de mediciones sin definir su precisión. Simpson (2001) presentó un modelo simplificado para determinar la precisión de las mediciones con ADCP desde plataformas móviles, en términos de incertidumbre. Sin embargo, el modelo de Simpson era en base a una sola medición y consideraba sólo la zona medida por el ADCP (capa media) y no tiene en cuenta las zonas en las cuales el ADCP no puede registrar datos.

Investigaciones más recientes han tenido como objeto la evaluación de los errores aleatorios y el sesgo en la medición de flujos turbulentos con (González-Castro y Muste, 2007; Mueller et al., 2007; Muste et al., 2010; Mueller y Oberg, 2011). Y aunque González-Castro y Muste (2007) presentaron un marco de análisis de las incertidumbres en las mediciones de caudal con ADCP desde plataformas móviles, este procedimiento no fue implementado en la práctica.

Los ADCP han sido muy utilizados desde los años '90 por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), el cual a lo largo de los años ha desarrollado memorándums (USGS-OSW 2002a; USGS-OSW 2002b) y reportes técnicos con el objetivo de estandarizar y optimizar el uso de los ADCP en la medición de los caudales (Oberg et al., 2005; Mueller y Wagner, 2006). Estas guías incluyen recomendaciones que aseguran una buena calidad en los datos obtenidos y permiten minimizar los errores en las mediciones del caudal. Oberg y Mueller (2007) analizaron mediciones de caudal con ADCP y hallaron que el rango de incertidumbre (errores aleatorios) en el nivel de confianza del 95% (2 desviaciones estándar fue de 5,4% para caudales medios realizando 4 transectas y de

4,2% para caudales medios realizando 8 transectas. Como resultado de esto, la estrategia espacial y temporal de muestreo recomendada para las mediciones de caudal desde plataformas móviles y flujo estacionario, fue realizar un mínimo de cuatro (4) transectas en pares recíprocos (Mueller y Wagner, 2009), calculándose el caudal medido, como el promedio de los caudales medidos en las 4 transectas. Si el caudal de cualquiera de las 4 transectas difería en más del 5 por ciento del caudal medido, se realizaban un mínimo de 4 transectas adicionales y se consideraba como el caudal medido, la media de las 8 transectas. Aunque esta práctica ha tenido gran aceptación y se la ha utilizado en gran medida, no existen evidencias científicas que muestren que 4 transectas representaban una aproximación óptima para las mediciones de caudal en ríos con diferentes condiciones de flujo (Oberg y Mueller, 2007), como podría ser el caso de flujo en curvas (no estacionario) tratado en este informe.

El USGS (2011) señaló que en condiciones estacionarias o cuasi-estacionarias el tiempo de muestreo del flujo es el principal parámetro a tener en cuenta a la hora de determinación el caudal, con el fin de reducir la incertidumbre en las estimaciones del mismo. Otras mediciones (Oberg y Mueller, 2007 y Czuba y Oberg (2008) también sugirieron que el tiempo total de medición era un factor crítico a la hora de reducir la incertidumbre en flujos de régimen estacionario.

En este contexto, y teniendo en cuenta que el flujo en curva es no estacionario y que los procedimientos descritos son válidos en condiciones estacionarias, surge la necesidad y se hace notoria la importancia que tiene la determinación de la incertidumbre en las mediciones de caudales para flujo turbulentos mediante ADCP, entre ellas la incertidumbre debido a las fluctuaciones de baja frecuencia analizada en el presente estudio. A partir de la determinación de la incertidumbre, se pueden optimizar las técnicas y/o metodologías de medición y elaborar recomendaciones para minimizar los errores (sesgo e incertidumbre aleatoria) en el uso de ADCP para medir caudales desde plataformas móviles.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo general de esta práctica supervisada es determinar la incertidumbre en las mediciones de caudal con Perfiladores de Corriente Acústicos Doppler (ADCP) desde plataformas móviles debido a fluctuaciones de baja frecuencia presentes en el flujo, a los fines de optimizar las técnicas de medición y elaborar recomendaciones para minimizar los errores (sesgo e incertidumbre aleatoria) en el uso de las técnicas de medición de

caudales. Para alcanzar el objetivo general, la presente tesis contempla los siguientes objetivos específicos:

- a) Comprender los procesos que se desarrollan en los flujos en curvas, específicamente la separación del flujo y las fluctuaciones de baja frecuencia.
- b) Comprender que es y cómo funciona un ADCP, y detectar cuáles son las incertidumbres a tener en cuenta a la hora de medir caudales con esta tecnología.
- c) Analizar los datos obtenidos en mediciones en canales curvos de laboratorio, identificando los procesos descritos en la revisión bibliográfica y estudiando su influencia en las mediciones.
- d) Realizar mediciones en campo a los fines de detectar los procesos descritos en la revisión bibliográfica detectando si los resultados obtenidos en laboratorio se correlacionan con los obtenidos a partir de datos medidos en campo.

1.3. METODOLOGÍA

La presente Práctica Supervisada se estructura en 8 capítulos. A continuación se detallan los temas tratados en cada uno.

En primera instancia, en el **Capítulo 1** se realiza una introducción al tema de estudio, los fundamentos, metodología, motivación de la misma y sus objetivos.

Seguidamente, en el **Capítulo 2** se realizó una exhaustiva recopilación de antecedentes del comportamiento del flujo en curvas y de los procesos físicos que se desarrollan en las mismas como ser la separación del flujo y las fluctuaciones de baja frecuencia. Además se obtuvo información sobre cómo funcionan los ADCPs, los cuales están basados en la tecnología de anemometría acústica basada en efecto doppler, sobre cómo se realizan las mediciones con estos elementos y sobre cuáles son las incertidumbres asociadas a este proceso.

En el **Capítulo 3** se realizó un análisis dimensional para identificar los grupos adimensionales relevantes que puedan afectar la incertidumbre en la medición de caudal en flujos que presentan fluctuaciones de baja frecuencia y se estableció entre ellos una forma funcional a partir del análisis de datos de campos de flujos turbulentos

tridimensionales generados con Simulación Numérica Directa (DNS). Se disponían estos datos debido a que los mismos fueron generados para un estudio de Incertidumbres en Mediciones de Caudal con Perfiladores de Corriente Acústicos Doppler desde Plataformas Móviles realizado con anterioridad (Tarrab, 2013).

Luego en el **Capítulo 4**, a partir de datos del campo de velocidades superficiales obtenidos a partir de mediciones realizadas con la técnica Particle Tracking Velocimetry (PTV), en un canal curvo en el Laboratorio de Hidromecánica de la Universidad de Karlsruhe, Alemania, se verificó la ecuación desarrollada mediante el análisis dimensional y los datos generados por DNS en el capítulo anterior. Además en el presente capítulo se explica la configuración experimental y la metodología empleada en las mediciones.

A los fines de cumplimentar con los objetivos de la presente tesis se diseñaron y realizaron campañas en una curva del Río Suquía. Es en el **Capítulo 5** donde se describe el sitio de medición, el instrumental y la metodología empleada. Se midieron velocidades con un Perfilador de Corrientes Doppler Acústico (ADCP). Estos datos fueron procesados a través del programa River Surveyor Live. Luego, en base a caudales y datos de velocidades registrados obtenidos en campo, se intenta verificar la ecuación desarrollada anteriormente a partir de los datos generados con DNS y los pertenecientes a las mediciones en el canal artificial y se expresan las analogías y diferencias encontradas.

En el **Capítulo 6** se presentan las conclusiones de la tesis y las recomendaciones generales. Finalmente, en el **Capítulo 7** se presentan las principales referencias bibliográficas consultadas en este estudio.

En forma adicional se incluye un Anexo como **Capítulo 8** en el cual se presenta el programa desarrollado en Matlab para el análisis de los campos de velocidades.

2. REVISION DE ANTECEDENTES

2.1. FLUJO EN CURVAS

El comportamiento del flujo en canales rectos se ha estudiado bastante y se conoce lo suficiente, sin embargo no siempre es apropiado extrapolar estos conocimientos a canales curvos ya que los fenómenos hidrodinámicos son diferentes.

Una curva es una ondulación en planta con secciones transversales uniformes o asimétricas en el caso de tratarse de un cauce natural, las cuales se caracterizan por presentar áreas de erosión o socavación en la margen externa y acumulación de sedimentos en la margen interna (Figura 1). El flujo en curvas es tridimensional y consiste en una componente primaria y dos componentes secundarias que combinadas forman un vector 3D en cualquier punto de la sección transversal. En los canales curvos se desarrollan diversos procesos complejos que producen fuertes gradientes de presión y redistribución de las velocidades como la sobreelevación de la superficie del agua, las corrientes secundarias, la separación del flujo en las márgenes y fluctuaciones de baja frecuencia (Figura 1).

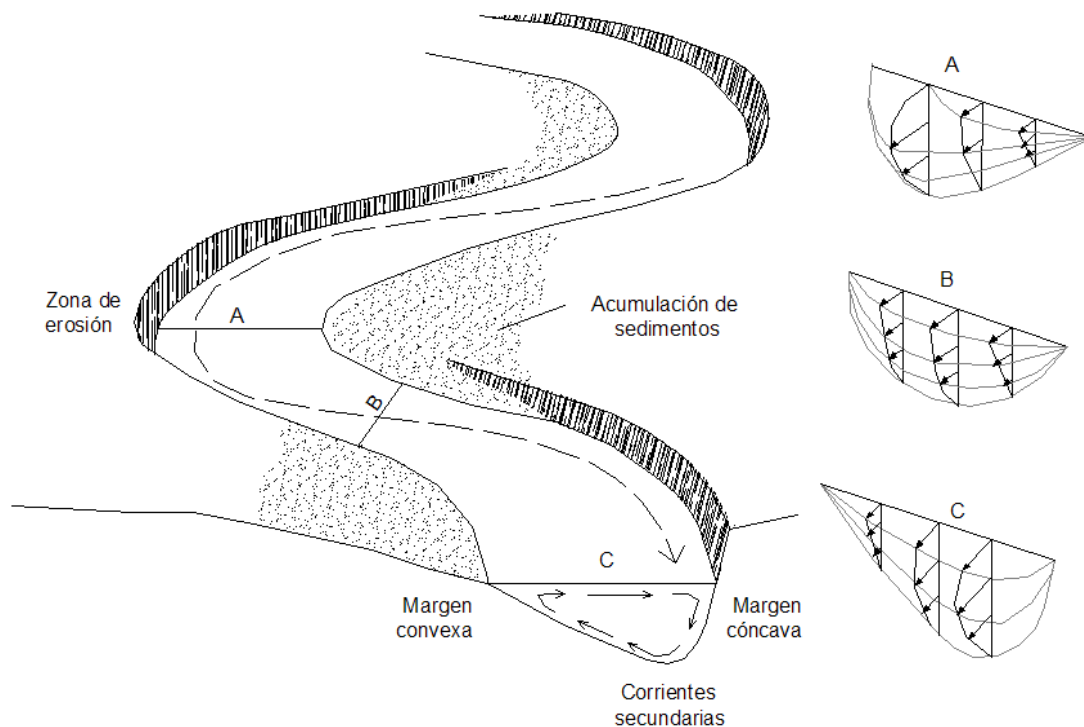


Figura 1: Características generales y redistribución de las velocidades de flujo en curvas (Tarrab, 2008)

Es muy importante entender el proceso por el cual se produce la redistribución de velocidades. Uno de los primeros en observar este fenómeno fue Thomson (1876) y lo atribuyó a las corrientes secundarias: *“debido a que la presión se incrementa desde la zona interna de la curva hacia la zona externa en correspondencia con la fuerza centrífuga, la superficie del agua presenta una inclinación transversal que aumenta desde la zona interna hacia la externa. Consecuentemente, la zona cercana a la margen interna de la curva se acelerará debido a la disminución de la pendiente longitudinal. Sin embargo, como la capa de agua que escurre por el fondo presenta velocidades menores a causa de la fricción o rugosidad, la fuerza centrífuga que actuará en esa capa será menor, y consecuentemente esta capa se moverá hacia la zona interna de la curva protegiéndola de esta manera de la erosión...*

Así Thomson propuso que la estructura del flujo en una sección curva puede ser representada por la combinación de un flujo primario en la dirección de la corriente y un flujo secundario perpendicular al mismo, de forma helicoidal o en espiral (Figura 2).

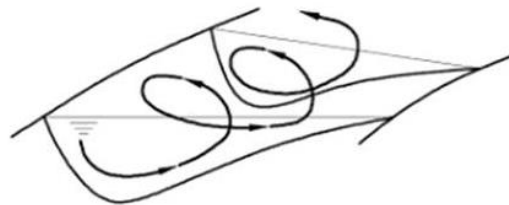


Figura 2 : Flujo helicoidal o en espiral (Vide, 2002)

Luego Einstein (1926) realizó un aporte al estudio de las curvas de los ríos basándose en la explicación de lo que ocurre cuando se revuelve una taza de té en hebras (Figura 3). En este caso se genera un flujo helicoidal y las hebras se depositan en el centro y en el fondo de la taza. Su explicación fue la siguiente:

... la rotación del líquido hace que una fuerza centrífuga actúe en él. Esto no daría lugar a algún cambio en el flujo del líquido si este rotase como un cuerpo sólido. Pero en la vecindad de las paredes de la taza, el líquido es frenado por la fricción de modo que la velocidad angular con la cual rota es menor allí que en otros lugares más cercanos al centro. Particularmente, la velocidad angular de la rotación, y por lo tanto la fuerza centrífuga, será menor cerca del fondo que en zonas que se encuentren por encima. El resultado de esto será un movimiento circular o flujo helicoidal del líquido del tipo mostrado en la Figura 3, el cual va en aumento hasta que, bajo influencia de la fricción del

fondo, se vuelve estacionario. Las hojas de té son barridas hacia el centro por el movimiento circular y actúan como prueba de su existencia. Lo mismo sucede con los flujos en tramos curvos de los ríos

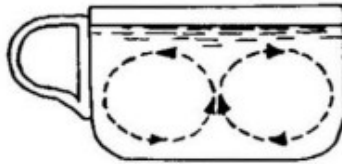


Figura 3: Corrientes secundarias en una taza de té (Einstein, 1954)

Se debe tener en cuenta que la mayoría de las teorías de flujo en curvas requieren que el flujo sea estacionario, uniforme y se encuentre completamente desarrollado, aunque es posible implementarlo en laboratorio esto raramente se da en la naturaleza. (Markham y Thorne, 1992). En los cauces naturales el flujo transversal (helicoidal) se encuentra formado por dos componentes una rotacional y otra de traslación.

En los últimos años se ha considerado al flujo helicoidal como el único responsable del movimiento del filamento de velocidades máximas, desde la margen interna hacia la margen externa como así también de la modificación del perfil transversal (Ippen y Drinker, 1962; Blanckaert y Graf, 2004).

2.1.1. Separación del flujo en curvas

Cuando se tiene curvas abruptas en las que la relación $R/B < 3$, el flujo se suele separar de la margen interna apareciendo una zona de recirculación con flujo débil hacia aguas arriba (Leopold et al., 1960; Ferguson et al., 2003). La separación consiste en que el flujo principal se aparta de los bordes causando la divergencia de las líneas de corriente. La separación del flujo ocurre porque este se vuelve inestable, y al hacerlo se genera un espacio de recirculación del flujo (Leeder y Bridges, 1975) (Figura 4).

En un canal curvo, se pueden distinguir dos zonas en donde puede ocurrir la separación del flujo y estas se encuentran relacionadas con la distribución de la superficie libre. Una de estas zonas se ubica sobre la margen externa, en la entrada de la curva en coincidencia con el incremento de la profundidad debido a la sobre elevación. La otra zona está ubicada a la salida de la curva sobre la margen interna cuando el flujo recupera la profundidad (Ippen y Drinker, 1962).

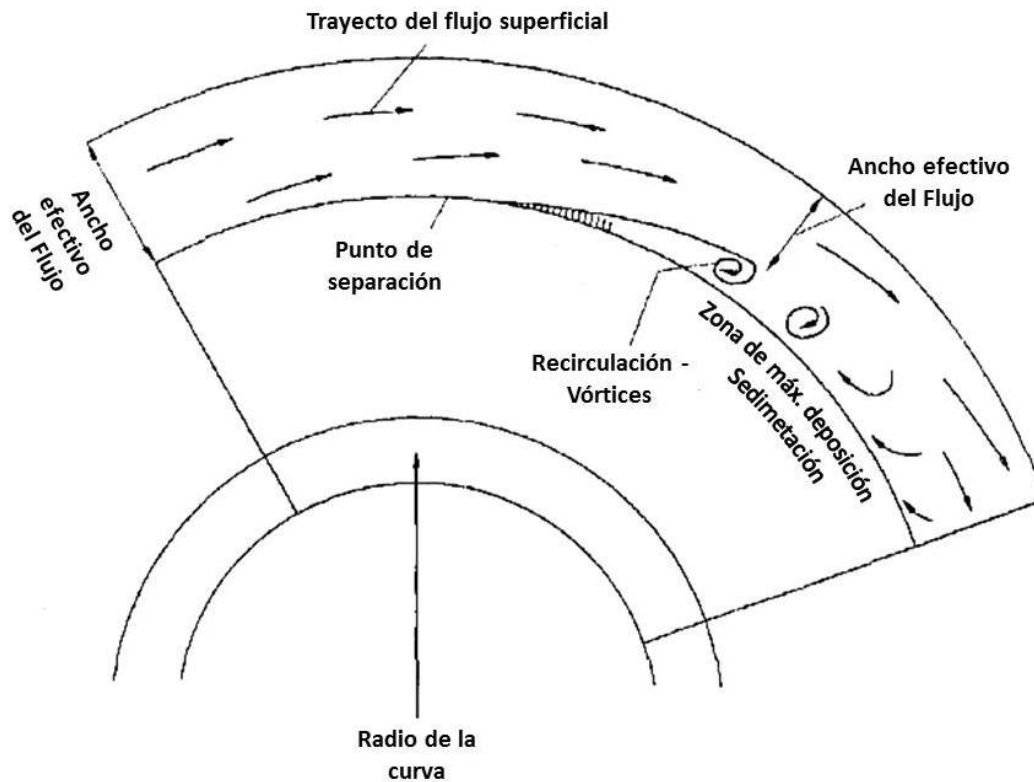


Figura 4: Características generales de la separación del flujo (Ardesch, 2014)

La extensión de las zonas de separación depende directamente de la relación B/R y del número de Froude, aumentando al incrementarse la curvatura y disminuyendo al disminuir el número de Froude (Callander, 1978; Leeder y Bridges, 1975).

Solo en los casos de fuerte curvatura se observa la zona de separación sobre la margen externa. La separación en la margen interna es más persistente que la que ocurre en la margen externa, y se encuentra magnificada por el flujo helicoidal que tiende a depositar los sedimentos que se encuentran en el fondo del lecho o canal.

La separación del flujo puede ser una característica muy importante en el sistema hidráulico de los ríos (Leeder y Bridges, 1975) ya que cambia la morfodinámica en un canal debido a los cambios en la velocidad que produce. Algunos investigadores sostienen que es la separación del flujo la que produce la aceleración de las velocidades en la margen externa y la disminución de las mismas en la margen interna a la salida de la curva en donde se promueve la sedimentación. De esta forma, en esta zona donde se produce la separación del flujo en la margen interna, se origina una divergencia del flujo

con la consecuente reducción del área efectiva del flujo que genera la aceleración del mismo.

2.1.2. Fluctuaciones de baja frecuencia del flujo en curvas

En tramos curvos de ríos o canales, el flujo presenta fluctuaciones de baja frecuencia. Este fenómeno afecta de manera considerable, la medición de caudales con ADCP desde plataformas móviles y dejan de ser válidas las estrategias espaciales y temporales descritas en el capítulo introductorio ya que estas han sido desarrolladas asumiendo procesos estacionarios.

Se ha detectado en trabajos anteriores (Ardesch, 2014), que los vectores de velocidad presentan un movimiento oscilatorio pivoteando de manera transversal a la dirección del flujo. Este movimiento provoca que el perfil de velocidad en una sección transversal vaya variando en el tiempo de manera periódica. Esto genera errores en las mediciones con ADCP debido que este elemento no mide instantáneamente, sino que a medida que lo desplazamos de una orilla del cauce hacia la opuesta estaríamos midiendo diferentes perfiles de velocidad.

A su vez, este fenómeno provoca una variación temporal de la ubicación de la capa límite. Lo que provoca que la zona que presenta vórtices o turbulencia, vaya variando a través del tiempo y sea menor o mayor dependiendo el momento en el cual se mida.

Estos factores, dejan expuesta la importancia de calcular el periodo de oscilación de los vectores de velocidad y el aleteo de la capa limite, para luego poder determinar su influencia en la incertidumbre y poder determinar estrategias óptimas de muestreo.

2.2. MEDICIÓN DE CAUDALES MEDIANTE PERFILADORES DE CORRIENTE ACÚSTICOS DOPPLER (ADCP)

Los Perfiladores de Corriente Acústicos Doppler (ADCP) son instrumentos que se basan en el efecto Doppler para medir las componentes de la velocidad del agua en tres dimensiones en diferentes capas de la columna de agua a lo largo de un perfil. Los ADCP presentan entre 3 y 9 transductores acústicos montados en la cabeza del sistema, ubicados en un ángulo con respecto a la vertical, entre 20° a 30° dependiendo del fabricante (Figura 5).



Figura 5: Perfiladores de corriente acústico Doppler fabricados por las compañías a) Teledyne RDI (Workhorse Sentinel), b) SonTek (HidroSurveyor) y c) Rowe Technologies (SeaSeven).

Cada uno de estos transductores proyecta en el agua ondas sonoras a una frecuencia fija y luego registra información de retorno de un haz o *beam*, que se produce cuando las ondas sonoras se reflejan en las partículas en suspensión transportadas en la columna de agua, como pueden ser sedimentos, burbujas o materia orgánica presentes naturalmente en el agua y que se mueven a una velocidad igual que la misma. Cuando el sonido enviado por el ADCP llega a estos reflectores, se encuentra desplazado a una mayor frecuencia debido al efecto Doppler; este cambio de frecuencia es proporcional a la velocidad relativa entre el ADCP y los reflectores, o sea, entre el ADCP y el agua. Parte de este sonido es reflejado nuevamente hacia el ADCP donde se recibe desplazado una segunda vez. Este desplazamiento es el que utiliza el aparato para el cálculo de las velocidades del agua que luego permiten definir los caudales de flujo.

A su vez, este instrumento recolecta información de posición del instrumento, distancia recorrida y profundidad del agua en cada vertical y con ello realiza un perfil (tipo batimetría) de la sección que nos permite conocer su forma.

2.3. MEDICIÓN DE CAUDAL CON ADCP DESDE PLATAFORMAS MOVILES

Las mediciones con ADCP se realizan atravesando los cursos de agua, por lo general ríos o canales, por medio de plataformas móviles (Figura 6). Por lo general estas plataformas móviles son embarcaciones comandadas por personal a bordo (Figura 7) o en caso de esto no ser posible, se utilizan plataformas comandadas por medio de cables desde puentes o desde las márgenes del curso de agua a través de roldana (Figura 8).

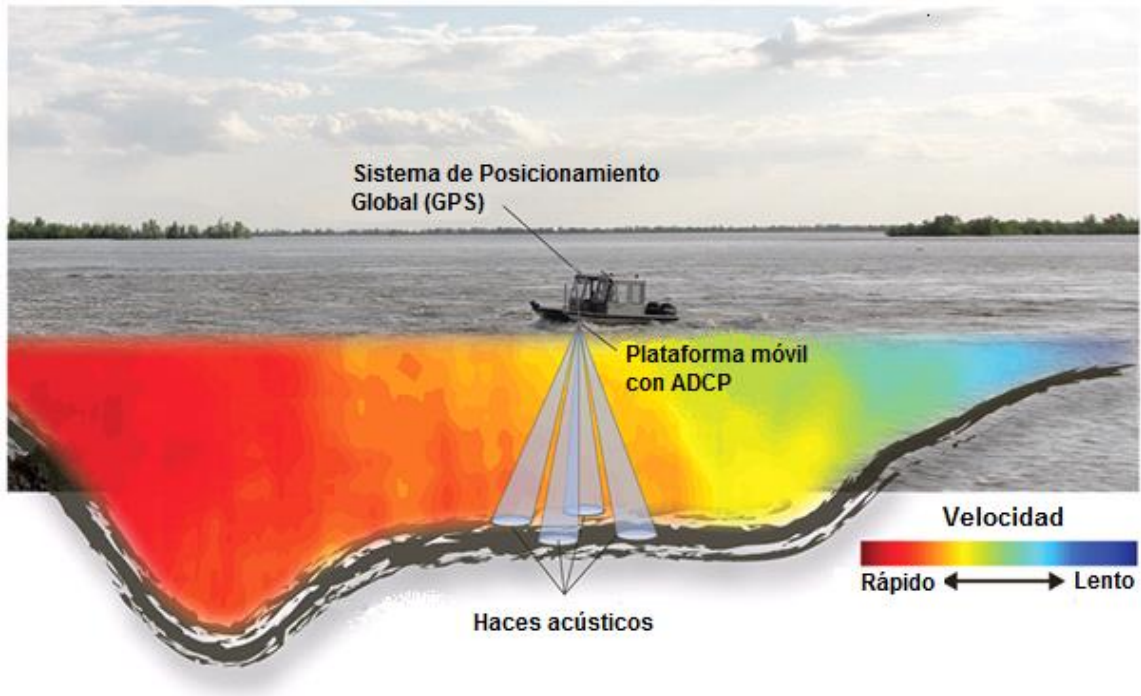


Figura 6: Medición de caudales con ADCP desde plataformas móviles (Fricker, 2014).



Figura 7: Medición de caudales con ADCP desde embarcaciones comandadas (Página Web MixZon Inc.)



Figura 8: Medición de caudales con ADCP desde plataformas móviles comandadas con cables.

En estas mediciones se considera flujo estacionario (no cambia a lo largo del tiempo). La estrategia de medición con ADCP desde plataformas móviles actualmente recomendada consiste en realizar con la embarcación un mínimo de cuatro transectas en direcciones reciprocas (opuestas). Luego se toma como valor representativo del caudal, el promedio de los cuatro (o más) caudales medidos. Se define como transecta el recorrido del ADCP desde una orilla del cauce hasta la otra. Mientras el ADCP se mueve, registra datos de profundidad, velocidad de la embarcación, posición, etc. permitiendo estimar el caudal del mismo. Es importante aclarar que el caudal se puede medir, cualquiera sea la trayectoria del barco, la dirección de la corriente, y la geometría de la sección. Sin embargo es necesario aplicar factores de corrección debido a los movimientos que realiza el ADCP mientras se realiza el aforo. Estos movimientos pueden ser de rotación alrededor de los tres ejes cartesianos (*pitch* o rotación alrededor del eje transversal Y, *roll* o rotación alrededor del eje longitudinal X y *heading* o rotación alrededor del eje Z o eje vertical) o de traslación (velocidad del bote). Para realizar estas correcciones es necesario convertir los valores de velocidades medidos en un sistema de coordenadas XYZ, a un sistema de

coordenadas terrestres ENU (Este, Norte y Vertical), para lo cual se utilizan datos de la brújula interna.

Los ADCPs utilizan dos sistemas de referencia para la medición absoluta de la velocidad del agua. Estos son el seguimiento de fondo (*bottom-tracking- BT*) y el GPS. Ambos sistemas permiten medir la velocidad de la embarcación en forma relativa al lecho, tanto en dirección como en magnitud. Para obtener la velocidad absoluta de la columna de agua independientemente del movimiento de la embarcación lo que se hace es restarle esta velocidad relativa a la velocidad medida. En aquellos casos en que el fondo es móvil o que las profundidades son excesivas es conveniente calcular la velocidad con los valores obtenidos por el GPS ya que en estos casos la técnica de seguimiento de fondo se encuentra limitada.

Una transecta se puede analizar como una serie de perfiles sucesivos verticales adquiridos a lo largo de la sección transversal. Y la sección transversal al mismo tiempo puede modelarse como una composición de varias filas horizontales desde la superficie hasta el fondo. Al intersectarse estas filas y columnas (perfiles verticales) quedan definidas celdas o segmentos, cada uno de los cuales tendrá agua fluyendo a una velocidad determinada la cual será medida por el ADCP. El tamaño de cada celda depende de la configuración utilizada (altura de la celda), de la programación de la emisión de la señal ADCP (número de señales por minutos), así como de la rapidez del desplazamiento del barco (ancho de la celda).

Sin embargo, el ADCP no puede medir en la sección transversal completa debido a que hay ciertas zonas en las que no es posible medir por a diversos motivos.

En las zonas cercanas a los márgenes o bordes, por lo general el ADCP no puede medir debido a que no hay una profundidad suficiente para que pueda acceder la embarcación o para que pueda sumergirse el ADCP. El caudal que fluye por estas zonas se estima mediante diversas fórmulas de extrapolación que el fabricante provee y el usuario puede elegir.

La zona cercana a la superficie tampoco es posible medirla. Esta zona la podemos descomponer en otras dos zonas más pequeñas, la primera está definida por la profundidad de inmersión mínima que requiere el emisor-receptor para emitir y recibir señal sin interrupción. La segunda zona se denomina distancia sin registro o *blanking*

distance, es aquella longitud en la cual el transductor no registra un cambio en la frecuencia de la onda sonora debido a que esta retorna muy rápidamente lo cual impide medir la velocidad del fluido. Los transductores y circuitos necesitan un determinado tiempo para recuperarse entre los ciclos de envío y recepción de las ondas. Esta distancia depende del instrumento y de la configuración del mismo. Los efectos de estela del instrumento son también muy importantes en esa zona y aún cuando electrónicamente se puede reducir la longitud de esa zona, no es conveniente hacerlo ya que los mismos modifican el perfil de velocidades (Mueller et al., 2007).

Finalmente, en la zona que se encuentra cerca del fondo (entre un 6 y un 10 % de la profundidad) no es posible medir debido a que el equipo no puede diferenciar entre el rebote que se produce en las partículas que viajan suspendidas en el flujo y el rebote de la onda acústica contra el fondo del lecho (Figura 9).

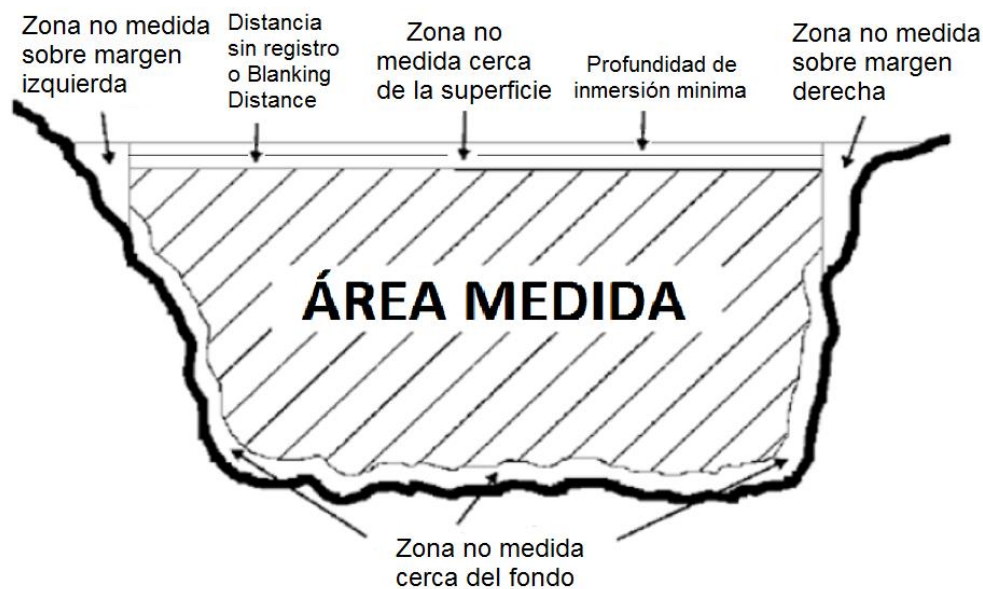


Figura 9: Regiones medidas y no medidas por ADCP

Por lo expuesto anteriormente, el cálculo del caudal total es la suma del caudal en la zona medida que es el valor acumulado de los caudales unitarios de cada celda más aquellos extrapolados en las zonas no medidas (superficie, fondo y márgenes):

$$Q = Q_{\text{marg.izquierda}} + Q_{\text{superficie}} + Q_{\text{medido}} + Q_{\text{fondo}} + Q_{\text{marg.derecha}} \quad (1).$$

donde:

- Q es el caudal total,
- $Q_{\text{marg. izquierda}}$ es el caudal estimado en zona no medida sobre margen izquierda,
- $Q_{\text{superficie}}$ es el caudal estimado en zona no medida cerca de la superficie,
- Q_{medido} es el caudal en la región medida por el ADCP,
- Q_{fondo} es el caudal estimado en zona no medida cerca del fondo,
- $Q_{\text{marg. derecha}}$ es el caudal estimado en zona no medida sobre margen derecha.

2.4. INCERTIDUMBRES EN LA DETERMINACION DEL CAUDAL CON ADCP DESDE PLATAFORMAS MÓVILES

Cuando medimos el caudal con ADCP desde plataformas móviles, aparecen errores, al igual que sucede cuando medimos con otras técnicas experimentales. Estos errores son causados generalmente por los siguientes factores (Tarrab, 2013):

- a) la ubicación y las condiciones de la medición;
- b) la turbulencia del flujo (2D y 3D);
- c) las estrategias de muestreo espacial y temporal (duración total de la medición, velocidades del bote, número de transectas);
- d) la configuración del ADCP;
- e) los niveles de ruido;
- f) las técnicas de procesamiento de señales utilizadas;
- g) los defectos en la calibración del instrumento;
- h) los errores en el sistema de adquisición de datos;
- i) el movimiento del fondo,
- j) los movimientos inadecuados de la embarcación o plataforma móvil,
- k) las bajas profundidades de flujo,
- l) la inestacionariedad del flujo y la variabilidad del medio natural en el cual se realiza la medición,
- m) la influencia del esfuerzo de corte del viento,
- n) alta concentración de sedimentos;
- o) las elevadas intensidades de la turbulencia,
- p) fluctuaciones de baja frecuencia

Los errores que causan estos factores pueden ser errores de sesgo (o sistemáticos) o errores aleatorios (o accidentales). Es de gran importancia llegar a una comprensión profunda de estos dos tipos de errores para poder realizar una correcta evaluación de la precisión de las mediciones realizadas con ADCP.

Los errores sistemáticos o sesgos en la medición son aquellos que se producen de igual modo en todas las mediciones. Se deben en general a sesgos en la medición de la velocidad, de la profundidad, a factores ambientales (como movimiento del fondo), limitaciones del instrumento (zonas no medibles), problemas con el GPS y a errores o particularidades propias del operador. Este error, al aumentar el tamaño de la muestra no tiende a cero sino que se incrementa. Resulta difícil de corregir.

Los errores aleatorios son aquellos errores inevitables que se producen por eventos únicos imposibles de controlar durante el proceso de medición. Este tipo de errores, al contrario de los errores de sesgo, pueden disminuirse aumentando el tamaño de la muestra o realizando un promedio de los datos obtenidos. Todos los procesos presentes durante el muestreo de flujo de campo, como ser ruido ambiental, ruido del instrumento y la turbulencia del flujo, contribuyen a los errores aleatorios (incertidumbre) de las mediciones de caudal con ADCP desde plataformas móviles. El ruido ambiental se refiere al efecto de las condiciones propias del muestreo en el desempeño del ADCP que dependen del sitio, como por ejemplo:

- Ondas superficiales
- Estelas
- Fluctuaciones de flujo

El ruido de instrumento se refiere al ruido electrónico mientras que la turbulencia del flujo se refiere a la turbulencia que se genera por la interacción que se produce entre el flujo y el fondo. De modo que incluso si se midiera con un instrumento ideal, el cual no tiene ruido electrónico y no se ve afectado por las condiciones de medición, se tendrán errores aleatorios debido a las fluctuaciones propias del flujo turbulento (Tarrab et al., 2012).

Además es necesario tener especial cuidado con los errores críticos. Para ello, cuando se realizan mediciones con ADCP el operador debe monitorear los datos que se van recolectando y en caso de aparecer un error crítico, debe terminar la medición y volver a empezar (Obergh et al., 2005). Durante las mediciones de caudal con ADCP los errores críticos más comunes que pueden observarse son:

- a) una selección inapropiada o mala configuración de los modos de operación,
- b) errores de configuración (tales como número insuficiente de celdas en la vertical),

- c) errores en la comunicación del instrumento con el GPS (debido por ejemplo, a efectos de interferencia en márgenes o cambio de satélites,
- d) pérdida apreciable del sistema de monitoreo de fondo o “*bottom – tracking*” (cuando se está muy cerca de la máxima profundidad admisible por el instrumento),
- e) errores debido a una alta velocidad de la embarcación y
- f) excesivo cabeceo o balanceo de la embarcación (por ej. en condiciones de mucho oleaje), etc.

2.4.1. Incertidumbres en la medición de caudal con ADCP desde plataformas móviles debido a las fluctuaciones turbulentas

Las mediciones con ADCP se hacen moviendo un bote con el instrumento a través de una sección transversal a una velocidad menor o igual a la velocidad media del agua. Un ADCP no puede muestrear simultáneamente el campo de flujo instantáneo a través de una sección transversal completa, a medida que el instrumento se mueve a través de la sección transversal, diferentes estructuras turbulentas que se desplazan con el flujo son muestreadas por el ADCP, generando fluctuaciones en el campo de flujo de la velocidad media. Estas fluctuaciones son dependientes de las características turbulentas propias del flujo y de la metodología empleada para realizar la medición (velocidad del bote, frecuencia el instrumento, etc).

Tarrab (2013) realizó un análisis sistemático en el cual se cuantifica el rol de las fluctuaciones turbulentas en las incertidumbres (errores aleatorios) de mediciones de caudal con ADCP desde plataformas móviles. Específicamente, la importancia relativa que tienen las estrategias espaciales-temporales de muestreo y las condiciones de flujo existentes, en la contribución de la “turbulencia del flujo” a la incertidumbre de medición de caudales con ADCP.

Con este objetivo, Tarrab efectuó un análisis dimensional para identificar los grupos adimensionales relevantes y a partir de ello y de datos de campos de flujos turbulentos tridimensionales generados con Simulación Numérica Directa (DNS) desarrolló ecuaciones que cuantifican la incertidumbre en las mediciones de caudal con ADCP debido a la turbulencia. Fueron considerados dos parámetros adimensionales para la cuantificación de la incertidumbre en las mediciones de caudal: la variación relativa $RVar[Q]$ y el error máximo relativo esperado $RME[Q]$. Es importante además tener en cuenta que la Simulación Directa Numérica es una herramienta computacional ideal para

realizar un análisis sistemático que permita cuantificar el rol de la turbulencia en las incertidumbres de las mediciones de caudal con ADCP, ya que permite crear un conjunto detallado de datos en el cual se pueden aislar las contribuciones debidas a la presencia de la turbulencia del flujo.

En aquella ocasión el campo de flujo tridimensional instantáneo modelado, se muestreó simulando las estrategias de muestreo con un ADCP, para evaluar la incertidumbre en la medición de un campo de flujo turbulento cuando se utilizan estos instrumentos. Las ecuaciones desarrolladas mediante el análisis dimensional y los datos generados por DNS se verificaron con datos de campos de dos ríos que presentaban diferentes características del flujo.

El procedimiento llevado a cabo por Tarrab (2013) consistió en estimar los parámetros adimensionales ($RVar[Q]$ y $RME[Q]$), usando información relacionada con las condiciones de flujo existentes durante la medición y con la configuración de muestreo seleccionada. Las condiciones de flujo turbulento existentes quedaron caracterizadas por:

- La profundidad del río (H),
- El ancho de la sección (B),
- La velocidad media del flujo (V_w),
- La viscosidad cinemática del agua (ν) y
- La velocidad de corte (u^*).

Mientras que la configuración de muestreo para una medición de caudal mediante ADCP por:

- El número total de transectas muestreadas (N_T),
- La velocidad del bote (V_b),
- La frecuencia de muestreo del instrumento (C) y
- El modo de medición del ADCP seleccionado, el cual define el nivel de ruido, representado por la desviación estándar de la velocidad horizontal (σ_u).

Por lo tanto:
$$RVar[Q] = (H, B, V_w, \nu, u^*, N_T, V_b, f, \sigma_u) \quad (2).$$

y luego se extendió al parámetro $RME[Q]$. A partir de estas variables se encontraron siete números adimensionales π utilizando u^* (velocidad de corte) y H (profundidad del agua) como variables representativas.

$$\begin{aligned} \pi_1 &= N_T; & \pi_2 &= \frac{\sigma_u}{u^*}; & \pi_3 &= \frac{B}{H}; & \pi_4 &= \frac{V_w}{u^*}; \\ \pi_5 &= \frac{V_b}{u^*}; & \pi_6 &= \frac{H_f}{u^*}; & \pi_7 &= \frac{v}{u^* H} = \frac{1}{R_e} \end{aligned} \quad (3).$$

donde R_e es el número de Reynolds que utiliza la velocidad de corte como escala de velocidad característica del flujo. Luego:

$$RVar[Q] = F\left(N_T, \frac{\sigma_u}{u^*}, \frac{B}{H}, \frac{V_w}{u^*}, \frac{V_b}{u^*}, \frac{H_f}{u^*}, \frac{u^* H}{v}\right) \quad (4).$$

Los números π_5 y π_6 fueron reescritos como:

$$\pi_5 = \frac{V_b}{u^*} = \frac{H/u^*}{H/V_b} \approx \frac{T_t}{T_c} \quad (5).$$

$$\pi_6 = \frac{H_f}{u^*} = \frac{H/u^*}{1/f} \approx \frac{T_t}{\Delta_t} \quad (6).$$

Donde $T_t = \frac{H}{u^*}$ es la escala de tiempo de la estructura turbulenta del flujo de tamaño H , $T_c = \frac{H}{V_b}$ es el tiempo en el que el bote recorre una estructura turbulenta del flujo de tamaño H y $\Delta_t = \frac{1}{f}$ es el intervalo de tiempo en el muestreo de los perfiles de velocidad.

Por lo cual, $RVar[Q]$ puede ser expresada como:

$$RVar[Q] = F\left(N_T, \frac{\sigma_u}{u^*}, \frac{B}{H}, \frac{V_w}{u^*}, \frac{T_t}{T_c}, \frac{T_t}{\Delta_t}, R_e\right) \quad (7).$$

En dicho trabajo se realizaron y validaron las siguientes hipótesis:

- La relación B/H no es relevante para el análisis,
- $R_e \gg 1$ (la turbulencia está totalmente desarrollada),
- La relación V_w/u^* presenta valores aproximadamente constantes.

Y teniendo en cuenta que al utilizar datos obtenidos del DNS para evaluar el desempeño de la tecnología acústica Doppler para la caracterización de los flujos turbulentos, el ruido σ_u/u^* no es relevante para el análisis, la relación $RVar[Q]$ puede ser expresada como:

$$RVar[Q] = F\left(N_T, \frac{T_t}{T_c}, \frac{T_t}{\Delta_t}\right) \quad (8).$$

Se encontró en dicho estudio, que una ley de potencia es la forma funcional más simple que podría ser utilizada y fue seleccionada *a priori* para el análisis dimensional. Se obtuvo una forma funcional mediante la combinación de los números adimensionales como (Streeter y Wylie, 1988):

$$RVar[Q] = a_1 \left(N_T^{b_1} \left(\frac{T_t}{T_c} \right)^{c_1} \left(\frac{T_t}{\Delta_t} \right)^{d_1} \right) \quad (9).$$

Extendiendo el análisis al parámetro $RME[Q]$ se obtuvo:

$$RME[Q] = a_2 \left(N_T^{b_2} \left(\frac{T_t}{T_c} \right)^{c_2} \left(\frac{T_t}{\Delta_t} \right)^{d_2} \right) \quad (10).$$

Los parámetros (a_i, b_i, c_i, d_i) se estimaron a partir de un ajuste no lineal de los datos obtenidos a partir de la simulación numérica directa (DNS) para un flujo turbulento en un canal abierto. Los caudales fueron calculados integrando en la sección transversal del flujo los datos de velocidad generados en las simulaciones numéricas simulando el uso de un ADCP en movimiento desde una plataforma móvil. Los datos sintéticos fueron obtenidos en diferentes perfiles verticales con una frecuencia de 1 Hz para todos los casos. Cada perfil contaba con 129 valores de velocidad (129 celdas). El caudal se calculó para cada transecta mediante la integración de los perfiles de velocidad a través de la sección transversal. Las mediciones simuladas con ADCP utilizando DNS difieren de las mediciones realizadas con un ADCP en campo en que los datos generados por DNS fueron muestreados utilizando un ADCP idealizado con un solo haz vertical, mientras que los ADCP miden la velocidad a lo largo de 3 o 4 haces que presentan un ángulo fijo en la vertical y divergen desde el ADCP con la profundidad. Por lo tanto, en el muestreo de los datos del DNS, los datos de velocidad no fueron promediados espacialmente, si no que se asumió homogeneidad horizontal en las velocidades.

En dicho estudio se analizaron tres tiempos de muestreo adimensionales $T_d = \frac{\Delta_t}{T_t}$, con el mismo número global de Reynolds $Re = 9164$ y relación de aspecto $(B/H) = 4.2$ para estimar $RVar[Q]$ y $RME[Q]$. Para cada intervalo de tiempo adimensional ($T_d = 0.123, 0.031$ y 0.016) se utilizaron cuatro valores diferentes de número de transectas

realizadas ($N_T = 1, 2, 4$ y 8) y ocho valores diferentes de velocidades del bote (V_b) para obtener el caudal medido en cada caso. Esto resultó en 32 estrategias de muestreo diferentes (cuatro grupos de transectas y ocho velocidades del bote) para cada intervalo de tiempo adimensional (96 en total). Al ser $RVar[Q]$ y $RME[Q]$ variables aleatorias, para cada estrategia de muestreo, se utilizaron 20 conjuntos de datos (muestreados comenzando en diferentes tiempos iniciales del período de simulación) para estimar un valor medio y los intervalos de confianza de los dos parámetros. A partir de estos conjuntos de datos se obtuvo para cada configuración de muestreo un valor de $RVar[Q]$ y $RME[Q]$. Por lo tanto, hay 96 valores medios de $RVar[Q]$ y $RME[Q]$ (los valores medios son el promedio de 20 conjuntos de datos).

Los conjuntos de datos consistían en 12 transectas para cada condición de muestreo, en donde cada transecta se realizaba a la misma velocidad del bote. Las diferencias porcentuales se calcularon restando al caudal medido para 12 transectas, el caudal medido para 1, 2, 4, 6 y 8 transectas y dividiendo por el caudal promedio de las 12 transectas. El error relativo máximo absoluto, $RME[Q]$ es una medida de la desviación máxima en el conjunto de datos y la varianza relativa, $RVar[Q]$, representa el comportamiento global del conjunto de datos. Y se calcularon para cada conjunto de datos de la siguiente manera:

$$RME[Q] = \frac{|Q - Q_{av}|_{max}}{Q_{av}} \quad \text{y} \quad RVar[Q] = \sqrt{\frac{(Q - Q_{av})^2}{Q_{av}^2}} \quad (11).$$

Donde:

- a) Q es el caudal medido en cada transecta;
- b) $|Q - Q_{av}|_{max}$ es la máxima diferencia absoluta en el caudal dentro del conjunto de datos,
- c) Q_{av} es el caudal promedio de las 12 transectas muestreadas en el conjunto de datos (que se considera como el verdadero caudal).

Los parámetros (a_i, b_i, c_i, d_i) de las formas finales de las ecuaciones **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se calcularon a través de una regresión no lineal y al hacerlo, se descubrió que los coeficientes c_i y d_i presentan valores similares y sus intervalos de confianza

también indican que no son estadísticamente diferentes. Por lo tanto, las ecuaciones **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** quedaron expresadas como:

$$RVar[Q] = a_3 \left(N_T^{b_3} \left(\frac{T_c}{\Delta_t} \right)^{c_3} \right) \quad (12). \quad y \quad RME[Q] = a_4 \left(N_T^{b_4} \left(\frac{T_c}{\Delta_t} \right)^{c_4} \right) \quad (13).$$

A partir de estas nuevas ecuaciones, se realizó una regresión lineal para estimar los coeficientes para los nuevos parámetros (a_i , b_i , c_i) de las ecuaciones (11) y (12) utilizando un intervalo de confianza del 95% para cada parámetro. Se determinó:

$$RVar[Q] = 0.00038 \left(N_T \left(\frac{T_c}{\Delta_t} \right)^{0.66} \right)^{-1.41} \quad (14).$$

$$y \quad RME[Q] = 0.039 \left(N_T \left(\frac{T_c}{\Delta_t} \right)^{0.55} \right)^{-0.79} \quad (15).$$

En las Figura 10 y Figura 11 se muestran la evolución de los parámetros $RVar[Q]$ y $RME[Q]$ variando el número total de transectas realizadas (N_T) y la velocidad del bote (V_b) para cada tiempo de muestreo adimensional. Los números adimensionales mostrados en las abscisas para cada valor graficado son valores de $N_T \left(\frac{T_c}{\Delta_t} \right)^x$, siendo x la relación de los coeficientes c_3/b_3 y c_4/b_4 para las ecuaciones **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** respectivamente.

Además, se muestran en ambas figuras, los intervalos de confianza del 95% para $RVar[Q]$ y $RME[Q]$ para las condiciones de flujo representadas por $T_\sigma=0.123$ y la curva de mejor ajuste de todos los datos simulados para las ecuaciones **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Luego de haber obtenido estas formas funcionales de los parámetros $RVar[Q]$ y $RME[Q]$ utilizando los datos generados por DNS, las mismas fueron validadas con datos de campo, junto con las hipótesis incluidas en el análisis dimensional.

Los resultados mostraron que aumentar el número de transectas tiene un mayor impacto en la reducción del rol de las fluctuaciones de la turbulencia sobre las incertidumbres de las mediciones de caudal con ADCP que el aumento de la frecuencia de muestreo y la disminución de las velocidades del bote. Además, los resultados indicaron que los errores

aleatorios, debido a la turbulencia del flujo se incrementan en flujos pocos profundos ($H < 0.5$ m) con velocidades de bote relativamente grandes.

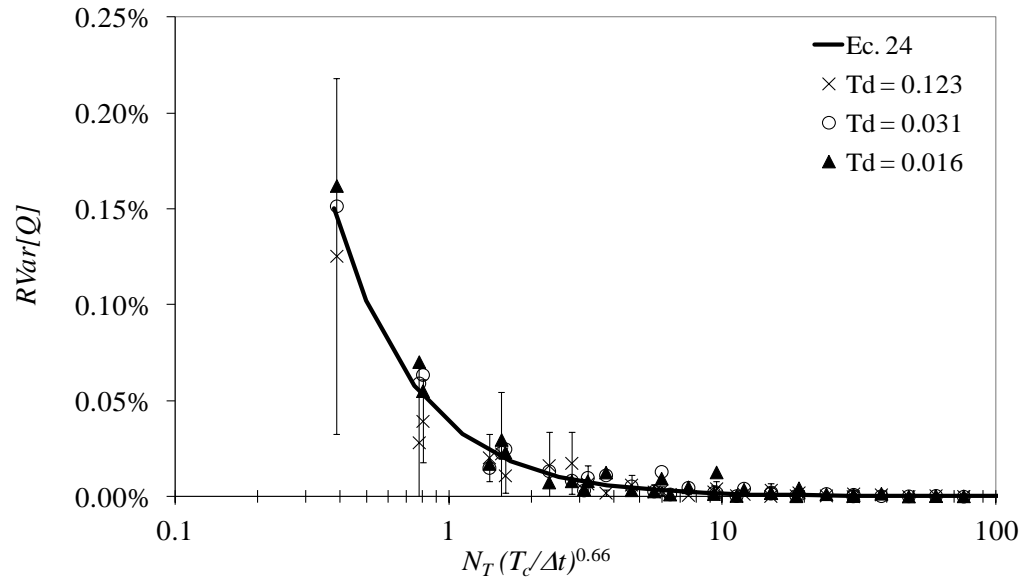


Figura 10: Evolución de $RVar[Q]$ para diferentes configuraciones de muestreo. La curva de mejor ajuste de todos los datos simulados es representada por la ecuación $RVar[Q] = 0.00015 N_T (T_c / \Delta t)^{-0.66}$ (Tarrab, 2013).

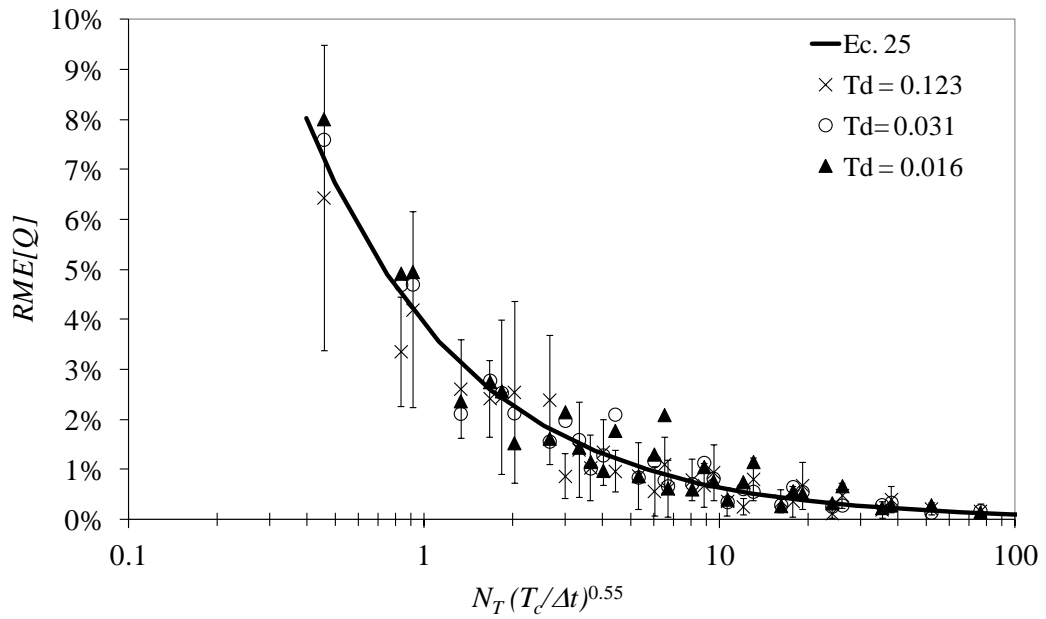


Figura 11: Evolución de $RME[Q]$ para diferentes configuraciones de muestreo. La curva de mejor ajuste de todos los datos simulados es representada por la ecuación $RME[Q] = 0.016 N_T (T_c / \Delta t)^{-0.55}$. (Tarrab, 2013)

3. ANÁLISIS ADIMENSIONAL

3.1. INTRODUCCIÓN

El análisis dimensional es un método que permite reducir el número y la complejidad de las variables que intervienen en la descripción de un fenómeno físico dado. El objetivo del análisis dimensional es reducir variables y agruparlas en forma adimensional permitiendo realizar una generalización de los datos experimentales de manera que se pueda describir el fenómeno en su totalidad sin estar restringido a la discusión del experimento específico que se realizó. Esto ofrece varias ventajas. La primera es un ahorro de tiempo y dinero. Un segundo aspecto favorable consiste en que nos ayuda a pensar y planificar un experimento o teoría y la tercer ventaja del análisis dimensional es que proporciona leyes de escala que pueden convertir los datos obtenidos sobre un pequeño modelo en información para el diseño de un prototipo más grande (Streeter y Wylie,, 1988; White, 1995).

Muchos de los parámetros adimensionales pueden verse como la razón de un par de fuerzas de fluidos, cuya magnitud relativa indica la importancia relativa de una de las fuerzas respecto de la otra. Si algunas de las fuerzas en una situación de flujo particular son mucho mayores que otras, es posible despreciar el efecto de las fuerzas más pequeñas y tratar el fenómeno como si fuera determinado completamente por las fuerzas mayores. O haces que presentan un ángulo fijo n la vertical y divergen desde el ADCP

Las dimensiones de la mecánica son Fuerza F , Masa M , Longitud L y Tiempo T . Ellas están relacionadas por la Segunda Ley del movimiento de Newton:

$$F = m \cdot a \tag{16}.$$

Que en forma adimensional es: $F = MLT^{-2}$ (17).

Que muestra que solo tres de las dimensiones son independientes. Un sistema común empleado en el análisis dimensional es el sistema MLT.

Tabla 1: Dimensiones de las cantidades físicas usadas en mecánica de los Fluidos.

Cantidad	Símbolo	Dimensiones
Longitud	l	L
Tiempo	t	T

Masa	m	M
Fuerza	F	MLT ⁻²
Velocidad	V	LT ⁻¹
Aceleración	a	LT ⁻²
Área	A	L ²
Descarga	Q	L ³ T ⁻¹
Presión	Δp	ML ⁻¹ T ⁻²
Gravedad	g	LT ⁻²
Densidad	ρ	ML ⁻³
Peso específico	γ	ML ⁻² T ⁻²
Viscosidad dinámica	μ	ML ⁻¹ T ⁻¹
Viscosidad cinemática	ν	L ² T ⁻¹
Tensión superficial	σ	MT ⁻²
Módulo elástico de compresión	K	ML ⁻¹ T ⁻²

3.2. TEOREMA π

El teorema de π de Buckingham demuestra que, en un problema físico que incluye n cantidades en las que hay m dimensiones, las cantidades se pueden ordenar en $n-m$ parámetros adimensionales independientes. Sean $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ las cantidades implicadas, tales como la presión, viscosidad, velocidad, etc. Se sabe que todas las cantidades son esenciales a la solución, por lo que debe existir alguna relación funcional.

$$F(A_1, A_2, A_3, \dots, A_n) = 0 \quad (18).$$

Si π_1, π_2, \dots , representan agrupaciones adimensionales de las cantidades A_1, A_2, A_3, \dots , entonces con m dimensiones implicadas, existe una ecuación de la forma

$$f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-m}) = 0 \quad (19).$$

El método para determinar los parámetros π consiste en seleccionar m de las cantidades A , con diferentes dimensiones, que contengan entre ellas las m dimensiones y usarlas como variables repetitivas junto con una de las otras A cantidades para π . Por ejemplo, sea que A_1, A_2, A_3 contengan M, L y T no necesariamente en cada una, sino en forma colectiva. Entonces el primer parámetro de π está compuesto como:

$$\pi_1 = A_1^{x_1} A_2^{y_1} A_3^{z_1} A_4 \quad (20).$$

el segundo como:

$$\pi_2 = A_1^{x_2} A_2^{y_2} A_3^{z_2} A_5 \quad (21).$$

Y así hasta

$$\pi_{n-m} = A_1^{x_{n-m}} A_2^{y_{n-m}} A_3^{z_{n-m}} A_n \quad (22).$$

En estas ecuaciones se determinarán los exponentes para que cada π sea adimensional. Las dimensiones de las cantidades A se sustituyen y los exponentes de M, L y T se fijan iguales a cero respectivamente. Estos producen tres ecuaciones con tres incógnitas para cada parámetro π , con lo que se pueden determinar los exponentes x , y , z y de aquí el parámetro π .

Si solo están implicadas dos dimensiones, dos de las cantidades A se escogen como variables repetitivas y se obtienen dos ecuaciones con los dos exponentes incógnitos para cada término π .

En muchos casos la agrupación de los términos A es tal que el arreglo adimensional es evidente por inspección. El caso más simple es aquel cuando dos cantidades tienen las mismas dimensiones, por ejemplo, longitud, la razón de estos dos términos siendo el parámetro π .

El procedimiento entonces se puede resumir en una serie de pasos como se explica a continuación:

- 1) Seleccionar las variables pertinentes.
- 2) Escribir las relaciones funcionales. Por ejemplo: $f(V, D, \rho, \mu, H) = 0$
- 3) Seleccionar las variables repetitivas.
- 4) Escribir los parámetros π en términos de exponentes incógnitos.
- 5) Para cada una de las expresiones de π escribir las ecuaciones de los exponentes de manera que la suma de los exponentes de cada dimensión sea cero.
- 6) Resolver las ecuaciones simultáneamente.

- 7) Sustituir en las expresiones de π del paso 4 los exponentes para obtener los parámetros π adimensionales.
- 8) Establecer la relación funcional $f_1(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-m}) = 0$
- 9) Recombinar, si se desea, para alterar las formas de los parámetros π , manteniendo el mismo número de parámetros independientes.

3.3. NÚMEROS ADIMENSIONALES RELEVANTES EN FLUCTUACIONES DE BAJA FRECUENCIA EN FLUJO EN CURVAS.

El error máximo relativo $RME[Q]$, es el parámetro adimensional seleccionado para cuantificar la incertidumbre en las mediciones de caudal con ADCP debido a las fluctuaciones de baja frecuencia del flujo. La evolución de este parámetro puede estimarse por medio de información relacionada con las fluctuaciones de flujo existentes durante la medición y con la configuración de muestreo seleccionada. Las fluctuaciones de flujo existentes durante las mediciones se pueden caracterizar por su período (T_p), por la profundidad del río (H), el ancho de la sección (B), la velocidad media del flujo (V_w), la viscosidad cinemática del agua (ν), la velocidad de corte (u^*), y la diferencia máxima relativa en la velocidad del flujo (comparada con la velocidad media temporal en la sección transversal) $RMF[V]$. La configuración de muestreo para una medición de caudal con ADCP puede ser representada por el número total de transectas muestreadas (N_T), la velocidad del bote (V_b), y la frecuencia de muestreo del instrumento (f). El modo seleccionado para medir velocidades de flujo en el ADCP, que define el nivel de ruido, representado por la desviación estándar de la velocidad horizontal (σ_u), no juega un rol importante en este análisis.

$$RME[Q] = (T_p, H, B, V_w, \nu, u^*, RMF[V], N_T, V_b, f) \quad (23).$$

Aplicado el teorema Pi de Buckingham (Streeter y Wylie, 1988), es posible obtener ocho números π adimensionales, utilizando V_b (velocidad del bote) y H (profundidad del agua) como variables representativas (magnitudes físicas fundamentales):

$$\begin{aligned} \pi_1 &= N_T; & \pi_2 &= RMF[V]; & \pi_3 &= \frac{B}{H}; & \pi_4 &= \frac{\nu}{V_b H}; & (24). \\ \pi_5 &= \frac{V_w}{V_b}; & \pi_6 &= \frac{H_f}{V_b}; & \pi_7 &= \frac{T_p V_b}{H}; & \pi_8 &= \frac{u^*}{V_b} \end{aligned}$$

Luego el error máximo relativo $RME[Q]$ de las mediciones de caudal con ADCP puede ser expresado como:

$$RME[Q] = F \left(N_T, RMF[V], \frac{B}{H}, \frac{v}{V_b H}, \frac{V_w}{V_b}, \frac{H_f}{V_b}, \frac{T_p V_b}{H}, \frac{u^*}{V_b} \right) \quad (25).$$

Se seleccionaron los grupos adimensionales más importantes identificados mediante el análisis dimensional que permiten caracterizar el proceso, obteniéndose los siguientes:

Dividiendo π_5 por π_4 se obtiene:

$$\pi_9 = \frac{\frac{u^*}{V_b}}{\frac{v}{V_b H}} = \frac{u^* H}{v} = Re; \quad (26).$$

donde Re_τ es el número de Reynolds que utiliza la velocidad de corte como escala de velocidad característica del flujo.

Dividiendo π_3 por π_7 se obtiene:

$$\pi_{10} = \frac{\frac{B}{H}}{\frac{T_p V_b}{H}} = \frac{B}{T_p V_b} \quad (27).$$

Por otro lado, π_6 puede ser reescrito como:

$$\pi_6 = \frac{H_f}{V_b} = \frac{H}{\frac{1}{f}} = \frac{T_C}{\Delta_t} \quad (27).$$

donde $T_C = H_f / V_b$ es el tiempo en el que el bote recorre una estructura turbulenta del flujo de tamaño H y $\Delta_t = 1/f$ es el intervalo tiempo en el muestreo de los perfiles de velocidad. De esta forma, $RME[Q]$ puede ser expresado como:

$$RME[Q] = F \left(N_T, RMF[V], \frac{B}{T_p V_b}, \frac{V_w}{V_b}, \frac{T_C}{\Delta_t}, R_e \right) \quad (28).$$

Y se asumió la hipótesis de que la turbulencia se encuentra totalmente desarrollada por lo tanto: $Re \gg 1$. Luego:

$$RME[Q] = F \left(N_T, RMF[V], \frac{B}{T_p V_b}, \frac{T_C}{\Delta_t} \right) \text{ o escribiendolo en función de } \pi \quad (29).$$

$$RME[Q] = F(N_T, RMF[V], \pi_{10}, \pi_6)$$

3.4. FORMA FUNCIONAL

Se puede apreciar que mediante el análisis dimensional se determinó que el error máximo relativo $RME[Q]$ depende de los mismos números adimensionales determinados con anterioridad por Tarrab (2013) en su estudio acerca de las incertidumbres en la medición de caudal con ADCP desde plataformas móviles debido a las fluctuaciones turbulentas, y de otros parámetros adimensionales los cuales no han sido estudiados con anterioridad como son $RMF[V]$ y π_{10} . Su influencia se debe a la presencia de fluctuaciones de baja frecuencia en el flujo.

Debido a esto se adoptó la ley de potencia obtenida y verificada con anterioridad por Tarrab (2013) a partir del análisis de los datos generados del análisis del campo de flujo turbulento tridimensional obtenido a partir de la simulación numérica directa (DNS) para un flujo turbulento en un canal abierto, a la cual se le adicione un término en el intervinieran los parámetros $RMF[V]$ y π_{10} .

Para determinar el término faltante de la ecuación se utilizaron los mismos datos obtenidos a partir de la Simulación Numérica Directa (DNS) empleados por Tarrab. A partir de estos datos, se fue modificando la ecuación por tanteo y se utilizaron gráficos para observar el comportamiento de los datos en las distintas ocasiones. Se procedió de esta manera hasta obtener aquella ecuación que mejor se ajustara a una ley de potencia. Finalmente se llegó a la siguiente ecuación: $0,0276x^{-0,783}$

$$RME[Q] = 0,0276 (RMF[V]^{\pi_{10}} * N_T * (\pi_6)^{0,55})^{-0,783} \quad (30).$$

En la Figura 12 se muestra la evolución del parámetro $RME[Q]$ variando el número total de transectas realizadas (N_T) y la velocidad del bote (V_b) para cada tiempo de muestreo adimensional.

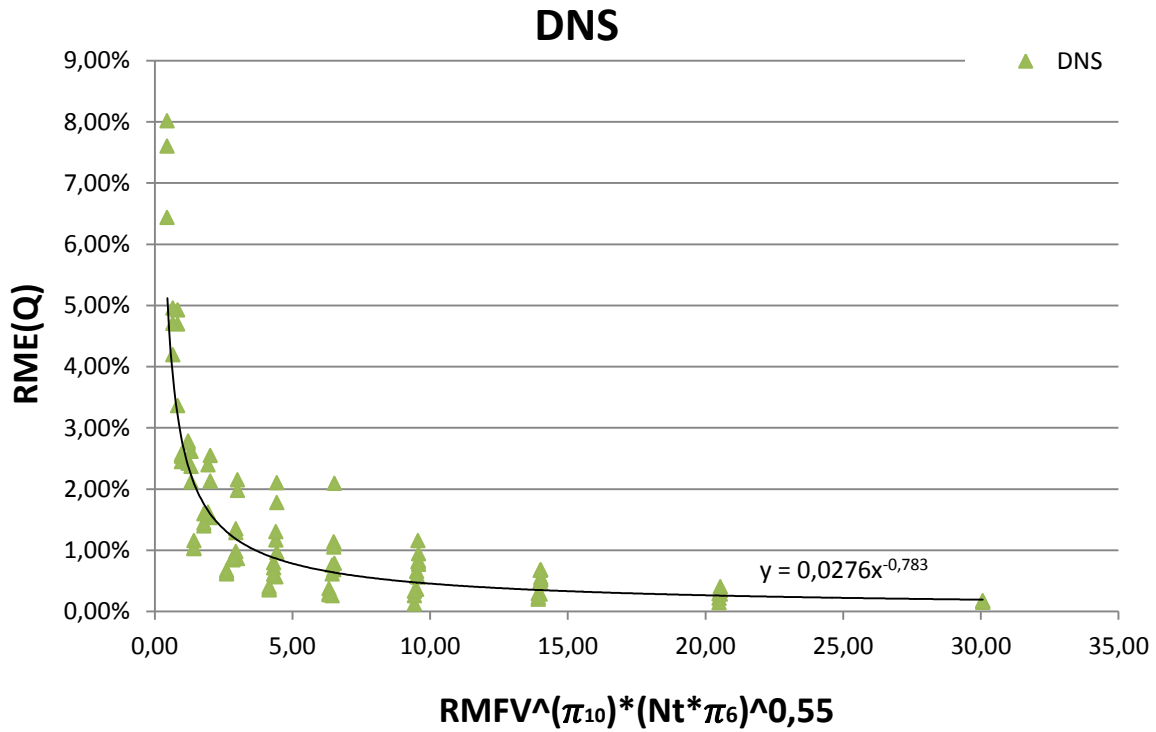


Figura 12: Evolución de $RME[Q]$ para diferentes configuraciones de muestreo. La curva de mejor ajuste de todos los datos simulados es representada por la ecuación (30).

4. MEDICIONES EN LABORATORIO

4.1. INTRODUCCIÓN

Se contaba con los datos correspondientes a la caracterización experimental del campo superficial de velocidades a partir de mediciones realizadas en laboratorio en un tramo de canal curvo con fondo fijo. Esos datos corresponden a experimentos desarrollados en un canal que fue construido en un cuenco de aguas poco profundas del Instituto de Hidromecánica (LFH) de la Universidad de Karlsruhe (Alemania). Los experimentos fueron realizados con el fin de comprender los procesos que se desarrollan en los flujos en curvas (Tarrab 2008; Tarrab et al., 2015).

4.2. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

Se trató de una instalación de 80 m² con un ancho de 5,48 m y un largo de 13,25 m. Estas dimensiones permitieron realizar experimentos a grandes escalas en el laboratorio de manera eficiente y precisa.

El canal de fondo fijo en donde se realizaron los experimentos (Figura 13 y Figura 14) contaba con dos curvas las cuales se encontraban empalmadas a través de un tramo recto de 0.70 m (Figura 14). Las mediciones a partir de las cuales se obtuvieron los datos utilizados en este trabajo se realizaron en el primer tramo curvo, de radio central $R=1.1$. Se consideró que el canal era de fuerte curvatura considerando que su relación R/B es del orden de 1.

El canal era abastecido de agua por medio de una bomba radial de 30 KW que operaba con un caudal máximo de 200 l/s. La velocidad de rotación era controlada a través de un convertidor de frecuencia que permitía regular continuamente la tasa de bombeo. El agua era introducida en el canal a través de 4 difusores. Además se utilizó una malla metálica entre los difusores y el canal para de esta forma paralelizar el flujo y evitar distorsiones iniciales en el ingreso del agua al mismo.

Se podía modelar un rango de profundidades de 0.5 mm a 25 cm. El fondo del canal era plano y se encontraba recubierto con una lámina de poliuretano de baja rugosidad, la cual se estima que era de aproximadamente 0.1 mm (Negretti, 2004).

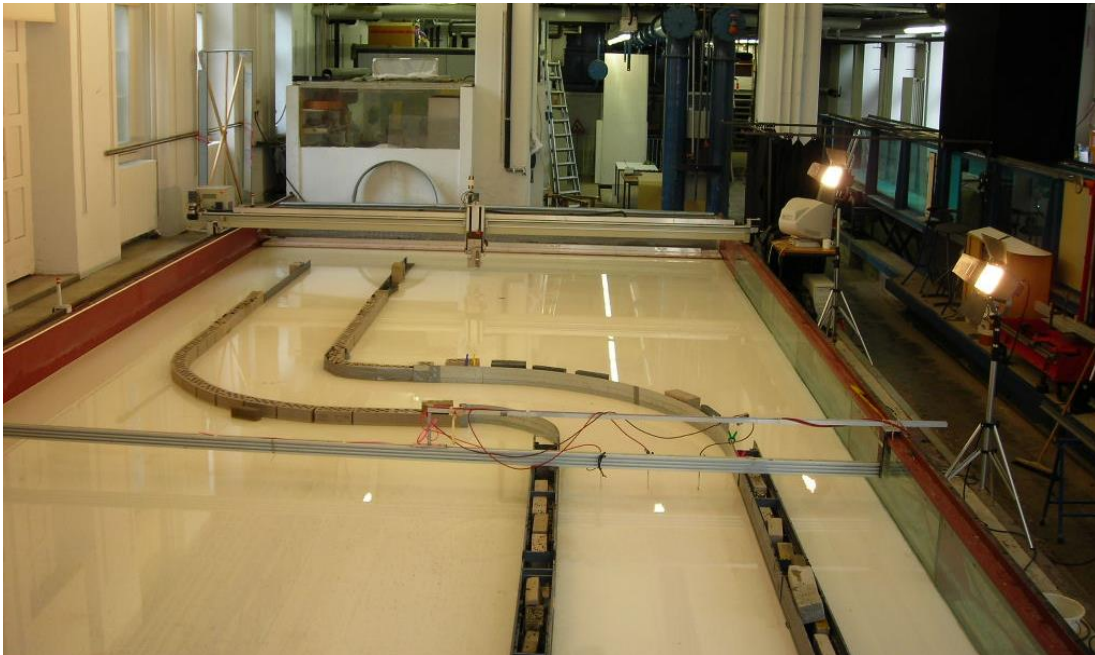


Figura 13: Canal de ensayo del Instituto de Hidromecánica de la Universidad de Karlsruhe (Tarrab, 2008)

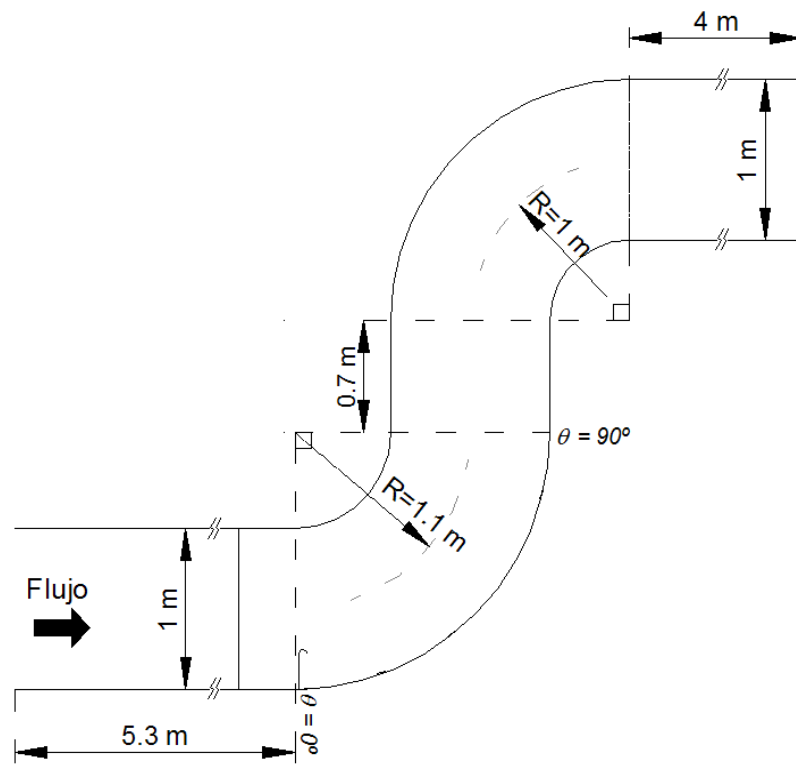


Figura 14: Vista superior de la configuración geométrica del canal (Tarrab, 2008)

La instalación experimental y su equipamiento se encontraban controlados a través de un software escrito en LabView® denominado FLAMES/STUMTRA (Dietz et al., 2002), el cual se utilizaba para controlar el flujo, medir la profundidad del mismo con un sensor ultrasónico y manejar un sistema triaxial de montantes a los fines de acceder a todos los puntos del cuenco.

4.3. TÉCNICAS DE MEDICIÓN UTILIZADAS

La técnica utilizada en las mediciones del canal, fue el Método de velocimetría por seguimiento de partículas (PTV). Tanto esta como la velocimetría por imágenes de partículas (PIV) son técnicas de medición no intrusivas que permiten obtener el campo de velocidades de flujos en manera instantánea, y con alta resolución temporal y espacial. Estas técnicas constituyen una herramienta fundamental para los investigadores de la dinámica de los fluidos en la actualidad debido al desarrollo que han tenido en los últimos años.

En la Figura 15 se muestra un esquema del funcionamiento de la técnicas PTV/PIV. La metodología consiste “sembrar” partículas en el flujo e ir obteniendo imágenes de sus posiciones a intervalos constantes de tiempo. Luego a partir de dos imágenes tomadas en un intervalo de tiempo conocido, se identifican las posiciones de las partículas en cada una de ellas mediante un programa específico que en nuestro caso se trató de PTVlab y dicho programa calcula el desplazamiento de las partículas en dos imágenes sucesivas. Al ser el intervalo de tiempo entre la captura de las imágenes un dato conocido, el software puede obtener el vector de velocidad dividiendo el desplazamiento de las partículas por dicho intervalo.

Se debe medir el campo de flujo donde se encuentran las partículas trazadoras por lo que en algunos casos es necesario utilizar un haz de luz láser para discriminar estas partículas de las que se encuentran en otros planos. Sin embargo en este caso se midieron velocidades superficiales, para lo cual se utilizaron partículas con una densidad apenas menor que la del agua de manera que flotasen y por lo tanto no fue necesaria la utilización del haz de láser.

La velocimetría por imágenes de partículas puede ser clasificada como PIV (Particle Image Velocimetry) o PTV (Particle Tracking Velocimetry) según cual sea la técnica utilizada para determinar el campo de velocidades. La técnica PIV utiliza un marco de referencia Euleriano el cual le permite determinar el campo de velocidades determinando

el desplazamiento promedio de un grupo de partículas. Una descripción del perfeccionamiento de esta técnica se detalla en Adrian (1991) y en Raffael et al. (1998). Por otro lado la técnica PTV utiliza un marco de referencia Lagrangiano que permite determinar el campo de velocidades mediante la determinación de desplazamiento de cada partícula de manera individual. (Cenedese y Querzoli, 1997).

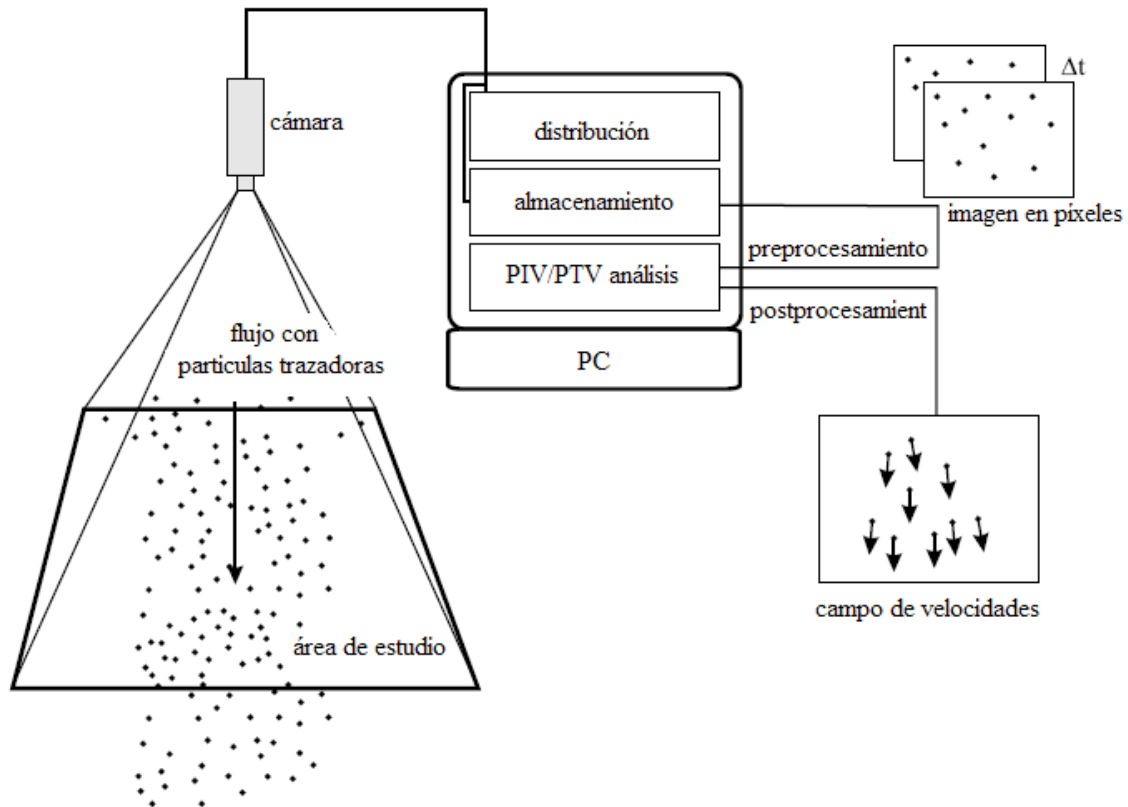


Figura 15: Esquema de la técnica PTV (Weitbrecht, 2006)

Para aplicar la técnica PIV se necesita una concentración de trazadores mucho mayor que la necesaria para aplicar la técnica de PTV, debido a que en la primera se realiza un promedio de varios trazadores contenidos en un volumen de medición (celda). Mientras que mediante la técnica de PTV se obtiene la velocidad de cada trazador individual. Por lo general esta técnica no funciona adecuadamente cuando la densidad de la cantidad de partículas es elevada, ya que las distribuciones de las partículas son muy similares entre sí.

Se asume como válida la suposición de que las partículas son capaces de seguir al flujo. Esto es válido dependiendo de las características de las partículas empleadas. El flujo contiene una serie de vórtices de distintos tamaños y que contienen distintos niveles de energía. Los vórtices de gran tamaño poseen alta energía y están asociados a frecuencias bajas, mientras que los vórtices pequeños, poseen baja energía y están asociados a frecuencias altas. Para comprender el efecto de las partículas sobre las mediciones, se debe considerar que cada partícula es un filtro que responde a un nivel mínimo de energía. La dinámica de todas las frecuencias mayores a la frecuencia asociada a ese nivel, no puede ser capturada sino que en este caso se deben utilizar partículas de diámetros muy pequeños (baja inercia). Esto trae ciertas restricciones respecto al tamaño de área de flujo que se puede muestrear debido a que para que la medición por medio de la técnica PTV sea precisa es necesario que la partícula tenga un diámetro mínimo de entre 3 a 4 píxeles. Por otro lado, la dinámica de todas las frecuencias bajas, o sea grandes vórtices, pueden ser capturadas sin problemas.

El éxito de las mediciones con PTV depende de la experiencia del investigador, de la calidad del hardware, de las distorsiones en la cámara, de los lentes cilíndricos, de la frecuencia de muestreo, de la potencia del láser, y de la densidad de partículas y su tamaño.

4.4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Como ya se mencionó anteriormente, se contaba con los videos de las mediciones experimentales realizadas en el canal curvo realizadas con la técnica de PTV. Estos videos luego fueron procesados con el programa PTVlab para obtener el campo de velocidades correspondientes.

Dichas mediciones experimentales fueron realizadas bajo las siguientes condiciones hidráulicas.

Tabla 2: Condiciones Hidráulicas

B (m)	H (m)	V (m/s)	Q (l/s)	B/H	Re	Fr
1.0	0.0097	0.14	13.9	10	13871	0.1

Las partículas utilizadas eran de color negro, de manera de generar un contraste optimo con el fondo blanco, de forma cilíndrica y de un diámetro aproximado de 2-3 milímetros. El

material utilizado fue polipropileno (PP), el cual presenta alta durabilidad y efectos de aglomeración mínimos en comparación con otros materiales. Su densidad era de aproximadamente 0.9 g/cm^3 , menor que la densidad del agua, para que de esta manera floten y sea posible medir las velocidades superficiales. La Figura 16 muestra una imagen obtenida durante las mediciones de PTV en donde se pueden observar las partículas sembradas durante las mediciones.



Figura 16: Partículas sembradas durante las mediciones con PTV (Tarrab, 2008)

Las partículas fueron sembradas mediante un dispositivo diseñado especialmente con el objetivo de proporcionar una distribución homogénea, y luego de que estas eran utilizadas se las recogía por medio de un tamiz colocado en el extremo aguas abajo del canal para poder ser reutilizadas.

Las imágenes de los videos con que contábamos habían sido obtenidas con una frecuencia de 10 Hz mediante dos cámaras sincronizadas (con una resolución máxima de 1024×1024) y durante 240 segundos (4 minutos), por lo cual, para cada experimento se obtuvieron 2400 imágenes secuenciales. Debido a que no se podía captar la región completa del flujo con las dos cámaras en forma simultánea, se realizaron dos juegos de experimentos en diferentes tiempos a los fines de combinar las imágenes y obtener el campo de flujo completo en el área de interés.

Luego de realizar las mediciones de PTV se colocó una grilla en la zona de medición (Figura 17) a los fines de calibrar la cámara y obtener resultados de velocidad en escala real.



Figura 17: Colocación de grilla en zona de medición (Tarrab, 2008)

4.5. ANALISIS DE FLUCTUACIONES PRESENTES EN EL FLUJO

A partir de las mediciones realizadas con la técnica de PTV, fue posible caracterizar con una alta resolución temporal y espacial el campo medio de velocidades superficiales como también las frecuencias características de las fluctuaciones mediante análisis espectral para diferentes puntos del tramo de canal estudiado (Tarrab et al.,2013)

El campo medio de la magnitud y dirección de los vectores de velocidad media superficial del flujo medido con la técnica PTV se observa en Figura 18. Se puede ver que en la entrada de la curva las velocidades máximas se encuentran en la zona cercana a la margen interna, mientras que en el tramo final, las velocidades son mayores en la zona cercana a la margen externa. Esto podría ser consecuencia de la distribución de la superficie del agua, la cual genera gradientes de presiones diferentes en distintos puntos de la curva. En la entrada de la curva, se produce una sobreelevación de la superficie del agua en la margen externa y un descenso en la margen interna, por lo que el gradiente de presiones longitudinales es negativo en la margen interna. Esto conlleva una aceleración del flujo en dicha zona. Por otro lado, a la salida de la curva, cuando el flujo recupera su

profundidad normal, el gradiente de presiones es negativo sobre la margen interna, por lo que se produce una desaceleración del flujo en esa zona (Leschziner y Rodi, 1979).

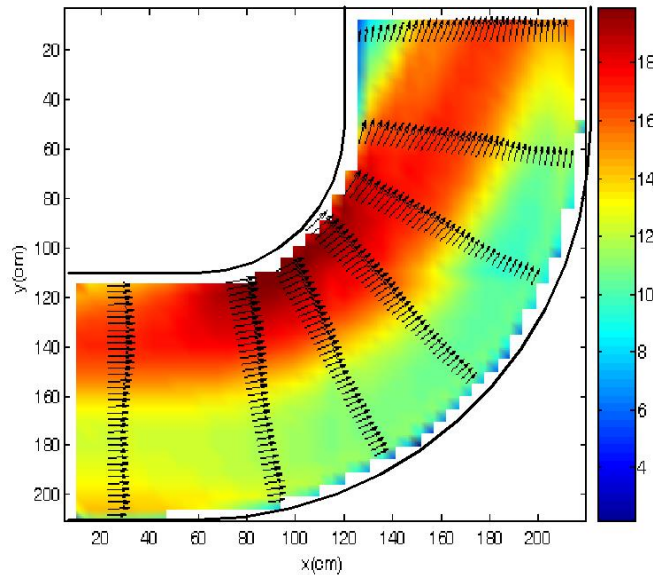


Figura 18: Mapa de contorno de la magnitud de las velocidades (cm/s) y vectores de dirección de la velocidad de flujo

En la Figura 19 se muestra el campo instantáneo de la velocidad superficial del flujo en dos instantes de tiempo distintos entre los cuales hay un intervalo $\Delta t = 11,2$ s. En ambos casos, en la entrada de la curva la velocidad es mayor en la zona cercana a la margen interna y hacia el tramo final, las velocidades máximas se ubican en la zona cercana a la margen externa. Se observan diferencias a la salida de la curva, debido a que en el caso (A) $t=0$ s las velocidades máximas se encuentran más cercanas a la margen externa, mientras que para el caso (B) $t=11,2$ s las velocidades máximas se desplazan hacia la margen interna, disminuyendo en esa zona la extensión del área de recirculación o separación del flujo.

Esta variación temporal del campo de velocidades en las mediciones realizadas (incluyendo cambios en la magnitud de la velocidad y el hecho de que se invierta la dirección de la misma en algunos casos), indica la presencia de fluctuaciones de baja frecuencia en la región cercana a la margen interna las cuales podrían ser causadas por una zona de separación (o recirculación) del flujo.

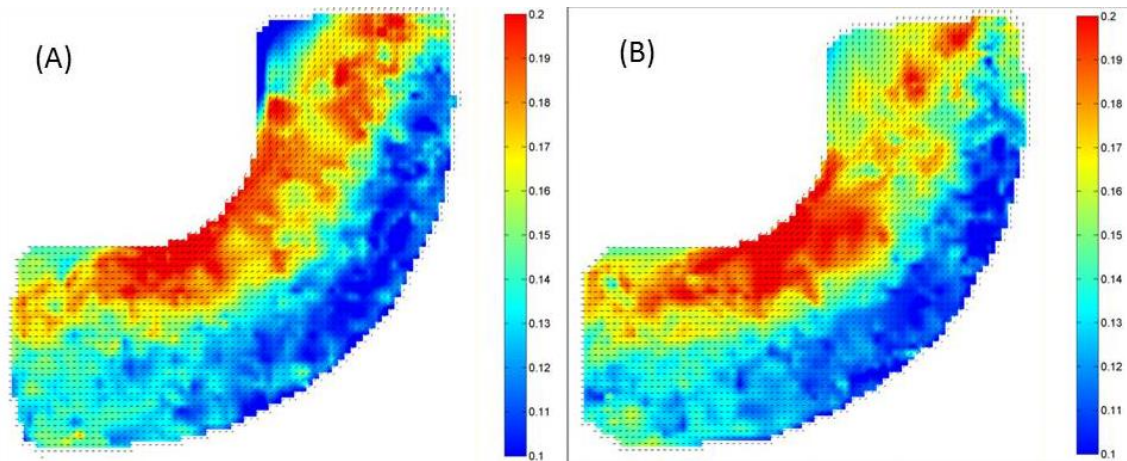


Figura 19: Campo de velocidades [m/s] y vectores de dirección de la velocidad en dos instantes de tiempo A) $t=0$ s B) $t=11.2$ s

En la siguiente imagen (Figura 20) se puede observar la distribución lateral de velocidades que se obtuvieron promediando 10 imágenes, siendo el tiempo de promediación igual a 1 (U_n) segundo. Estas velocidades se midieron en el tramo recto a la salida de la primer curva en dos instantes de tiempo diferentes entre los cuales hay un intervalo de tiempo igual a $\Delta t=13$ s y se las comparo gráficamente con el promedio de las velocidades para 240 s. A pesar de que en algunos puntos de la sección transversal la diferencia entre las velocidades locales es mayor al 25%, los caudales calculados mediante la integración de perfiles de velocidades para los dos instantes de tiempo presentan valores muy similares al caudal promedio.

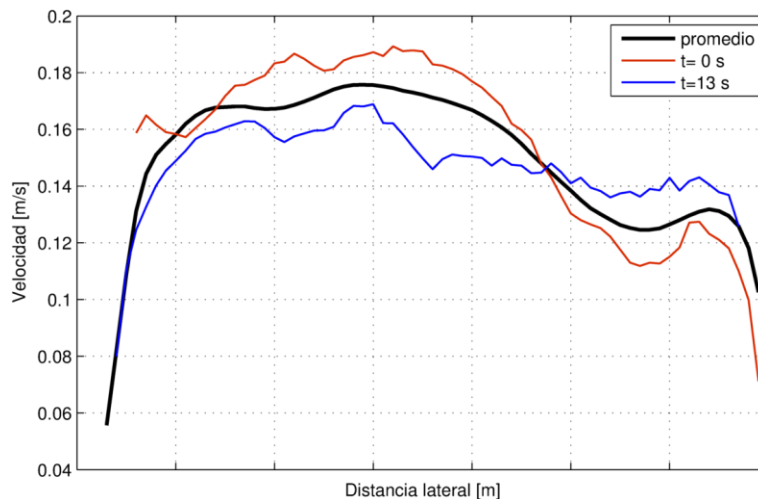


Figura 20: Distribución lateral de la magnitud de las velocidades en el tramo recto a la salida de la primer curva para dos instantes de tiempo y el valor promedio para 240 s.

De manera que la distribución lateral de velocidades longitudinales varía para diferentes instantes de tiempo analizados, mientras que el caudal escurrido permanece constante.

En la Figura 21 se muestra el campo de vorticidad y se puede apreciar que a la salida de la curva sobre la margen interna se desarrolla una zona de separación del flujo pequeña, que se encuentra relacionada con la disminución de velocidades en esa zona. La superficie del agua presenta una pendiente adversa hacia aguas abajo, en la entrada de la curva sobre la margen externa, en correspondencia con el incremento de la profundidad del flujo y a la salida de la curva sobre la margen interna cuando el flujo recupera su profundidad. En estas zonas las partículas del fluido tienen poca energía para moverse a través del gradiente de presiones, por lo que se produce una separación del flujo (Rozovskii, 1961; Ippen y Drinker, 1962).

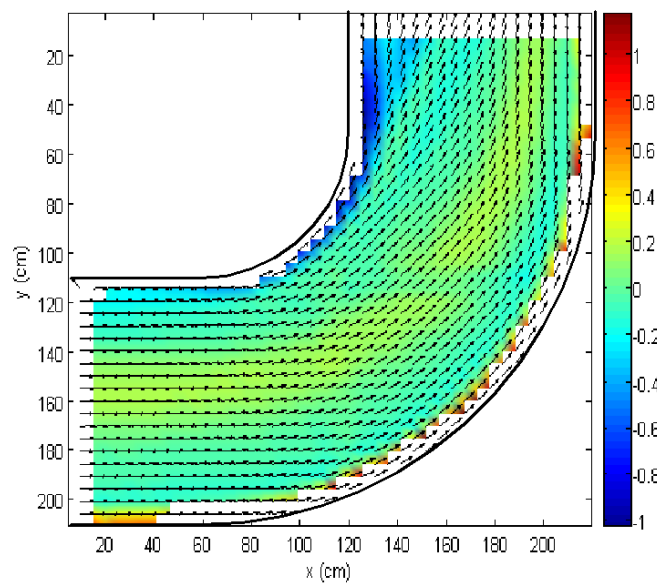


Figura 21: Vorticidad [1/s] y vectores de velocidad superficial promediados (vorticidad positiva en sentido horario)

Por otro lado, las señales de velocidad obtenidas en los puntos P_1 , P_2 y P_3 ubicados en el tramo recto a la salida de la primer curva (Figura 22) presentaron periodicidades en la señal. A partir del análisis espectral de señales temporales de velocidad de flujo superficial, se determinaron las frecuencias características y los picos de energía (valores máximos) en los espectros de energía para tres localizaciones en la sección transversal, caracterizando de esta forma las fluctuaciones de baja frecuencia en el flujo turbulento representado.



Figura 22: Ubicación de los puntos P_1 , P_2 y P_3 (de izquierda a derecha respectivamente).

La Figura 23 muestra los espectros de energía calculados a partir de las señales de la magnitud de la velocidad superficial de velocidad registradas durante 240 segundos en los tres puntos. En el punto P_1 se observa un pico de energía máximo dominante con un período característico de la fluctuación de 19,6 s mientras que en los puntos P_2 y P_3 se observan al menos tres picos de energía. El primer pico en los puntos P_2 y P_3 presenta un período de aproximadamente 16-17 s, mientras que el período de las fluctuaciones en el segundo pico es coincidente en P_2 y P_3 y es de 11 s. Existe un tercer pico para los puntos P_2 y P_3 el cual muestra un tercer período de las fluctuaciones de aproximadamente 10s.

En la Figura 24 se muestran los espectros de energía de las señales de velocidad superficiales transversales medidas en los puntos P_1 , P_2 y P_3 . Se observa una diferencia apreciable en la energía de las señales para los tres puntos, siendo el caso de P_2 la señal con más energía y con picos más destacados. Se distinguen en P_2 al menos tres picos, con períodos de fluctuaciones de 17,8 s, 11,1 s y 9 s.

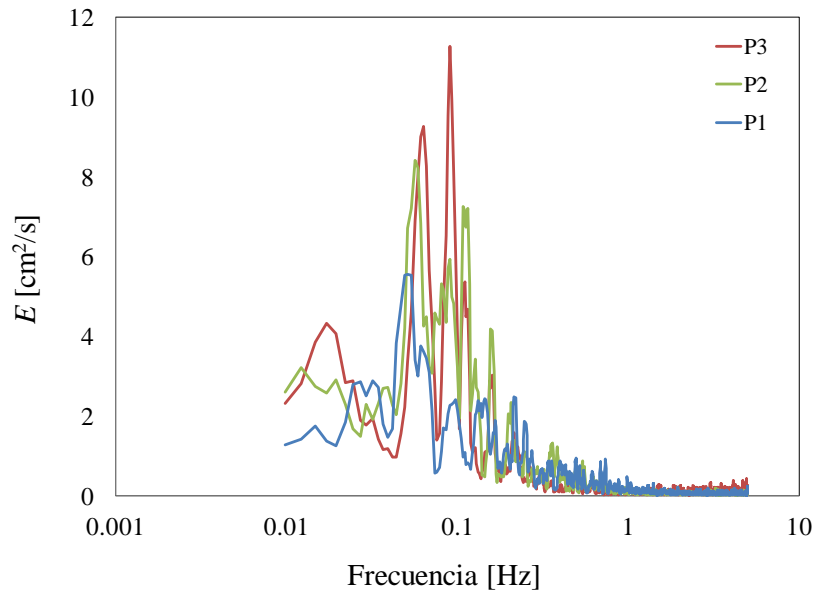


Figura 23: Espectros de energía de las magnitudes de las velocidades de las señales registradas en los puntos P1, P2 y P3 a la salida de la curva.

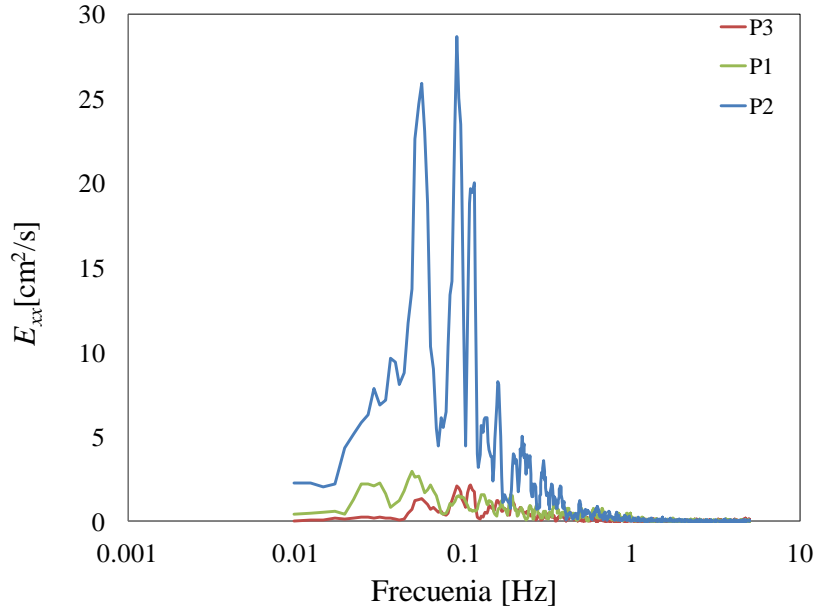


Figura 24: Espectros de energía de las componentes transversales (E_{xx}) de las velocidades de las señales registradas en los puntos P1, P2 y P3 a la salida de la curva.

El espectro de energía para el caso de las velocidades longitudinales (Figura 25) muestra que la energía de las señales longitudinales es menor que la energía para el caso de las velocidades transversales en los tres puntos analizados (P_1 , P_2 y P_3), pero presenta valores muy similares a la energía de las señales de la magnitud de la velocidad. La energía máxima en los espectros de energía de las componentes transversales (Figura 24) corresponde al punto P_2 y es de $28,7 \text{ cm}^2/\text{s}$ mientras que en los espectros de energía de las componentes longitudinales (Figura 25), la energía máxima corresponde al punto P_3 y es de $11,5 \text{ cm}^2/\text{s}$ (menos de la mitad). Los períodos de las fluctuaciones en este último caso coinciden con los períodos en las señales de la magnitud de velocidad (Figura 23).

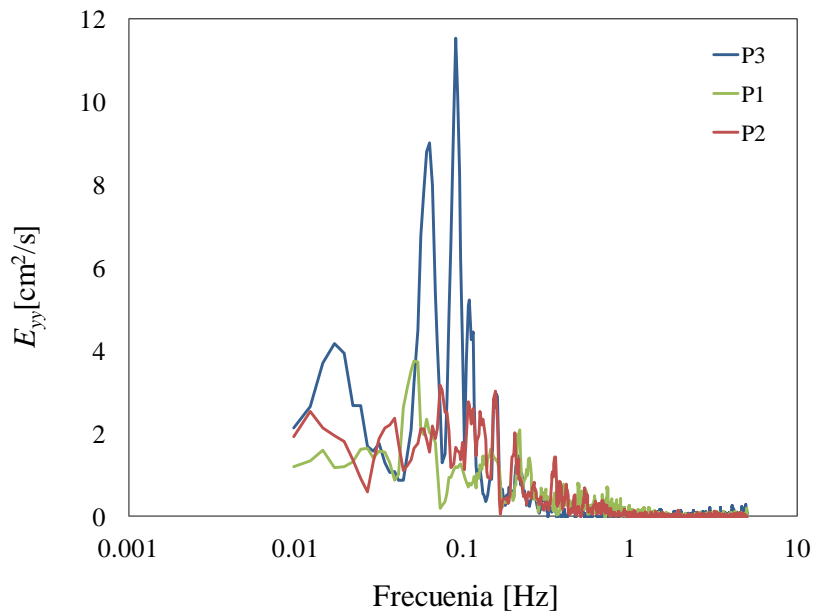


Figura 25: Espectros de energía de las componentes longitudinales (E_{yy}) de las velocidades de las señales registradas en los puntos P_1 , P_2 y P_3 a la salida de la curva.

4.6. DETERMINACIÓN DE INCERTIDUMBRES EN LA MEDICIÓN DEL CAUDAL CON ADCP

Con el objetivo de estimar las incertidumbres en las mediciones de caudal con ADCP desde plataformas móviles debido a fluctuaciones de baja frecuencia, se muestreó el campo de velocidades del flujo obtenido con la técnica de PTV, simulando las estrategias de muestreo de un ADCP.

Para ello se creó un programa en la plataforma Matlab (ver ANEXO), en el cual se simularon diferentes estrategias de muestreo variando la frecuencia de registro simulada (f), la velocidad del bote (V_b) y el número de transectas (N_T). Para el caso de frecuencia de registro simulada igual a 1Hz se muestreó con 6 velocidades de bote diferentes mientras que para el caso de frecuencia de registro simulada igual a 2Hz se muestreó con 5 velocidades de bote diferentes. Esto se debe a que con la velocidad más baja utilizada en el caso de frecuencia de registro 1Hz (V_6), el bote se desplaza desde el punto p_0 al punto p_1 (distancia deltax) en un segundo, por lo que registra todos los puntos en los cuales se poseen datos, que son en total 65 (puntos rojos de la Figura 26). En el caso de aumentar la frecuencia de registro a 2 Hz, si el bote siguiera moviéndose a esa misma velocidad, sería necesario contar con datos de velocidad del flujo, además de en los puntos anteriormente mencionados, en aquellos puntos ubicados a la mitad de dos puntos sucesivos (puntos naranjas de la Figura 26), en los cuales no se disponen datos por lo que el programa no encontraría todos los valores necesarios en el campo de velocidades para realizar el cálculo y nos devolvería un mensaje de error.

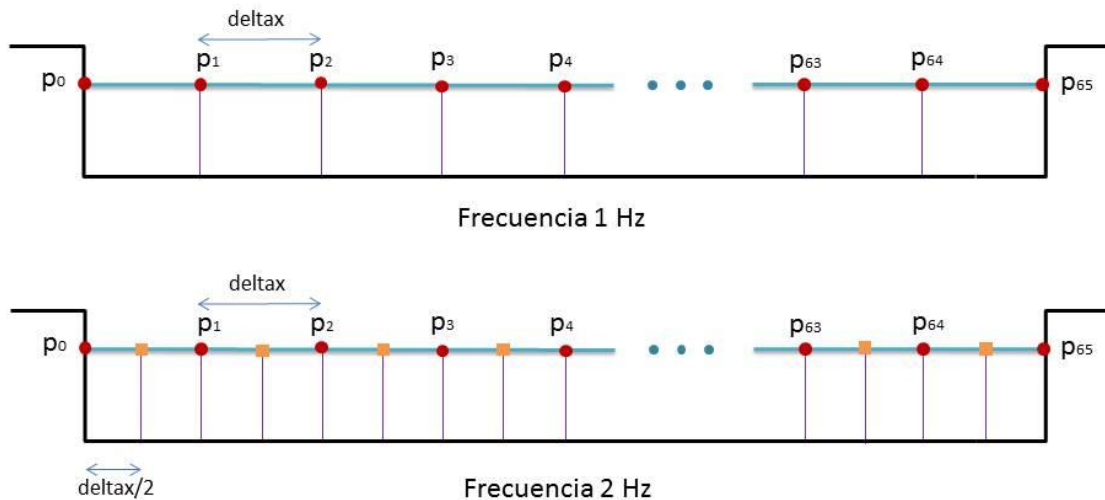


Figura 26: Puntos en los que se necesita poseer datos de velocidad del flujo para poder muestrear con la velocidad más baja (V_6)

El número de transectas en todos los casos varió entre $N_T=1,2,4,y8$. Por lo tanto, en total se analizaron 44 configuraciones de muestreo diferentes (Figura 27).

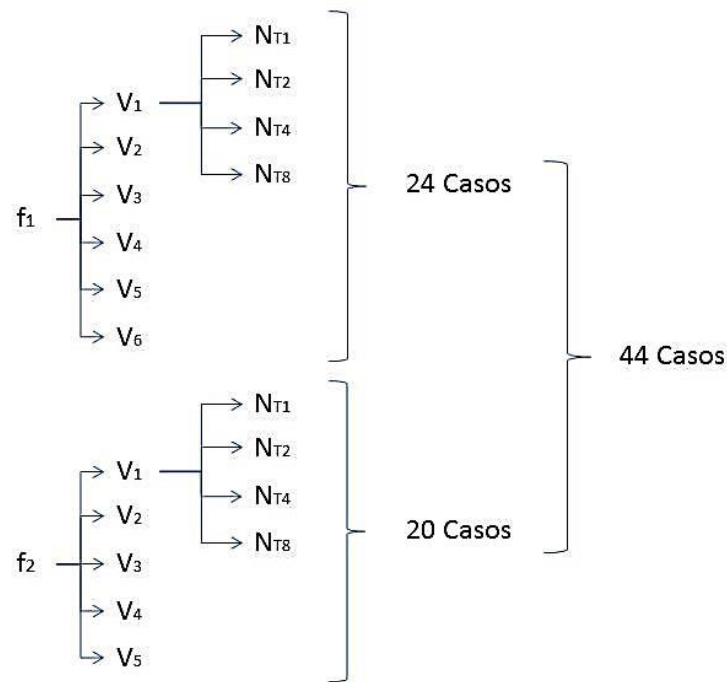


Figura 27: Configuraciones de muestreo simuladas

Considerando que $RME[Q]$ es una variable aleatoria, para cada estrategia de muestreo, se utilizaron 30 conjuntos de datos (muestreados comenzando en diferentes tiempos iniciales del período de simulación). Cada uno de los 30 conjuntos de datos consiste en 12 transectas de los cuales es posible obtener para cada configuración de muestreo un valor de $RME[Q]$. El error relativo máximo absoluto $RME[Q]$, se calculó para cada conjunto de datos de la siguiente manera:

$$RME[Q] = \frac{|Q_F - Q_{real}|_{max}}{Q_{real}} \quad (31).$$

donde Q_F es el caudal medido simulando medición con ADCP (en cada transecta en el caso de $N_T=1$ o el caudal promedio de varias transectas en el caso de que N_T sea mayor que 1); Q_{real} es el caudal medido experimentalmente con la técnica de PTV; y $|Q - Q_R|_{max}$ es la máxima diferencia absoluta en el caudal dentro del conjunto de datos (las 12 transectas en el caso de $N_T=1$ o en el conjunto de casos promediados para el caso que N_T sea mayor que 1).

4.7. RESULTADOS

La Figura 28 muestra la evolución del parámetro $RME[Q]$ en función de la forma funcional obtenida en el capítulo anterior, tanto para los datos de DNS como para los valores obtenidos a partir de las mediciones en el canal curvo de Alemania, simulando en ambos casos diferentes configuraciones de muestreo. Se puede observar que entre los valores obtenidos a partir de los datos de DNS y los obtenidos a partir de las mediciones en el canal curvo hay un buen ajuste. Siendo estos últimos mayores debido a que presentan contribución de otras incertidumbres como pueden ser los errores debido a las fluctuaciones turbulentas del flujo y al ruido intrínseco de la técnica experimental utilizada (PTV), no siendo posible aislar la contribución del error debido a la presencia de fluctuaciones de baja frecuencia del flujo.

Al no existir grandes diferencias entre los resultados que presentan ambos conjuntos de datos, quedan validadas tanto las hipótesis realizadas como la ecuación obtenida en el capítulo anterior a partir de la cual es posible entonces cuantificar el rol de las fluctuaciones de baja frecuencia del flujo en las incertidumbres de las mediciones de caudal con ADCP.

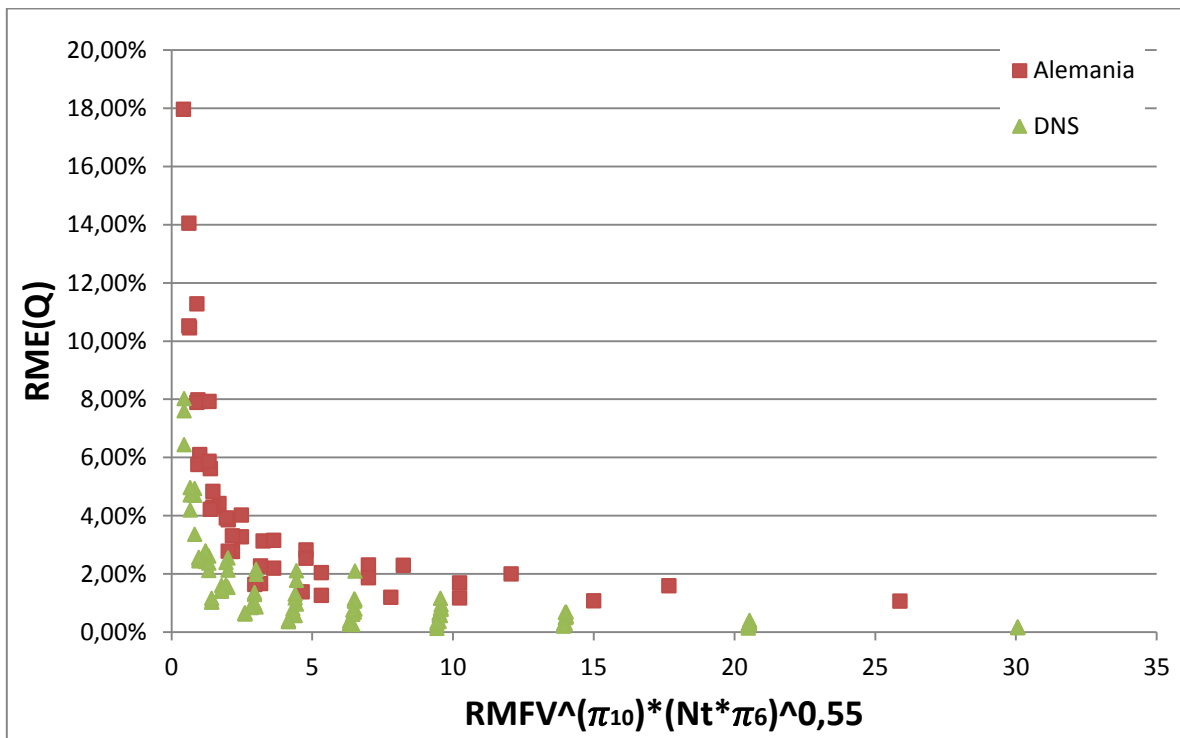


Figura 28: Valores de $RME[Q]$ estimados con la simulación numérica (DNS, ec.(30)) y con datos obtenidos de mediciones realizadas en el canal artificial en laboratorio.

5. MEDICIONES EN CAMPO

Con el fin de cumplimentar con los objetivos de esta Práctica Supervisada, que son detectar dentro de lo posible y de las limitaciones impuestas por los equipos y los condicionantes externos (estado del río, embarcación, etc), la influencia que tienen las fluctuaciones de baja frecuencia en la medición de caudales de flujos medidos con ADCP, se planifico una campaña experimental.

Se realizó la campaña el día 30 de Abril del 2016. Sin embargo al analizar los datos en laboratorio, quedo en evidencia que al momento de medir hubo errores en la calibración del GPS ya que a pesar de haber medido en un solo lugar, el programa marcaba las mediciones en varios sitios distintos. Es por ello que no era confiable utilizar esos datos y se procedió a realizar una segunda campaña la cual se llevó a cabo el día 23 de Agosto del 2016, a partir de la cual se obtuvieron los datos que finalmente se utilizaron. En ambos casos los datos de campo fueron colectados con un perfilador de corrientes acústicos Doppler de la firma Sontek/YSI (ADCP) perteneciente a la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales (FCEFyN). A su vez, se utilizó un drone para filmar el área de estudio de forma transversal y poder aplicar la técnica PIV sin la necesidad de realizar el proceso de rectificación.

5.1. DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE MEDICIÓN

Las mediciones de campo se realizaron en una curva perteneciente al Río Suquía (Figura 30, Figura 31 y Figura 32), aguas abajo del Nudo Vial Mitre más conocido como Hombre Urbano. Se trata de una curva natural del río, que posee un radio de 231,5 m, la cual se encuentra canalizada con una sección trapecial de hormigón, que evita problemas de erosión. Se midió en esta sección, para visualizar los procesos anteriormente mencionados que tienen lugar en flujos en curvas.

El Río Suquía o Río Primero es uno de los ríos más importantes de la provincia de Córdoba. Nace por la unión de varios ríos y arroyos en la zona de las sierras Pampeanas del oeste cordobés principalmente en el valle de Punilla e ingresa en la penillanura cordobesa, donde se encuentra la mayor parte de la ciudad de Córdoba, la cual atraviesa (Figura 29). Casi en el centro de dicha urbe, recibe por su margen derecha al Arroyo La Cañada.



Figura 29: Ubicación Área de estudio (Google Maps)

La longitud aproximada del río Primero es de unos 200 km (si se considera como su nacimiento al dique San Roque) y el ancho promedio de su cauce es de 200 m. Su caudal medio anual es de 10 m³/s, con mínimos de 1,5 m³/s y máximos de 24 m³/s, en verano. En condiciones de estiaje el caudal se reduce considerablemente, aunque aumenta de modo abrupto cuando se producen lluvias.

El tramo de estudio no presenta erosión, ni socavación del cauce en la margen interna por encontrarse canalizado (Figura 31). Sin embargo los demás procesos característicos del flujo en curvas si se encuentran presentes. El flujo es tridimensional y consiste en una componente primaria en la dirección de la corriente y dos componentes secundarias, una rotacional y otra de traslación que combinadas desarrollan un flujo en forma helicoidal o de espiral. Entre los procesos propios de flujo en curvas presentes en el área estudiada se pueden mencionar, la acumulación de sedimentos en la margen interna, la sobreelevación de la superficie del agua, las corrientes secundarias, la separación de flujo en las márgenes y las fluctuaciones de baja frecuencia.



Figura 30: Detalle de la zona de estudio (Gloogle Maps)



Figura 31: Canalización de la curva estudiada hacia aguas abajo



Figura 32: Vista hacia aguas arriba desde la curva analizada.

5.2. INSTRUMENTAL EMPLEADO

5.2.1. Perfilador de Corrientes Acústico Doppler ADCP

Para realizar las mediciones de velocidades en el cauce se utilizó un Perfilador de Corrientes Acústico Doppler de la firma Sontek® de 1000 kHz (Figura 33), perteneciente a la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEFYN) de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC). Los perfiladores de Corriente Acústicos Doppler son comúnmente denominados ADCP debido a sus siglas en inglés (Acoustic Doppler Current Profiler). Este instrumento permite medir la magnitud y dirección relativa entre el agua y la embarcación en donde se encuentra, utilizando el principio físico del cambio de frecuencia Doppler para la determinación del campo de velocidades del flujo.

Lo que hace el instrumento es medir el movimiento del agua en tres dimensiones a lo largo de diferentes perfiles de columna de agua, a medida que es trasladado desde una orilla del cauce hacia la otra. Recolecta información correspondiente a posición, distancia y profundidad de agua en cada vertical. Esta información es utilizada por el software correspondiente para calcular el flujo neto y el caudal de agua que escurre a través de la sección transversal medida.



Figura 33: Perfilador de Corrientes Acústico Doppler de la firma Sontek® perteneciente a FCEFyN

Como ya se mencionó estos instrumentos utilizan el efecto Doppler, el cual se define como el cambio de frecuencia del sonido, que resulta del movimiento relativo entre el emisor y el receptor. Lo que sucede es que al encontrarse, el emisor de las ondas y el receptor en movimiento relativo respecto al medio en que se propaga la onda, la frecuencia de las ondas recibidas es diferente a la frecuencia de las ondas emitidas por la fuente. El ADCP posee 3 o 4 transductores los cuales están montados en la cabeza del instrumento y ubicados a 20° o 30° respecto de la vertical (dependiendo del fabricante). Por medio de estos, emite un haz de ondas sonoras a una frecuencia fija y recibe los ecos que este produce al reflejarse en las partículas contenidas en la columna de agua.

Las partículas reciben la onda sonora emitida por el ADCP con un cambio de frecuencia Doppler debido a la menor frecuencia de la onda sonora, la cual será proporcional a la velocidad relativa entre el ADCP y las partículas. Luego, las partículas funcionan como una fuente emisora de sonido ya que al rebotar el sonido en ellas, el ADCP lo recibe con un segundo cambio Doppler. Por lo tanto, el ADCP transmite y recibe el sonido

Cada haz es subdividido en celdas de una longitud específica conocida con el fin de obtener datos en cada celda de cada columna de agua. Se obtienen de cada celda los siguientes datos:

- Tres valores de velocidad del flujo (uno para cada componente)
- Tres valores de intensidad de la señal (uno para cada haz (beam) transductor)

- Tres valores de desviación estándar (uno para cada componente de velocidad)

Con valores de la intensidad de la señal y de la desviación estándar se estima la calidad de los datos de velocidad medidos. El ADCP, al mismo tiempo mide datos de profundidad, velocidad y posición de la embarcación, etc. Es importante destacar que la velocidad del bote puede ser medida mediante dos procedimientos:

- *bottom-track* (o rastreo de fondo),
- geoposicionador satelital (GPS).

Ambos sistemas le permiten al instrumento medir la velocidad de la embarcación (en dirección y magnitud) en forma relativa al lecho. Para obtener las velocidades absolutas en cada columna de agua independientemente del movimiento de la lancha, se sustrae la velocidad del bote de la velocidad medida. Luego las velocidades en cada perfil conforman la base de datos para la estimación de caudales en un curso de agua.

Se aconseja el uso del GPS para calcular la velocidad de la embarcación ya que este sistema nos permite calcular posiciones absolutas, a diferencia del BT (*bottom-track*) que calcula posiciones relativas.

El perfil transversal medido, se analiza como una sección del río dividida en varias columnas a lo ancho que representan los perfiles verticales y varias filas desde la superficie hasta el fondo. La intersección entre ambas, forma las celdas individuales a cada una de las cuales les corresponde una velocidad determinada (Figura 34). Las celdas que se encuentran en el centro suelen ser más rápidas que aquellas que se encuentran en el fondo y en los márgenes debido a la fricción presente en estas zonas.

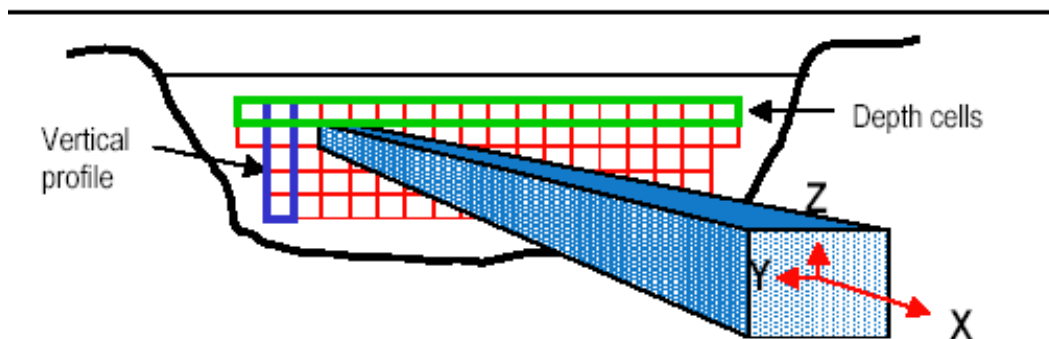


Figura 34: Discretización de celdas durante la medición con el ADCP (Sontek, 2005)

El instrumento mide en cada celda la velocidad del agua y genera un perfil de velocidades de cada una de las columnas, desde su superficie hasta el fondo. Al finalizar el trayecto de un lado del río hacia el otro, se logra obtener el campo de velocidades completo del río.

El empleo de anemometría acústica basada en el efecto doppler se ha tornado actualmente una práctica de gran aplicación tanto en trabajos de laboratorio como en mediciones en campo en ríos, estuarios y/o canales, ya que permite la medición precisa de caudales y la caracterización del flujo medio y de la estructura de la turbulencia (Simpson y Oltmann 1993; Oberg y Mueller 1994; López et al., 1998, 2000; Morlock, 1996; Droz et al., 1998; Muste et al., 2004a, b). Además posee otras ventajas con respecto a otros métodos convencionales entre las que se destacan (Lipscomb, 1995):

- El tiempo requerido para realizar la medición es menor, lo que permite tomar registros en ríos donde los métodos convencionales demandan de grandes tiempos de medición.
- Se pueden realizar mediciones simultáneas en distintos puntos de la vertical, con lo cual los datos se obtienen en la columna de agua completa en vez de en puntos discretos.
- Menores costos en la campaña de medición.
- Permite registrar las distancias recorridas, y las profundidades de flujo.
- Mayor resolución espacial y temporal que los métodos convencionales.
- Permite efectuar mediciones con la embarcación en movimiento con lo cual se puede instalar directamente en la lancha eliminando gastos de instalación, mantenimiento, y cables.
- Permiten medir el campo 3D de flujo y parámetros de la turbulencia (tensiones de Reynolds, intensidades turbulentas, etc.).

Sin embargo también posee algunas desventajas como ser:

- Alto costo inicial.
- No se puede utilizar en aguas bajas o zonas cercanas a las márgenes.
- Es más complejo de operar que los instrumentos convencionales.
- Debe ser utilizado por personal capacitado y seguir procedimientos estandarizados para asegurarse que los datos recolectados cumplen con los estándares de investigaciones hidrológicas.

Es importante tener en cuenta que para que los resultados obtenidos sean satisfactorios antes de realizar las mediciones se debe realizar una correcta configuración del ADCP. Para ello se deben definir ciertos parámetros fundamentales:

- Blanking Distance
- Rango de medición en el perfil (profiling range)
- Tamaño de celda
- Cantidad de celdas
- Intervalo de promediación

El instrumento fue colocado en un barrenador y trasladado de una orilla a la otra mediante una cuerda.

5.2.2. Drone

Se utilizó un Drone Dji Phanthom 2 Vision Plus (Figura 35) perteneciente a la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEFYN) de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC), para grabar videos de manera perpendicular al curso de agua y de esta manera poder aplicar más tarde la técnica de PIV/PTV sin la necesidad de rectificar.



Figura 35: Drone Dji Phanthom 2 Vision Plus

Un drone es un cuadricóptero no tripulado, pilotado de manera remota. Suelen ser pequeños y ligeros. Los cuadricópteros utilizan cuatro hélices o rotores para su sostén y propulsión. Aunque los diseños de los drones puedan diferir unos de otros, hay ciertos

componentes mecánicos y eléctricos que son necesarios para su funcionamiento, entre ellos se encuentran:

Componentes mecánicos

- **Estructura:** Es la parte donde se montan y se apoyan el resto de los componentes. Pueden tener diferentes tamaños y diseños, pero su función principal es conseguir reducir al máximo las vibraciones producidas por los motores al hacer girar las hélices.
- **Hélices:** Hay cuatro hélices que conseguirán estabilizar el cuadricóptero en el aire. Cada hélice va impulsado por un motor y se encuentran en los cuatro extremos.
- **Motores:** Van conectados a las hélices. Por lo tanto habrá cuatro, uno por cada hélice y se encuentran justo debajo de estas, en la parte exterior de la estructura (brazos).

Componentes eléctricos

- **Control electrónico de velocidad:** Interpreta la información que recibe de la placa controladora y regula la velocidad y dirección en el movimiento. Es un componente esencial en el vuelo.
- **Batería de Drones:** Alimenta de energía a todos los componentes eléctricos del Drone. Por una cuestión de peso suelen ser pequeñas.
- **Control remoto:** Es el dispositivo que controla el funcionamiento del Drone y que nos permitirá manejarlo desde donde nos encontremos. Hay softwares para smartphones y tablets que pueden sustituir algunos controles remotos, dependerá del Drone.
- **Placa controladora:** Su propósito es asegurar la estabilidad en el vuelo transmitiendo información al Control Electrónico de Velocidad.

Mecánica de un Drone

Como ya hemos mencionado, utilizan cuatro hélices situadas en los extremos de la estructura, que son impulsadas cada una por un motor. Estos motores son propulsores eléctricos pequeños y redondos que dan soporte al vuelo del dispositivo. Dos hélices giran en un sentido y las otras en el sentido contrario. Las cuatro trabajan al mismo tiempo para

generar la fuerza de empuje necesaria para elevarlo en el aire. Variando el empuje que es ejercido por cada hélice, se puede conseguir una estabilidad completa del aparato.

Un cuadricóptero tiene cuatro tipos de movimiento: guiñada (hacia la derecha o izquierda del eje vertical), inclinación (hacia la derecha o izquierda del eje longitudinal), cabeceo (rotación hacia delante o hacia atrás con respecto al eje transversal) y altitud (elevación en vertical). Estos movimientos están controlados por la variación o el ajuste de la propulsión en cada hélice.

El drone, obedece las órdenes de un operador en el suelo, transmitido por radio desde un control remoto de gran alcance y las imágenes y videos son tomadas por una cámara incorporada. Esto permite en la actualidad tomar imágenes aéreas que anteriormente no se podían conseguir o el costo de obtenerlas era mucho más elevado.

5.3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL Y METODOS DE PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Con el fin de realizar las mediciones, se planificó previamente las campañas, definiendo la curva y la sección que se iba a medir.

Ya en campo, lo primero que se hizo fue grabar un video con un drone (Figura 36), mientras se arrojaban al río partículas, en este caso se trataba de viruta de madera para luego poder aplicar la técnica PIV (Figura 37). Luego, se procedió a realizar la medición de una sección de la curva de acuerdo a la metodología experimental recomendada en Tarrab (2013). Para ello se trasladó el ADCP (mediante un barrenador) por medio de una cuerda de una orilla hacia la otra, mientras el instrumento registraba perfiles de velocidad del flujo a una frecuencia de 1Hz y reconstruía el campo de velocidades del flujo en la sección transversal (Figura 38). La sección fue recorrida y medida 12 veces, intentando hacerlo sobre la misma transecta.

Las mediciones se realizaron tratando que la velocidad de bote en las diferentes transectas sea lo más similar posible, y sin que esta superara la velocidad media del curso de agua. Esto permite obtener mayor cantidad de datos y de mejor calidad, ya que cuanto menor es la velocidad de la plataforma móvil, más datos se pueden coleccionar y como resultado se obtiene una menor desviación estándar. A su vez se intentó que la plataforma se mantuviera estable de manera que los movimientos de rotación (pitch, roll y heading) fueran lo minimos.



Figura 36: Medición con drone en Río Suquía

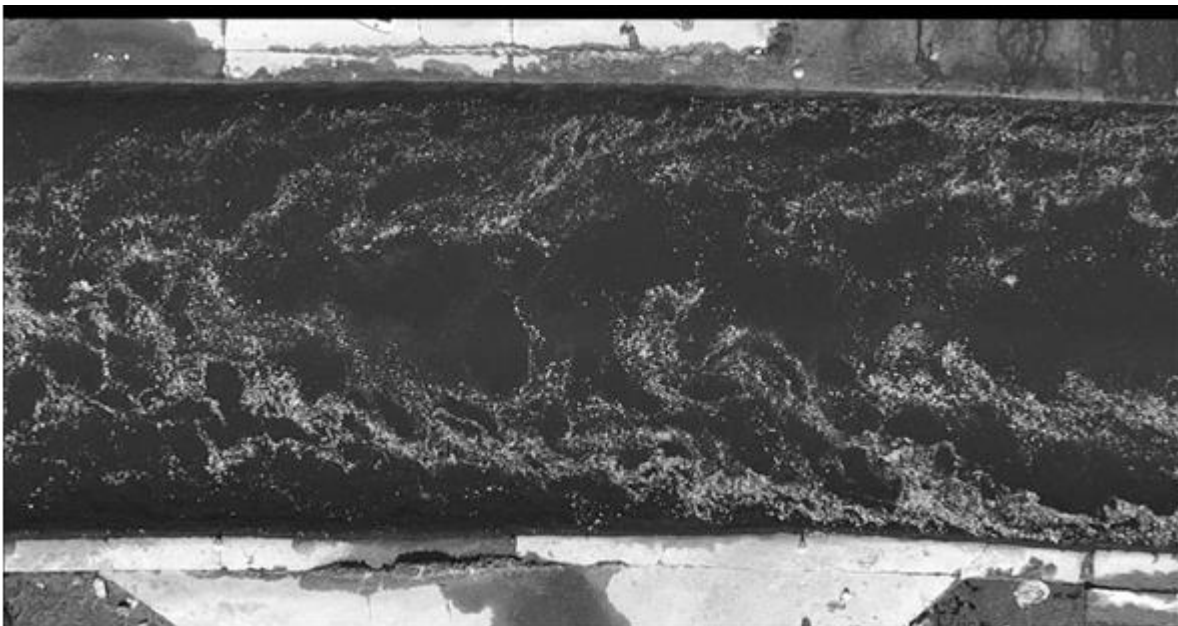


Figura 37: Imagen del video realizado con el drone para aplicar la técnica PIV, donde se visualizan las partículas de aserrín.



Figura 38: Medición con ADCP en Río Suquía

En base a las características del cauce se definió la configuración del ADCP. El tamaño de las celdas, varía entre 2 y 15 cm dependiendo de la profundidad medida. Debido a que se utilizaron los datos del GPS para obtener las velocidades absolutas medidas, se debió fijar la declinación magnética, la cual es la diferencia angular entre la dirección del polo norte magnético con el polo norte geográfico. El día que se midieron los datos, se tomó lectura de la declinación magnética, la cual fue de -5.3.

Los principales parámetros que describen las condiciones de medición se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3: Resumen de los parámetros medidos

Fecha	Caudal Total Q (m ³ /s)	Área A (m ²)	Velocidad media del agua V _w (m/s)	Velocidad media del bote V _b (m/s)	Profundidad media H (m)	Tiempo de exposición medio por transecta T (s)	Número de transectas N _T
30/11/16	6.604	5.945	1.111	0.88	0.775	103	12

Por último, se realizó una medición estacionaria colocando el ADCP y sujetándolo con estacas a las orillas del cauce con el fin de mantenerlo lo más estático posible. Se midió en esa posición por 15 minutos. Esto se realizó con el fin de obtener datos, para a partir de estos y del video video obtenido con el drone, analizar la oscilación periódica del flujo debido a las fluctuaciones de baja frecuencia que causan la variación temporal de la

ubicación de la capa de corte y de esta manera obtener los periodos predominantes en el flujo.

Luego, ya en laboratorio se analizó la información recolectada en campo con el fin de acondicionar los datos medidos a los objetivos del trabajo de investigación. Para ello, se obtuvieron los datos necesarios con el software propio del perfilador con el cual se trabajó, denominado RiverSurveyor Live, los cuales luego fueron procesados por medio de planillas de Excel. A continuación se realiza una breve descripción del programa RiverSurveyor Live.

5.3.1. Programa RiverSurveyor Live

El programa RiverSurveyor Live (Figura 39) es un software de la firma Sontek, el cual se conecta a través de Bluetooth al perfilador acústico Doppler. En campo, a medida que se va midiendo a la sección transversal, se pueden visualizar por medio de una computadora que tenga instalado el programa, los datos que van siendo colectados. Esto permite detectar en el momento, aquellas mediciones de transectas con errores excesivos y en ese caso, volver a realizar la medición correspondiente.

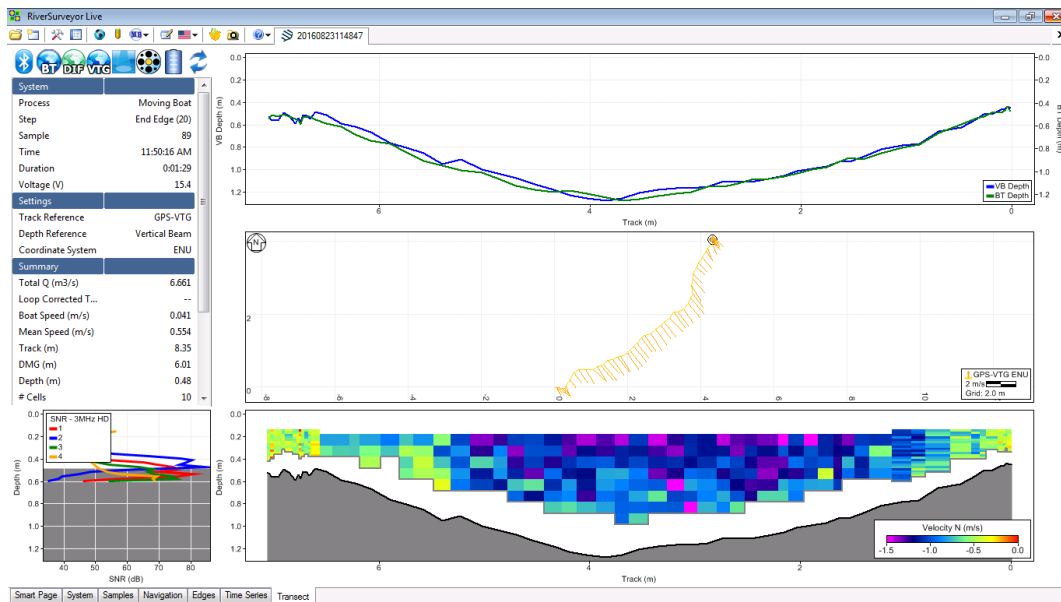


Figura 39: Software RiverSurveyor Live

A su vez este software sirve para realizar el post procesamiento de la información, ya que otorga la posibilidad de obtener tablas y gráficos que facilitan la lectura de los datos y procesos medidos. Algunos de ellos son:

- Perfil de batimetría
- Trayectoria de la embarcación
- Velocidad, potencia de la señal acústica, desviación estándar de la velocidad, caudal, velocidad del agua, velocidad del bote, entre otras.

5.4. RESULTADOS

La forma funcional del parámetro $RME[Q]$ obtenida utilizando los datos generados por DNS fue validada con los datos de campo obtenidos en la campaña. Además también se verificó que las hipótesis realizadas en el análisis dimensional fueran válidas. Los principales parámetros que describen las condiciones de medición se resumen en la Tabla 4. Mientras que la zona donde se realizaron las mediciones se observa en la Figura 40.

Tabla 4: Resumen de las condiciones de medición de caudal

ID Sitio	Fecha	Caudal Total Q_T (m^3/s)	Ancho B (m)	Área A (m^2)	Vel. media del agua V_w (m/s)	Vel. media del bote V_b (m/s)	N° de Transectas N_T
Suquía	23/08/16	6,604	8,80	5,945	1,111	0,088	12

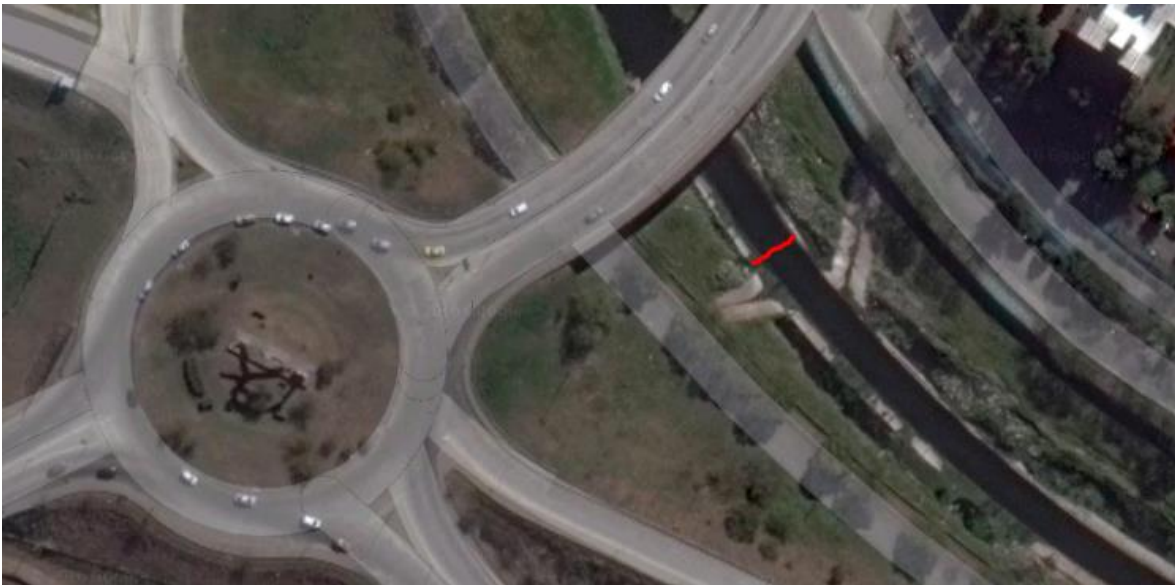


Figura 40: Ubicación de la zona de mediciones (Google Maps).

La Figura 41 muestra el campo de las velocidades en la dirección del flujo para dos transectas diferentes realizadas durante la campaña del día 23 de Agosto de 2016. Se observa que en ambas transectas, existe una recirculación del flujo en la zona cercana a la margen izquierda, la cual presenta una mayor extensión en la Transecta 2 (Figura 41 (A)). En esta zona varía la magnitud de la velocidad y en algunos casos llega a invertirse la dirección de la misma lo cual indica la presencia de fluctuaciones de baja frecuencia.

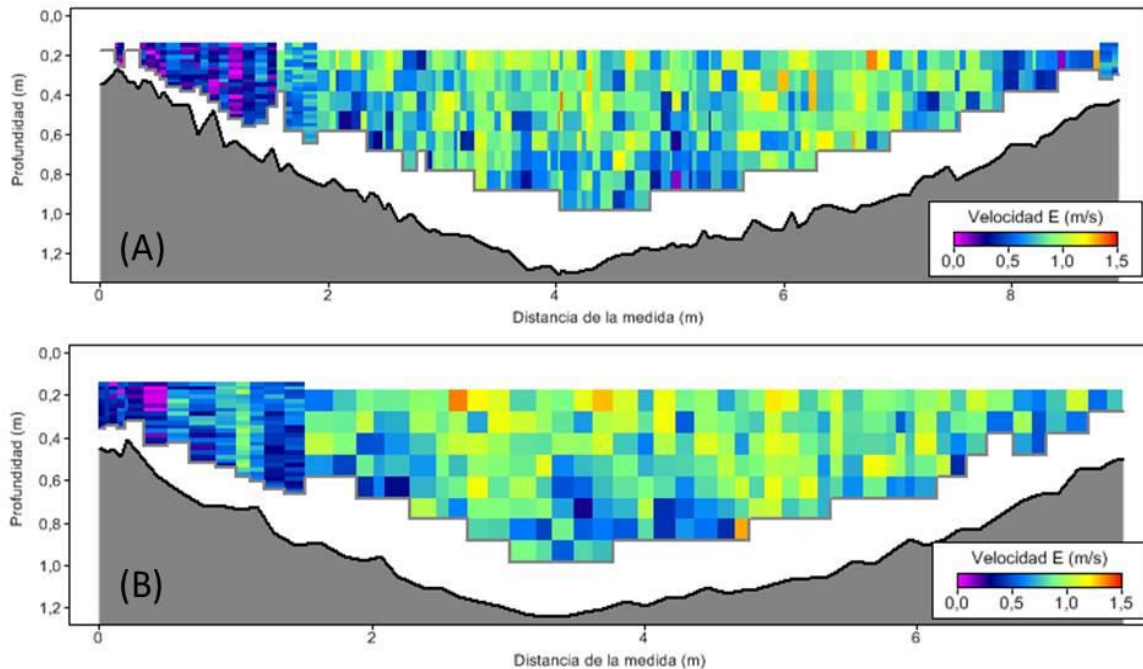


Figura 41: Campo de flujo de las componentes de velocidad en la dirección del flujo medido con ADCP (m/s) en la transecta 2 (A) y en la transecta 6 (B). La progresiva cero corresponde a la margen izquierda. Los valores de velocidad están en m/s.

A través de un gráfico de caudal acumulado para tres transectas, se puede observar una variación del campo de flujo muestreado debido a las fluctuaciones de baja frecuencia del flujo (Figura 42) en coincidencia con la zona de recirculación. Los caudales acumulados en la zona de recirculación se pueden ver en mayor detalle en la Figura 43. El punto en el cual el caudal acumulado es nulo, varía su posición más de un metro entre transectas. De esta manera queda demostrada la fluctuación de la capa de corte entre el flujo efectivo y la zona de recirculación mencionada anteriormente. Esta fluctuación genera incertidumbres en la determinación de caudal desde plataformas móviles (Tarrab et al., 2012) y es por ello que se realizaron múltiples transectas en lugar de las 4 generalmente

recomendadas para estimar caudal cuando el flujo es estacionario. La recirculación del flujo también fue observada en mediciones realizadas con PTV (Alvarez et al., 2013).

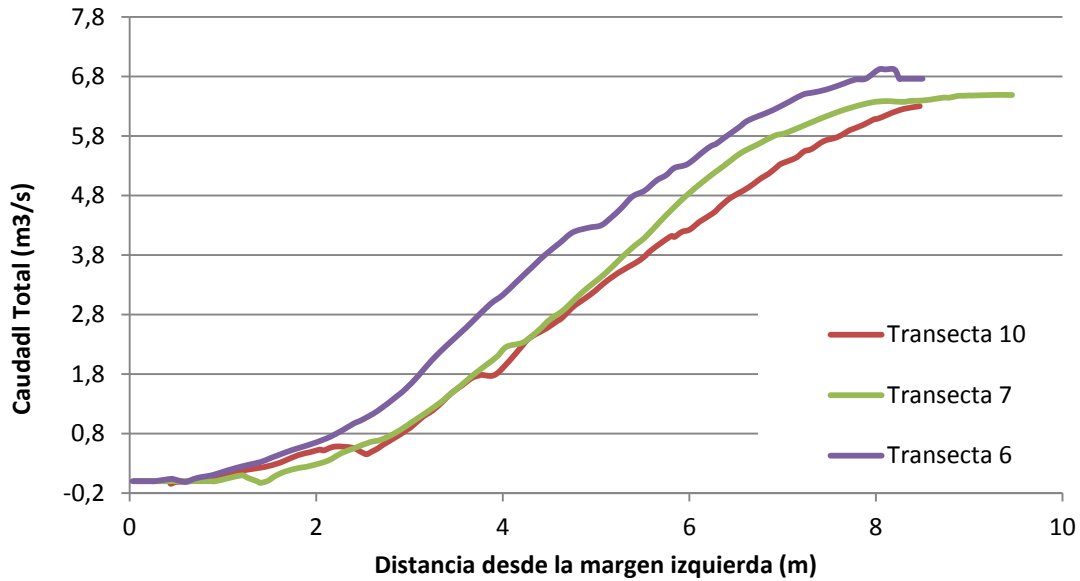


Figura 42: Caudal acumulado para tres transectas del Río Suquía

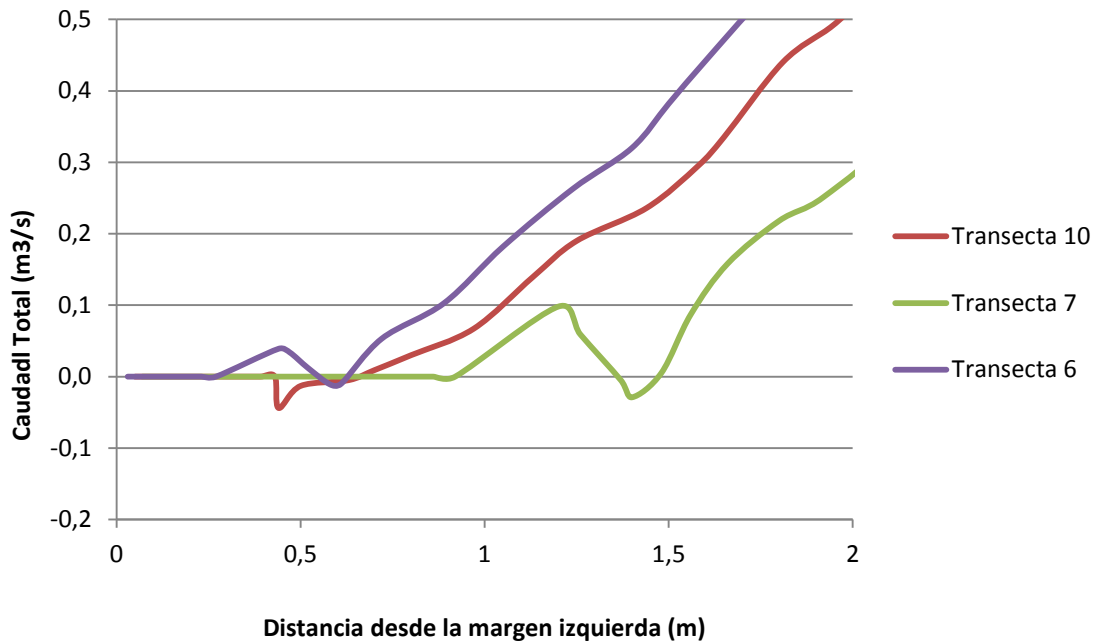


Figura 43: Detalle de caudal acumulado para tres transectas del Río Suquía

A partir de los datos correspondientes a una medición estacionaria, se realizó un espectro de energía (Figura 44), en la cual se observa que la fluctuación del flujo debido a las fluctuaciones de la capa de corte, posee dos periodos. El principal de aproximadamente 142 segundos y el secundario de 28 segundos.

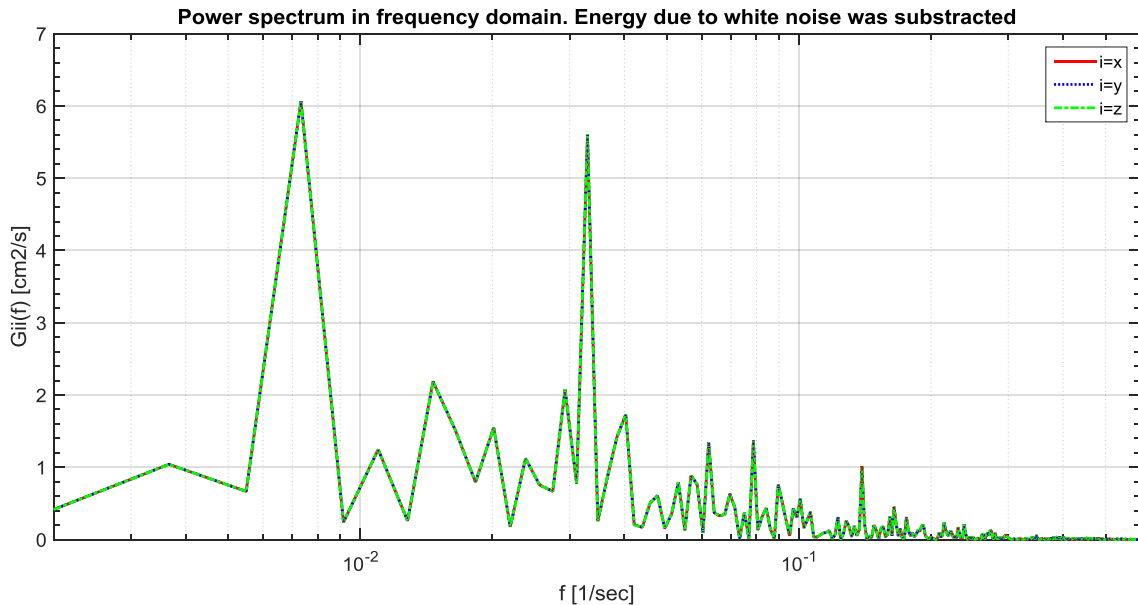


Figura 44: Espectro de energía obtenido a partir de la medición estacionaria

Al haber verificado la existencia de fluctuaciones de baja frecuencia, se procedió a analizar el conjunto de datos obtenidos en campaña los cuales fueron obtenidos a partir de la medición de 12 transectas en el mismo lugar. Las condiciones de medición en cada una de estas transectas se puede observar en la Tabla 5.

Tabla 5: Condiciones de medición de caudal para cada transecta

Transecta	Duración	Ancho	Área	Prof. media	B/H	Vel. del agua	Vel. del bote	Total Q	Error relativo
	T(s)	B (m)	A (m ²)	H (m)		Vw (m/s)	Vb (m/s)	(m ³ /s)	%
1	125	8,09	5,957	0,74	11	1,145	0,078	6,821	3,29%
2	145	7,81	5,895	0,76	10	1,120	0,068	6,604	0,00%
3	148	8,05	6,105	0,76	11	1,097	0,100	6,700	1,45%
4	120	8,03	6,145	0,77	10	1,128	0,074	6,931	4,95%
5	80	7,61	6,054	0,80	10	1,092	0,104	6,613	0,14%
6	86	7,63	6,000	0,79	10	1,127	0,094	6,762	2,39%
7	87	7,50	5,856	0,78	10	1,108	0,096	6,489	1,74%
8	102	7,47	5,870	0,79	10	1,134	0,081	6,656	0,79%

9	89	7,70	5,973	0,78	10	1,034	0,107	6,175	6,50%
10	105	7,11	5,705	0,80	9	1,138	0,082	6,492	1,70%
11	89	7,51	5,918	0,79	10	1,126	0,094	6,661	0,86%
12	115	7,51	5,868	0,78	10	1,081	0,076	6,341	3,98%

Estos datos se analizaron con la misma metodología descrita para lo datos DNS. De esta manera el caudal medio de las 12 transectas se supone que es el verdadero caudal y se calculó el $RME[Q]$ error absoluto máximo relativo asociado con 1, 2, 4 y 8 transectas consecutivas (Tabla 6).

Tabla 6: Error absoluto máximo relativo $RME[Q]$ asociado con 1, 2, 4 y 8 transectas consecutivas

N° de Transectas promediadas	Máx RME(Q)
1	6,50%
2	4,10%
4	2,83%
8	1,41%

Entre los valores de $RME[Q]$ calculados a partir de DNS, de datos obtenidos en laboratorio y los calculados en base a datos de campo se puede observar una buena aproximación (Figura 45). Los datos medidos en el río Suquía

No existen diferencias significativas entre los resultados obtenidos en base a las mediciones realizadas en el río Suquía, los correspondientes a las mediciones en laboratorio y aquellos calculados con datos de DNS, con lo cual se validan a priori las hipótesis realizadas y la curva adimensional de la ecuación (30) puede utilizarse para cuantificar el rol de las fluctuaciones de baja frecuencia del flujo en las incertidumbres de las mediciones de caudal con ADCP.

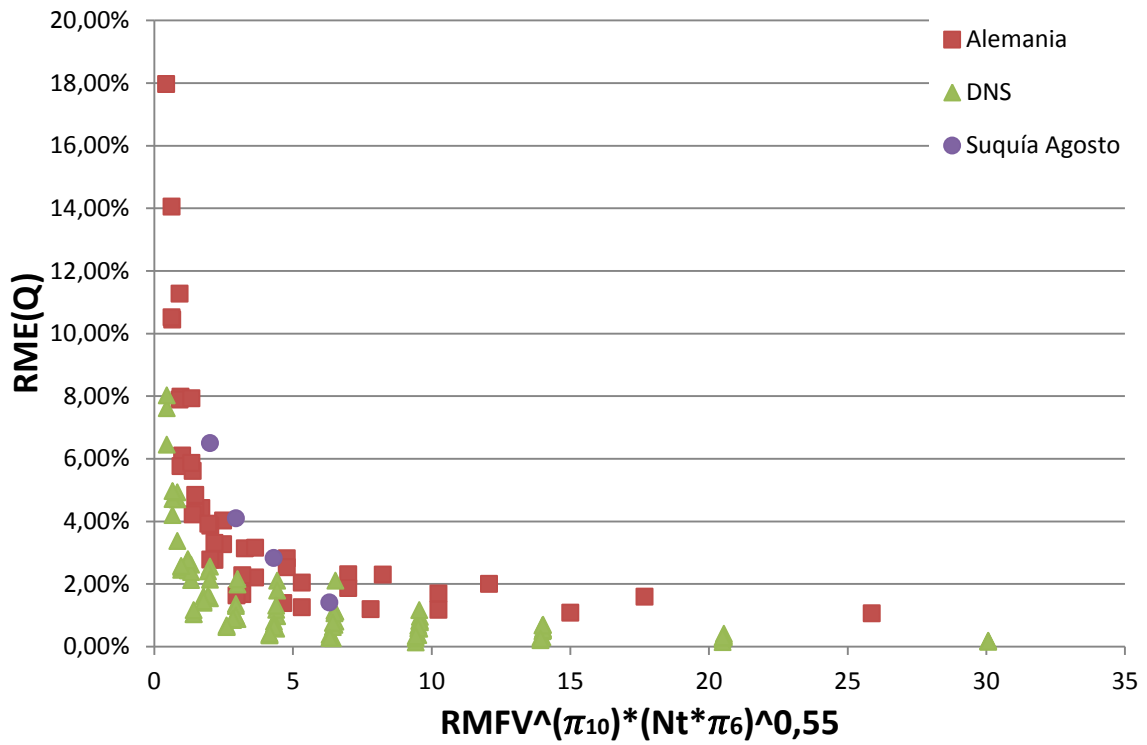


Figura 45: Valores de $RME[Q]$ estimados con la simulación numérica (DNS, ec.(30)) datos obtenidos en laboratorio y datos de campo (Río Suquía).

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

En el presente trabajo, se realizó una contribución en lo que respecta a la estimación de incertidumbres en las mediciones de caudal con Perfiladores de Corriente Acústicos Doppler (ADCP) desde plataformas móviles debido a fluctuaciones de baja frecuencia.

Con el fin de evaluar estas incertidumbres, se realizó un análisis dimensional, en el cual se evaluó el rol de cada una de las variables adimensionales. A partir de estas variables adimensionales y el estudio de datos generados con Simulación Numérica Directa (DNS) se obtuvo una forma funcional adimensional que permite cuantificar la incertidumbre (error máximo relativo) en función de parámetros adimensionales relacionados la configuración del muestreo y a las condiciones del flujo. La cual, luego se verificó con resultados de mediciones en campo y en laboratorio. Del análisis realizado se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Mediciones realizadas aguas abajo de las curvas en un canal artificial, indican que una de las grandes incertidumbres en el caudal del flujo medido se puede atribuir a las fluctuaciones de baja frecuencia generadas por efectos de la geometría en planta (fluctuación de la capa de corte que separa la zona de recirculación). La presencia de esta separación del flujo genera una reducción cuasi-periódica en la sección efectiva de flujo (aumenta la zona de recirculación).
- A partir de los datos obtenidos de las mediciones realizadas en el Río Suquía, se pudo verificar las hipótesis realizadas en un principio, y los resultados obtenidos en laboratorio, ya que en estas se puede observar una fluctuación cuasi-periódica de la ubicación de la capa de corte. Este comportamiento impermanente genera incertidumbres en la determinación de caudal desde plataformas móviles por lo que los protocolos recomendados en la actualidad para la medición de caudal con ADCP en flujos estacionarios no resulta en mediciones precisas para estos casos. Los hallazgos presentados en este trabajo proveen una herramienta para definir las estrategias de muestreo óptimas, a los fines de optimizar las mediciones de caudal con ADCP.
- Se puede observar en los gráficos, que los datos obtenidos por DNS son los que menor incertidumbre presentan ya que en este caso solo hay turbulencia. En el caso del canal de Alemania y el Río Suquía, las incertidumbres son mayores debido a que en estos casos hay presentes otras incertidumbres como aquellas debido al ruido propio del instrumento o técnica de medición utilizada, al ruido ambiental, etc. En el caso del canal artificial las incertidumbres son menores que

en campo, ya que en este ámbito es más fácil reducir la influencia de estos errores que en campo.

- Los resultados muestran que aumentar el número de transectas tiene un mayor impacto en la reducción del rol de las fluctuaciones de baja frecuencia sobre las incertidumbres de las mediciones de caudal con ADCP, que el aumento de la frecuencia de muestreo y la disminución de las velocidades del bote.
- Se recomienda en el caso de flujo en curvas en los que haya presentes fluctuaciones de baja frecuencia, realizar las mediciones con ADCP desde plataformas móviles con una velocidad del bote menor a la velocidad del agua efectuando 8 transectas y promediando los caudales obtenidos. De esta manera se obtendrá un error máximo relativo ($RME[Q]$) aproximadamente del 1% o menor en algunos casos.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abad, J. D., Musalem, R. A., García, C. M., Cantero, M. I., García, M. H. (2004). "Exploratory study of the influence of the wake produced by acoustic Doppler velocimeter probes on the water velocities within measurement volume". *Proc., World Water & Environmental Resources Congress 2004* (CD-ROM), ASCE, Reston, Va.
- Adrian, R. J. (1991). "Particle-imaging technique for experimental fluid mechanics". *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 23, pp 261-304.
- Alvarez, J., Ragessi, I.M., Patalano, A., García, C.M., Hillman, G. (2013). "Estudios Hidrodinámicos Experimentales Para El Diagnóstico De Problemáticas En Plantas De Tratamiento De Agua", *Tercer Simposio de Métodos Experimentales en Hidráulica*, Santa Fe, Argentina
- Ardesch, R. (2014). "Flow Separation in Sharp-Bend-Flow". M.Sc. thesis. Universiteit Utrecht. Utrecht. Netherlands.
- Blanckaert, K., Graf, W. H. (2004). "Momentum transport in sharp open-channel bends." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 130(3), pp. 186-198.
- Callander, R. A., (1978). "River Meandering". *Annual Reviews Fluid Mechanics*, Vol 10, pp. 129-158.
- Carr, M. L., Rehmann, C. R. (2005). "Estimating the dispersion coefficient with an acoustic Doppler current profiler", *Proc., World Water and Environmental Resources Congress 2005* (CD-ROM), ASCE, Reston, Va.
- Carr, M. L., Rehmann, C. R., Gonzalez, J. A. (2005). "Comparison between dispersion coefficients estimated from a tracer study and ADCP measurements", *Proc., World Water and Environmental Resources Congress 2005* (CD-ROM), ASCE, Reston, Va.
- Cenedese, A., Querzoli, G., (1997). "Lagrangian statistics and transilient matrix measurements by PTV in a convective boundary layer". *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 8, 1553.

- Cheng, R. T., Gartner, J. W., Wood, T. (2005). "Modeling and model validation of wind-driven circulation in upper Klamath Lake, Oregon", *Proc., World Water and Environmental Resources Congress 2005* (CD-ROM), ASCE, Reston, Va.
- Czuba, J. A., Oberg, K. A. (2008). "Validation of Exposure Time for Discharge Measurements made with Two Bottom-Tracking Acoustic Doppler Current Profilers", *Proc. of the IEEE/OES/CMTC Ninth Working Conference on Current Measurement Technology*, IEEE, Charleston, SC, 245-249.
- Deines, K. L. (1999). "Backscatter estimation using broadband acoustic Doppler current profilers". *Proc., 6th Working Conf. on Current Measurement*, IEEE, New York, 249–253.
- Dietz, P., Kurzke, M., Carmer, C. F.v. (2002). "STUMTRA" eine Mess- und Steuer-Software für den Flachwasser-Versuchsstand. Bedienungsanleitung, programmdokumentation, Betriebshinweise". *Technical Report 790*, Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe.
- Dinehart, R. L., Burau, J. R. (2005). "Averaged indicators of secondary flow in repeated acoustic Doppler current profiler crossing of bends". *Water Resources Research*, 41, 1-18.
- Droz, C. J., López, F., Prendes, H. (1998). "Mediciones de velocidades y caudales con un ADCP en el Río Paraná". *Proc., Decimoséptimo Congreso Nacional del Agua y II Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur*, Santa Fé, Argentina.
- Einstein, A. (1926). "Die Ursache der Mäanderbildung der Flussläufe und des sogenannten Baerschen Gesetzes". *Naturwissenschaften*, Vol.14, pp. 223–224.
- Ferguson, R. I., Parsons, D. R., Lane, S. N., Hardy, R. J. (2003). "Flow in meander bends with recirculation at the inner bank". *Water Resources Research*, Vol. 39, pp. 1322.
- Gaeuman, D., Jacobson, R. B. (2005). "Aquatic habitat mapping with an acoustic current profiler: Considerations for data quality." *Open- file Rep. No. 2005-1163*, U.S. Geological Survey, Reston, Va

- García, C. M., Oberg, K., García, M. (2007). "ADCP Measurements of Gravity Currents in the Chicago River, Illinois". *J. Hydr. Engrg.* ASCE. 133(12), 1356-1366. ISSN: 0733-9429
- García, C.M.; Ragessi, M.; Haisama, M.; Balderrama, C.; Herrero, H.; Tarrab, L.; Cantero M.; Rodriguez, A. (2010) "Caracterización experimental del flujo en componentes de una planta de tratamiento de agua potable". *XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Punta del Este. Uruguay.
- González-Castro, J. A., Ansar, M., Kellman, O. (2002). "Comparison of discharge estimates from ADCP transect data with estimates from fixed ADCP mean velocity data", *Proc., Hydraulic Measurements & Experimental Methods 2002* (CD-ROM), ASCE, Reston, Va.
- González-Castro, J. A., Muste, M. (2007). "Framework for Estimating Uncertainty of ADCP Measurements from a Moving Boat by Standardized Uncertainty Analysis," Special Issue on Acoustic Velocimetry for Riverine Environments, *J. Hydr. Engrg.*, 133(12), pp. 1390-1411.
- González-Castro, J. A., Melching, C. S., Oberg, K. A. (1996). "Analysis of open-channel velocity measurements collected with an acoustic Doppler current profiler." *Proc., RIVERTECH 96*, 1st. Int. Conf. on New/Emerging Concepts for Rivers, IWRA, 2, Chicago, 838–845.
- Guerrero, M., Lamberti, A. (2011). "Flow Field and Morphology Mapping Using ADCP and Multibeam Techniques: Survey in the Po River", *J. Hydraul. Eng.*, 137(12), 1576–1587. doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000464.
- Guerrero, M., Rüther, N. Szupiany, R. N. (2011a). "Laboratory validation of ADCP techniques for suspended sediments investigation", *Flow Measurement and Instrumentation*, Doi:10.1016/j.flowmeasinst.2011.10.003.
- Guerrero, M., Szupiany, R. N. Amsler, M. (2011b). "Comparison of acoustic backscattering techniques for suspended sediments investigation", *Flow Measurement and Instrumentation*, Doi:10.1016/j.flowmeasinst.2011.06.003.

- Howarth, M. J. (2002). "Estimates of Reynolds and bottom stress from fast sample ADCPs deployed in continental shelf seas", *Proc., Hydraulic Measurements & Experimental Methods 2002* (CD-ROM), ASCE, Reston, Va.
- Ippen, A. T., Drinker, P. A. (1962). "Boundary shear stresses in curved trapezoidal channels". *Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 88(HY5), pp. 143–179.
- Jackson, P., García, C.M., Oberg, K., Johnson K., García, M. (2007). "Density Currents in the Chicago River: Characterization, Effects on Water Quality, and Potential Sources". *Science of the Total Environment*. Elsevier Science. ISSN: 0048-9697.
- Jamieson, E. C., Rennie, C. D., Jacobson, R. B., Townsend, R. D. (2011). "3-D flow and scour near a submerged wing dike: ADCP measurements on the Missouri River", *Water Resour. Res.*, 47, W07544, doi:10.1029/2010WR010043.
- Jamieson, E. C., Rennie, C. D., y Ramooz, R. (2008). "Validation of ADCP bedload transport measurements", Proc. 2008 River Flow Conf., KUBABA Congress Dept. and Travel Services, Cesme, Turkey, 2343–2351.
- Jamieson, E.C., Rennie, C. D., Jacobson, R. B. Townsend, R. D. (2011). "Evaluation of ADCP Apparent Bed Load Velocity in a Large Sand-Bed River: Moving versus Stationary Boat Conditions", *American Society of Civil Engineers*, DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000373.
- Jirka, G.H. (2001): "Large Scale Flow Structures and Mixing Processes in Shallow Flows", *J. Hydraulic Research*, Vol. 39, 6, 567-573
- Kawanisi, K. (2004). "Structure of turbulent flow in a shallow tidal estuary", *J. Hydraul. Eng.*, 130(4), 360–370.
- Kostaschuk, R., Villard, P., Best, J. (2004). "Measuring velocity and shear stress over dunes with acoustic Doppler profiler". *J. Hydraul. Eng.*, 130(9), 932–936.
- Leeder, M. R., Bridges, P. H. (1975). "Flow separation in meander bends". *Nature*, Vol. 253, pp. 338-339.

- Leopold, L. B., Bagnold, R. A., Wolman, M. G., Brush, L. M. (1960). "Flow resistance in sinuous and irregular channels". *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, 282D, pp. 111– 134.
- Leschziner, A., Rodi, W.(1979), "Calculation of strongly curved open channel flow", *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 105 (10), pp. 1297-1314.
- Lipscomb, S.W. (1995). "Quality assurance plan for discharge measurements using broadband acoustic Doppler profilers": U.S. Geological Survey Open-File Report 95–701, 7 p.
- López, F., Garcia, C. M., Droz, C. M., Prendes, H. H. (1998). "Mediciones de la estructura del flujo medio y de la turbulencia con un ADCP en el río Paraná, Argentina". *Memorias XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Oaxaca, México.
- López, F., Garcia, C. M., Fernández, R. (2000). "Caracterización del flujo medio y de la turbulencia en grandes ríos empleando anometría acústica Doppler." *Anales XVIII Congreso Nacional de Agua y II, Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur*, S. del Estero, Argentina.
- Lu, Y., Lueck, R. G. (1999a). "Using broadband ADCP in a tidal channel. Part I: Mean flow and shear". *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 16, 1556–1567.
- Lu, Y., Lueck, R. G. (1999b). "Using broadband ADCP in a tidal channel. Part II: Turbulence". *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 16, 1568– 1579.
- Markham, A. J., Thorne, C. R. (1992). " Geomorphology of gravel bed river bends" in *Billi, P., Hey, R. D., Thorne, C. R. & Tacconi, P. (Eds), Dynamics of grave-bed Rivers*, John Wiley & sons Ltd., Chichester, pp. 433-450.
- Marsden, R. F., Ingram, R. G. (2004). "Correcting for beam spread in acoustic Doppler current profiler measurements". *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 21, 1491–1499.
- Morlock, S. E. (1996). "Evaluation of acoustic Doppler current profiler measurements of river discharge". *Water-Resources Investigations Rep. No. 95-701*, U.S. Geological Survey, Denver.

- Mueller, D. S. (2002a). "Field assessment of acoustic Doppler based discharge measurements". *Proc., Hydraulic Measurements & Experimental Methods 2002* (CD-ROM), ASCE, Reston, Va.
- Mueller, D. S. (2002b). "Use of acoustic Doppler instruments for measuring discharge in streams with appreciable sediment transport". *Proc., Hydraulic Measurements & Experimental Methods 2002* (CD-ROM), ASCE, Reston, Va.
- Mueller, D. S. (2004). "Evaluating flow disturbance effects on ADCP measurements." *Proc., Hydroacoustic Workshop 2004* (CD-ROM), San Diego.
- Mueller, D. S. 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.
- Mueller, D. S., Abad, J. D., García, C. M., Gartner, J. W., García, M. H., Oberg, K. A. (2007). "Errors in acoustic Doppler profiler velocity measurements caused by flow disturbance". *J. Hydraul. Eng.*, 133(12), 1411–1420.
- Mueller, D. S., Oberg, K. A. (2011). "Discussion of Near-Transducer Errors in ADCP Measurements: Experimental Findings". *J. Hydraul. Eng.*, 137(8), 863-866.
- Mueller, D. S., 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.
- Muste, M. Kim, D., Hotchkiss, R., Gonzalez-Castro, J. (2010). "Near-Transducer Errors in ADCP Measurements: Experimental Findings". *J. Hydraul. Eng.*, 136(5), 275 – 289.
- Muste, M., Yu, K., Pratt, T. C., and Abraham, D. (2004a). "Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics. Part II: Fixed-vessel measurements". *Flow Meas. Instrum.*, Vol. 15, pp. 17–28.
- Muste, M., Yu, K. Spasojevic (2004). "Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics; Part I: moving-vessel measurements", *Flow Measurement and Instrumentation*, 15, 17-28.

- Negretti, M. E. (2004). *Analysis of the wake behind a circular cylinder in shallow water flow*. Diploma Thesis, Universita degli studi di Trento.
- Nystrom, E. A., Oberg, K. A., Rehmann, C. R. (2002). "Measurement of turbulence with acoustic Doppler current profilers—Sources of error and laboratory results". *Proc., Hydraulic Measurements & Experimental Methods 2002* (CD-ROM), ASCE, Reston, Va
- Oberg, K. A., Mueller, D.S. (1994). "Recent applications of Acoustic Doppler Current Profilers, in Fundamentals and Advancements in Hydraulic Measurements and Experimentation", Buffalo, New York, 1994, *Proceedings: Hydraulics Division/ American Society of Civil Engineers* (ASCE), p. 341-350.
- Oberg, K., Mueller, D. (2007). "Validation of Streamflow Measurements Made with Acoustic Doppler Current Profilers". *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 133, No. 12, 1421 – 1432.
- Oberg, K., S. Morlock, W. Caldwell, (2005). "Quality-Assurance Plan for Discharge Measurements Using Acoustic Doppler Current Profilers". *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5183*.
- Parsons, D. R., Best, J. L., Lane, S. N., Orfeo, O., Hardy, R. J, Kostaschuk, R. (2007). "Form roughness and the absence of secondary flow in a large confluence-diffuence, Rio Paraná, Argentina". *Earth Surf. Processes Landforms*, 32, 155–162, doi:10.1002/esp.1457.
- Raffael, M., Willert, C., Kompenhans, J. (1998). "Particle Image Velocimetry. A practical Guide". *Springer*.
- Ramooz, R., Rennie, C. D. (2010). "Laboratory measurement of bedload with an ADCP, In Bedload-surrogate monitoring technologies": *United States Geological Survey Scientific Investigations Rep.* 2010-5091, Reston, VA, <http://pubs.usgs.gov/sir/2010/5091/papers/Ramooz.pdf>.
- Rennie, C. D., Millar, R. G., Church, M. A. (2002). "Measurement of bedload velocity using an acoustic Doppler current profiler". *J. Hydraul. Eng.*, 128(5), 473–483.

- Rennie, C. D., Rainville, F. (2006). "Case study of precision of GPS differential correction strategies: Influence on aDcp velocity and discharge estimates". *J. Hydraul. Eng.*, 132(3), 225–234.
- Rozovskii, I.L. (1961). "Flow of Water in Bends of Open Channels". *Academy of Sciences of the Ukrainian SSR*.
- Schemper, T. J., Admiraal, D. M. (2002). "An examination of the application of acoustic Doppler current profiler measurements in a wide channel of uniform depth for turbulence calculations." *Proc., Hydraulic Measurements & Experimental Methods 2002* (CD-ROM), ASCE, Reston, Va.
- Schmidt, A. R., Espey, W. H. (2004). "Uncertainties in discharges measured by acoustic meters—A case study from accounting for Illinois' diversion of water from Lake Michigan". *Proc., World Water & Environmental Resources Congress 2004* (CD-ROM), ASCE, Reston, Va.
- Shih, H. H., Payton, C., Sprenke, J., Mero, T. (2000). "Towing basin speed calibration of acoustic Doppler current profiling instruments". *Proc. Joint Conf. on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management 2000* (CD-ROM), ASCE, Reston, Va.
- Simpson, M. R. (2001). "Discharge measurements using a broad-band acoustic doppler current profiler". *U.S. Geological Survey*, Denver, CO.
- Simpson, M. R., Oltmann, R. N. (1993). "Discharge measurement using an acoustic Doppler current profiler". U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2395, 34 p.
- Sontek (2005). RiverSurveyor System Manual – Software version 4.30.
- Stacey, M. T., Monismith, S. G., Burau, J. R. (1999). "Observations of turbulence in partially stratified estuary". *J. Phys. Oceanogr.*, 29, 1950–1970.
- Streeter, V., Wylie, B. (1988). "Fluid Mechanics". 8th Edition. *McGraw-Hill Inc.* USA.

- Szupiany R. N., Amsler M. L., Parsons D. R., Best J. L. (2009). "Morphology, flow structure, and suspended bed sediment transport at two large braid-bar confluences". *Water Resources Research*, VOL. 45, W05415, doi:10.1029/2008WR007428, 2009.
- Szupiany, R. N. (2013). "Técnicas de velocimetría y sus aplicaciones en Hidráulica", Monografía IAHR, en preparación.
- Szupiany, R. N., Amsler, M. L., Hernandez, J., Parsons, D. R., Best, J., Fornari, E., Trento, A. E. (2012). "Flow fields, bed shear stresses and suspended bed sediment dynamics in bifurcations of a large river". *Water Resour. Res.*, doi:10.1029/2011WR011677, in press.
- Szupiany, R.N., Amsler, M. L., Best, J. L., Parson, D. R. (2007). "A Comparison of Fixed- and Moving-Vessel Measurements with an Acoustic Doppler Profiler (ADP) in a Large River". *Journal of Hydraulic Engineering*, 133, 12, 1299-1310.
- Tarrab, L. (2008). "Corrientes Secundarias en Cauces Naturales Inducidas por Curvatura". Tesis de Doctorado. Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba. Argentina.
- Tarrab, L. (2013). "Incertidumbres en Mediciones de Caudal con Perfiladores de Corriente Acústicos Doppler desde Plataformas Móviles". Tesis de Doctorado. Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba. Argentina.
- Tarrab, L, Flores Nieto, V, Herrero, H, Patalano, A, García C. M. (2015). "Incertidumbres en la Medición de Caudal en Canales Curvos desde Plataformas Móviles debido a Fluctuaciones de Baja Frecuencia". *Cuarto Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica*, La Plata, Argentina, 2015.
- Tarrab, L, García C. M., Oberg, K. (2011). "Incertidumbre en la medición de caudales y sus efectos en la definición de medidas de control de inundaciones. Caso de estudio: crecida del Río Mississippi en Abril y Mayo del 2011". *Quinto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. Santiago del Estero*, Argentina, 2011.
- Tarrab, L., Garcia, C. M., Cantero, M. I., Oberg, K. (2012). "Role of turbulence fluctuations on uncertainties of acoustic Doppler current profiler discharge measurements". *Water Resour. Res.*, 48, W06507, doi:10.1029/2011WR011185

- Tarrab, L, García C. M., Patalano, A; Brevis, W (2013). "Fluctuaciones de Baja Frecuencia en el Flujo en Curvas". *Sexto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos*, Santa Fe, Argentina, 2013.
- Thomson, J. (1876). "On the origin of windings of rivers in alluvial plains, with remarks on the flow of water round bends in Pipes". *Proceedings of the Royal Society*, London, Vol. 5, pp. 5-8.
- USGS. (2011). "Exposure time for ADCP moving-boat discharge measurements made during steady flow conditions". *USGS, Office of Surface Water Technical Memorandum 2011.08*, accessed January 23, 2012, at <http://water.usgs.gov/admin/memo/SW/sw11.08.html>
- Vide, J (2002). "Ingeniería de Ríos". 2da Edición. *Editions UPC*. Barcelona, España.
- Weitbrecht, V. (2004). Influence of dead-water zones on the dispersive mass transport in rivers. Doctoral thesis, IfH-University of Karlsruhe.
- White, F (1988). "Fluid Mechanics". 1th Edition (Traducción). *McGraw-Hill Inc*. USA.
- Fricke, P (2014). "Analyzing and Visualizing Flows in Rivers and Lakes with MATLAB" *MathWorks*. USA.

8. ANEXO

Con el objetivo de poder analizar los datos obtenidos a partir de la técnica de PTV en el canal curvo del Laboratorio de Hidromecánica de la Universidad de Karlsruhe, Alemania, se creó un programa en la plataforma Matlab (Figura 46) que simula el paso de un ADCP en movimiento desde una plataforma móvil y permite calcular los errores máximos relativos $RME[Q]$ en las mediciones. A continuación se explicará su funcionamiento.

Como primer paso (Figura 46 (1)) se elimina la información que Matlab pudiera tener cargada y los procesos que se pudieran haber realizado con anterioridad, y se carga la matriz de velocidades obtenida mediante la técnica de PTV en el canal de laboratorio.

Luego (Figura 46 (2)) el usuario deberá ingresar los datos de entrada como ser, el caudal real medido con PTV (Q_{real}), la distancia que hay entre los puntos registrados en la medición (Δx), la altura del canal (H), la frecuencia de registro propia del instrumento utilizado para realizar las mediciones (f_{regis}), la frecuencia de medición simulada para el ADCP (f) y la cantidad de ciclos que se desea realizar. Los ciclos son conjuntos de datos para una misma configuración de muestreo. Se realizan varios ciclos con el objetivo de estimar un valor medio debido a que $RME[Q]$ es una variable aleatoria.

Como tercer paso se procede a inicializar los contadores necesarios en la programación del algoritmo (Figura 46 (3)) y luego se procede a calcular el paso en el tiempo que se define como la relación entre la frecuencia de registro del instrumento utilizado en las mediciones y la frecuencia simulada (Figura 46 (4)) pudiendo elegir entre frecuencias de 1 o 2 Hz. Los contadores no es necesario modificarlos en caso utilizar el programa para analizar una matriz de velocidades obtenida en una medición diferente a la utilizada en el presente trabajo.

Una vez que el programa tiene ingresados estos datos, se puede proceder a iniciar el cálculo de los caudales y errores máximos relativos. Como primer caso a analizar, se plantea el caso en que el usuario ingresase como frecuencia simulada $f=0$ (Figura 46 (5)). En este caso El ADCP no mediría datos por lo que el programa termina sin realizar ningún cálculo más. Se programó este caso ya que en caso de no hacerlo, si el usuario ingresara frecuencia simulada cero, el programa devolvería un mensaje de "Error" a la hora de realizar los cálculos.

```

1      %Victoria Flores Nieto
2
3      %(1)Se carga la Matriz de Velocidades
4      clear all
5      load matrizvelocidades
6
7      %(2)Datos de entrada
8      ciclos=30; % Cantidad de ciclos
9      fregis=10; % Frecuencia de datos registrados Hz('Ingrese Frecuencia en Hz')
10     f=0; % Frecuencia de medicion simulada('Ingrese Frecuencia en Hz (1 o 2)')
11     % Datos Hidráulicos
12     H=0.097; % Altura del canal
13     Qreal=0.014603417; % Caudal real
14     deltax= 0.0152; % Distancia entre puntos de registro
15
16     %(3)Contadores
17     tr=1; % Número de ciclo
18     i=1; % Inicialiador de tiempo
19     t=1;% Número de transeca
20     np=1; % Número de punto
21     incrementolag=39; % Desfase en el tiempo entre la primer transeca de cada ciclo
22     lag=0; % Inicialiador de desfase en el tiempo
23
24     %(4)Calculo del paso del tiempo
25     step=round(fregis/f);
26
27     %(5)Caso en que se ingrese como dato de frecuencia simulada "0"
28     if f==0
29         step=0;
30         t=1;
31     else

```

Figura 46: Inicio del Programa creado en la plataforma Matlab.

En caso de que la frecuencia de simulación ingresada sea diferente de cero se procede a calcular la matriz de caudales (Figura 48 (6)). En este caso se realizaron 30 ciclos en los cuales se analizaron 12 transectas para 6 velocidades del bote diferentes, por lo tanto se trata de una matriz 3D de (12x6x30) (Figura 47). Las transectas que se miden van variando de ciclo a ciclo y la distancia entre ellas es de 39 imágenes (4 segundos aproximadamente). Por otro lado, se utilizaron 6 velocidades del bote distintas, que están expresadas en función de la cantidad de puntos que el ADCP llega a muestrear según su velocidad sea mayor o menor. La menor velocidad que se pudo simular es aquella en que el instrumento llega a medir las velocidades en 65 puntos de la transecta ya que estos

eran la cantidad de puntos totales que poseía la matriz de velocidades obtenida con PTV. Además de esta velocidad, se simuló el paso del ADCP con otras más elevadas en las cuales el instrumento registraba datos en 33, 17, 9, 5 y 3 puntos de la sección transversal.

Para obtener el caudal de cada transecta de la matriz 3D, se programó utilizando ciclos (for) en los cuales para cada conjunto de datos (ciclo), para cada velocidad, y cada transecta, se calcula un vector compuesto por los puntos en los que se registran datos, luego se procede a calcular un vector compuesto por las velocidades en cada punto de la transecta y con esta información se procede a calcular el caudal de cada transecta. Este estará compuesto por la suma de los caudales en los puntos centrales, más el caudal en cada punto lateral de la sección transversal (Figura 50). En la Figura 48 se puede observar el algoritmo del programa. Se puede notar que se diferenció entre el caso en que la velocidad simulada es de 65 puntos de los casos restantes. Esto se debe a que como este es el número máximo de puntos en los cuales se disponen datos, si se utilizase frecuencia $f=2$ y velocidad=65 puntos, el programa daría un mensaje de error ya que no encontraría más datos con los cuales realizar las operaciones. Para prevenir la aparición de este error y lograr un correcto funcionamiento del programa se realizó un pequeño cambio en el algoritmo en el caso que la velocidad simulada sea mayor. Para mejor comprensión, en la Figura 49 se puede ver un diagrama del funcionamiento del programa para realizar el cálculo de la matriz de caudales.

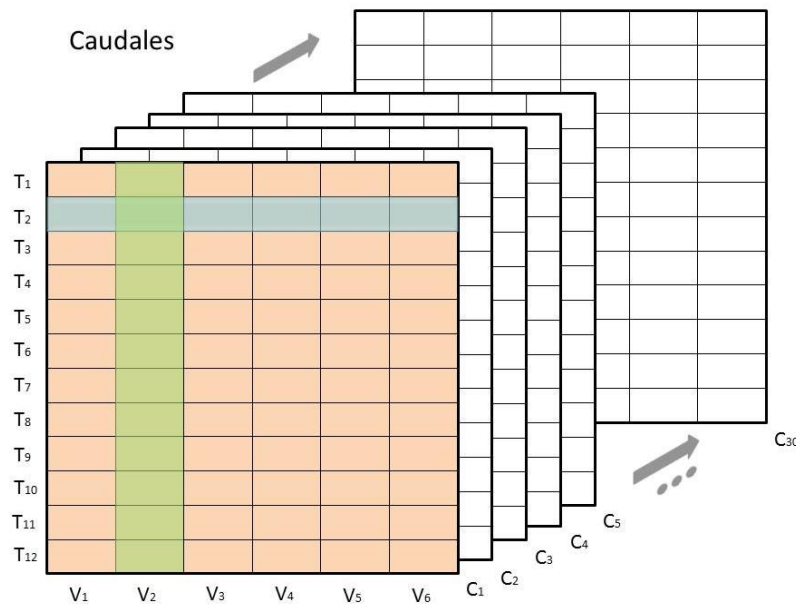


Figura 47: Matriz 3D de caudales que calcula en programa

```

31 - else
32 -   %(6)Caso con frecuencia simulada diferente de cero "0"
33 -   for cic=1:ciclos
34 -     tr=1;
35 -     i=1;
36 -     t=1;
37 -     np=1;
38 -     for Np=[65 33 17 9 5 3];%Velocidades simuladas(expresadas en cant. de puntos)
39 -       Npp=(Np*f)-(f-1);
40 -       tr=1;
41 -       for t=[74 84 94 104 114 124 134 144 154 164 174 184]+lag; % Transectas analizadas
42 -         i=1;
43 -         p=1;
44 -         delta=0;
45 -         p1=1;
46 -         delta1=0;
47 -         if Np<65 % Caso en que la velocidad simulada es menor a la velocidad de muestreo
48 -           clear Nxx;
49 -           clear nxp;
50 -           for oo=1:Npp % Cálculo del vector compuesto por los puntos analizados
51 -             Nxx=p1+delta1;
52 -             nxp(oo)=Nxx;
53 -             delta=64/(Np-1);
54 -             delta1=delta/f;
55 -             p1=Nxx;
56 -           end
57 -           clear v;
58 -           clear ts;
59 -           v(1:Npp)=0;
60 -           ts(1:Npp)=0;
61 -           while (i<=length(nxp)) % Cálculo del vector velocidad
62 -             v(i)=Resultados(nxp(i),t);
63 -             ts(i)=t;
64 -             i=i+1;
65 -             t=t+step;
66 -             x=nxp*deltax;
67 -           end
68 -           % Calculo del caudal en cada punto de la transecta
69 -           QNP=0;
70 -           for j=1:Npp-1
71 -             dist=x(j+1)-x(j);
72 -             QNP=QNP+((v(j)+v(j+1))/2)*dist*H; % Caudal en puntos centrales de la transecta
73 -           end
74 -           QL1=v(1)/2*deltax*H; % Caudales en puntos laterales de la transecta
75 -           QL2=v(j+1)/2*deltax*H;
76 -           QF(tr,np,cic)=QNP+QL1+QL2; % Calculo de la matriz 3D de caudales
77 -         else % Caso en la velocidad simulada es igual a la velocidad de muestreo
78 -           clear Nx;
79 -           clear nx;
80 -           for o=1:Np % Cálculo del vector compuesto por los puntos analizados
81 -             Nx=p+delta;
82 -             nx(o)=Nx;
83 -             delta=64/(Np-1);
84 -             p=Nx;
85 -           end
86 -           clear v;
87 -           clear ts;
88 -           v(1:Np)=0;
89 -           ts(1:Np)=0;
90 -           while (i<=length(nx)) % Cálculo del vector velocidad
91 -             v(i)=Resultados(nx(i),t);
92 -             ts(i)=t;
93 -             i=i+1;
94 -             t=t+step;
95 -             x=nx*deltax;
96 -           end
97 -           % Calculo del caudal en cada punto de la transecta
98 -           QNP=0;
99 -           for j=1:Np-1
100 -             dist=x(j+1)-x(j);
101 -             QNP=QNP+((v(j)+v(j+1))/2)*dist*H; % Caudal en puntos centrales de la transecta
102 -           end
103 -         end

```

```

104 -         QL1=v(1)/2*deltax*H;% Caudales en puntos laterales de la transecta
105 -         QL2=v(j+1)/2*deltax*H;
106 -         QF(tr,np,cic)=QNP+QL1+QL2; % Calculo de la matriz 3D de caudales
107 -     end
108 -
109 -     tr=tr+1; % Paso a la siguiente transecta
110 - end
111 - np=np+1; % Paso a la siguiente velocidad simulada
112 - end
113 - lag=lag + incrementolag; % Desfase entre las transectas analizadas en cada ciclo
114 - end
115 -
116 -

```

Figura 48: Algoritmo para el cálculo de la matriz de caudales 3D

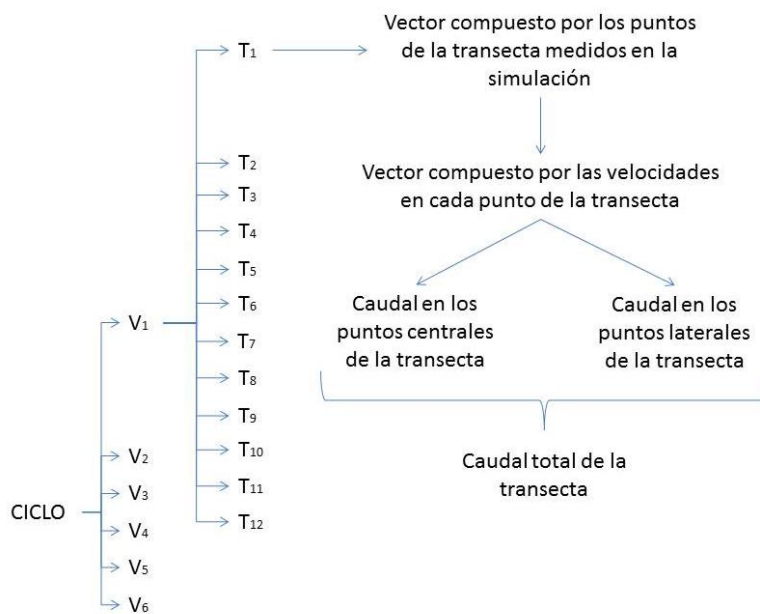


Figura 49: Diagrama de funcionamiento del programa para el cálculo de la matriz de caudales

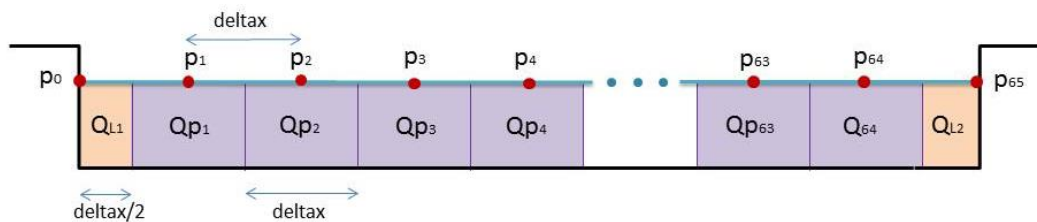


Figura 50: Caudal total de la transecta compuesto por suma de los caudales en los puntos centrales, más el caudal en cada punto lateral de la sección transversal.

Ya con la matriz de caudales calculada, se procede a calcular la matriz de errores máximos relativos $RME[Q]$ (Figura 51 y Figura 52). El error máximo relativo de cada

caudal se calcula en función del caudal real obtenido con PTV (ingresado como dato de entrada del programa), a través de la fórmula:

$$RME[Q] = \frac{|QF - Q_{real}|}{Q_{real}} \quad (32).$$

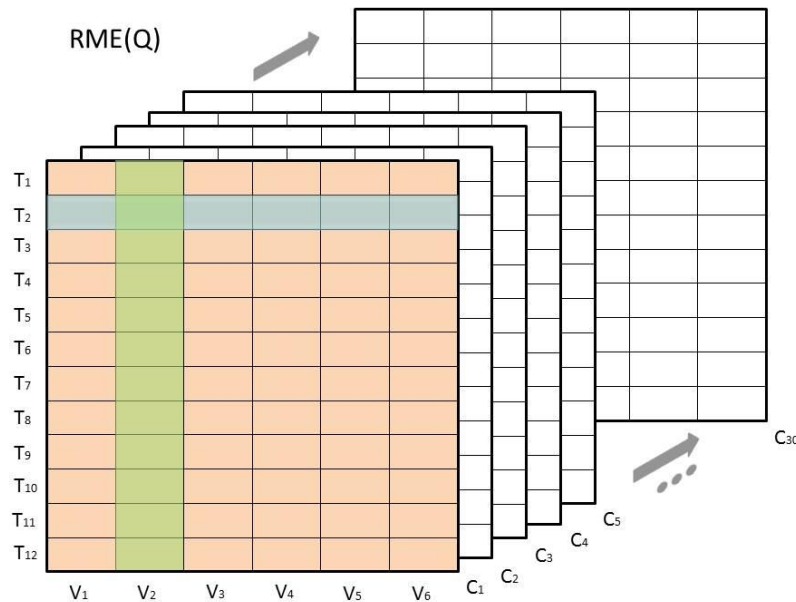


Figura 51: Matriz (3D) de errores máximos relativos.

```

117   % (7) Cálculo de la matriz con los errores máximos relativos
118 -   RMEQ=(QF-Qreal)/Qreal;
119 -   RMEQ=abs(RMEQ);
120
121
    
```

Figura 52: Algoritmo para el cálculo de la matriz de errores máximos relativos $RME[Q]$.

A partir de esta matriz, se obtiene el máximo $RME[Q]$ para cada velocidad en cada ciclo y se conforma un vector con ellos (Figura 53 y Figura 54). Paso seguido se crea una matriz con estos vectores, quedando así definida una matriz (2D) que posee los máximos $RME[Q]$ para cada una de las velocidades en cada uno de los ciclos. Por último para poder calcular la incertidumbre en la medición al mover el bote a través del flujo con una determinada velocidad, se obtiene un vector en el cual se encuentra el error relativo máximo absoluto para cada una de las velocidades (Figura 53 y Figura 55).

```

122 % (8) Obtención del máximo RMEQ (para cada velocidad en cada ciclo)
123 l=np-1;
124 for m=1:ciclos
125     MM=RMEQ(:, :, m); % Matriz (3D) de los errores máximos relativos
126     for vbb=1:l
127         MMAX(vbb)=max (MM(:, vbb)); % Vector (para c/ciclo) con los máximos RMEQ para c/velocidad
128         vbb=vbb+1;
129     end
130     MAXIMOS(1:l, m)=MMAX; % Matriz (2D) del máximo RMEQ (para cada velocidad en cada ciclo)
131 end
132 FINAL=mean (MAXIMOS, 2); % Incertidumbre asociada a cada caso de velocidad
    
```

Figura 53: Algoritmo para el cálculo de la incertidumbre

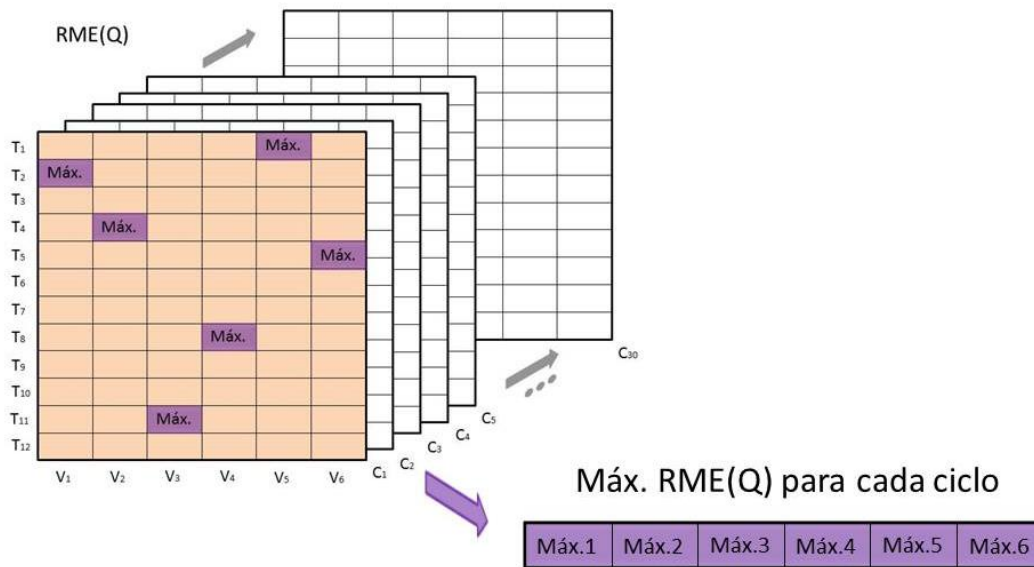


Figura 54: Vector (para cada ciclo) con los máximos valores de $RME[Q]$ de cada velocidad

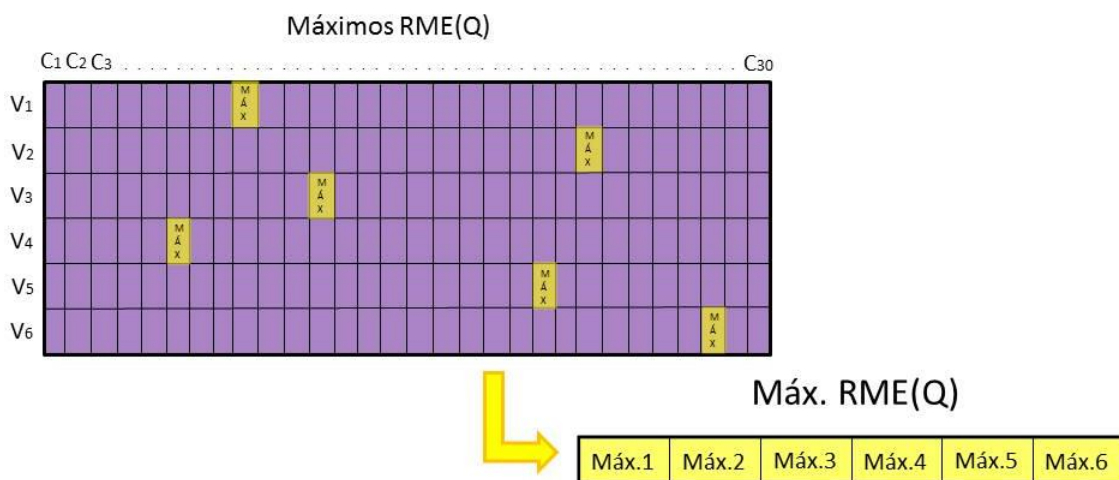


Figura 55: Matriz con los máximos valores de $RME[Q]$ y obtención del vector con el error máximo relativo absoluto para cada una de las velocidades.

El programa además otorga la posibilidad de simular el paso del ADCP desde una plataforma móvil realizando varias transectas, promediando luego los valores medidos para obtener el caudal (Figura 56 (9)) y su correspondiente $RME[Q]$ en cada caso (Figura 56 (10)). El número de transectas realizadas en la simulación "ntr", es ingresado por el usuario, por lo que puede variarlo según los datos que necesite obtener para su estudio.

Una vez que se ha ingresado la cantidad de transectas a promediar, el programa genera una nueva matriz (3D) de caudales. Por ejemplo si en cada uno de los ciclos, para cada velocidad, se muestreaban 12 transectas y se desea conocer los resultados al promediar 8 transectas, se obtendrán 5 caudales promedio. El primero se calculará a partir de los caudales de las transectas 1 a la 8, el segundo con los correspondientes a los de las transectas 2 a la 9 y así sucesivamente hasta el quinto caudal que se obtendrá a partir de los correspondientes a las transectas 5 a la 12 (Figura 57). Así se obtienen 5 caudales promedios para cada velocidad en cada ciclo y se forma la nueva matriz de caudales (5x6x30) (Figura 58). A los valores de esta matriz, se les aplica la fórmula (32) (Figura 56 (10)) y se obtiene la matriz de errores máximos relativos de los caudales promedio (Figura 58).

```

133
134
135 % (9) Caso en que se realizan varias transectas y se promedian
136 ntr=8; % Dato a ingresar por el usuario
137 trx=tr-ntr; % Cantidad de promedios que se pueden calcular
138
139 for cic=1:ciclos % Cálculo para cada ciclo
140     for np=1:l % Cálculo para cada velocidad simulada
141         for tri=1:trx % Cálculo para cada caso promediado
142             i=1;
143             QFNti=QF(tri,np,cic); % Matriz de caudales
144             deltaqf=0;
145             while (i<=ntr)
146                 sumQFNti=QFNti+deltaqf;
147                 if (i<ntr)
148                     deltaqf=QF(tri+i,np,cic);
149                 else
150                     end
151                 QFNti=sumQFNti; % Suma de los caudales de "ntr" transectas
152                 i=i+1;
153             end
154             QFNti(tri,np,cic)=QFNti/ntr; % Matriz de caudales promediando "ntr" transectas
155         end
156     end
157 end
158
159
160 % (10) Cálculo de la matriz con los RMEQ en el caso promediar varios caudales
161 RMEQNTi=(QFNti-Qreal)/Qreal;
162 RMEQNTi=abs(RMEQNTi);
163
164

```

Figura 56: Algoritmo del programa para el cálculo de la matriz de caudales promediados (9) y para la matriz de sus correspondientes $RME[Q]$

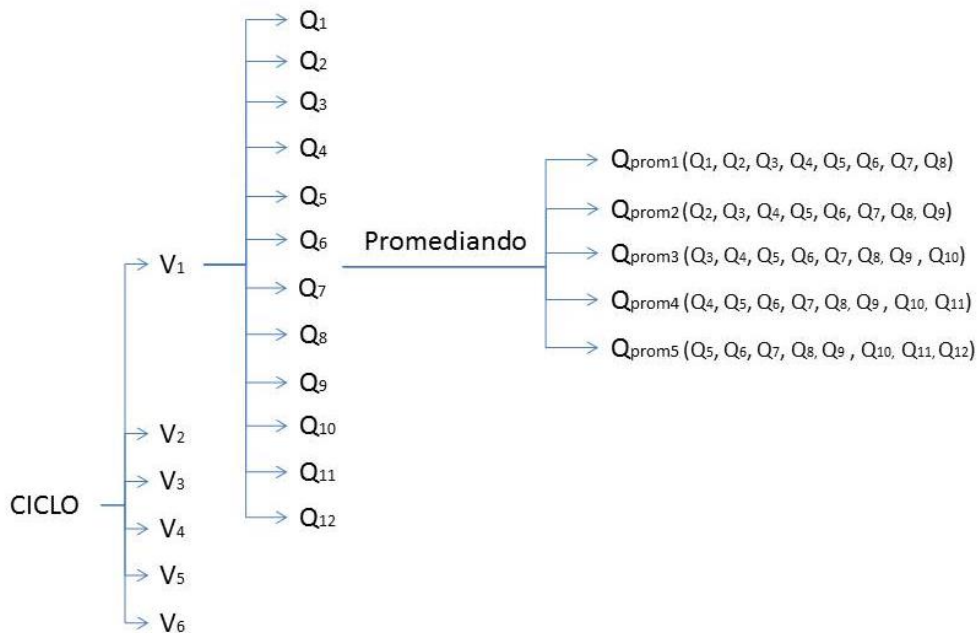


Figura 57: Diagrama de funcionamiento del programa para el cálculo de los caudales promedio para el caso en que se simula la medición de 8 transectas.

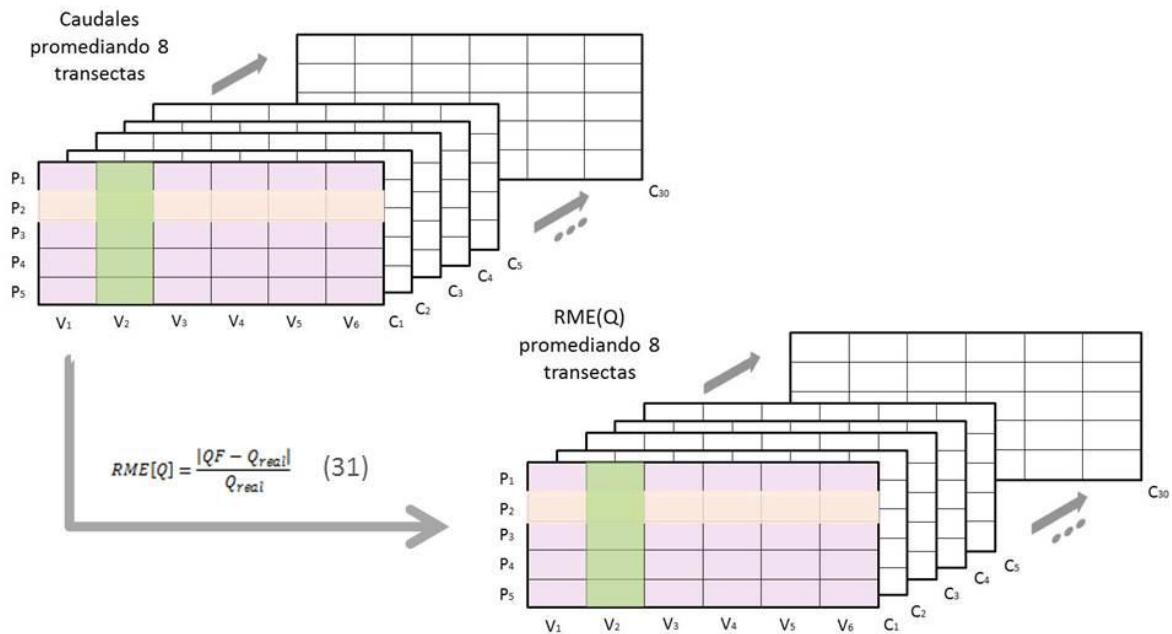


Figura 58: Matriz (3D) de caudales obtenidos promediando los caudales de 8 transectas y su correspondiente matriz (3D) de $RME[Q]$.

Por último se procede a calcular las incertidumbres asociadas a cada velocidad en el caso de medir “ntr” transectas (Figura 59 (11)). Para ello el programa obtiene a partir de la matriz 3D de $RME[Q]$ correspondiente a los caudales promediados, un vector para cada ciclo compuesto por los valores máximos de $RME[Q]$ para cada velocidad (Figura 60). A partir de estos vectores se genera una matriz 2D que contiene los valores máximos para cada velocidad en cada ciclo. Finalmente, a partir de esta matriz se obtiene un vector compuesto por el error máximo absoluto para cada velocidad (Figura 61).

```

165 % (11) Obtención del máximo RMEQ para cada caso de velocidad (en cada ciclo)
166 for m=1:ciclos
167     MMi=RMEQNTi(:,:,m); % Matriz (3D) de RMEQ para los caudales promediados
168     for vbb=1:l
169         MMAXi(vbb)=max(MMi(:,vbb)); % Vector (para c/ciclo) con los máximos RMEQ para c/velocidad
170         vbb=vbb+1;
171     end
172     MAXIMOSi(1:l,m)=MMAXi; % Matriz (2D) del máximo RMEQ (para cada velocidad en cada ciclo)
173 end
174 FINALi=mean(MAXIMOSi,2); % Incertidumbre asociada a cada caso de velocidad
175
176 end
    
```

Figura 59: Algoritmo para el cálculo de la incertidumbre para el caso en que se promedian los caudales de varias transectas

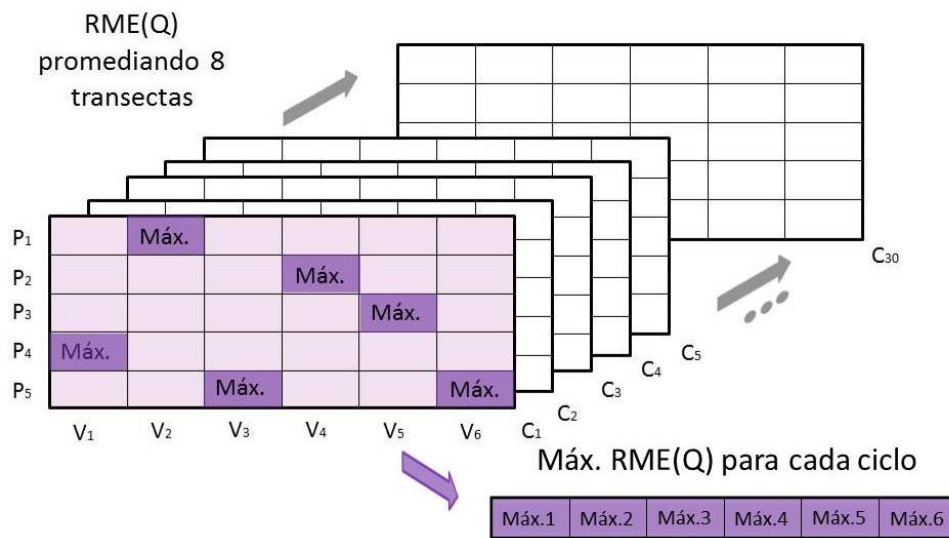


Figura 60: Vector (para cada ciclo) con los máximos valores de $RME[Q]$ de cada velocidad.

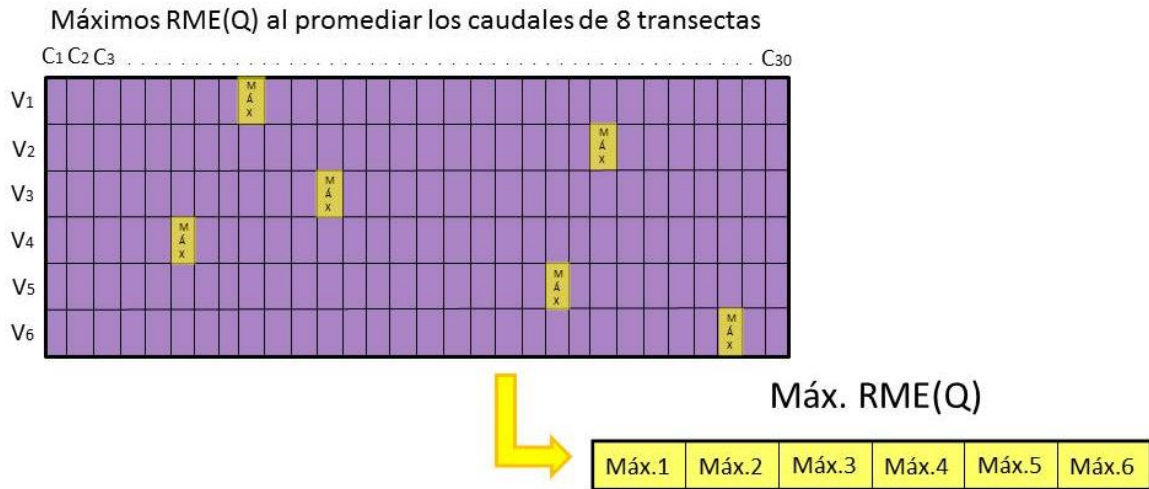


Figura 61: Matriz con los máximos valores de $RME[Q]$ y obtención del vector con el error máximo relativo absoluto para cada una de las velocidades.

Es importante aclarar que los resultados arrojados por este programa fueron verificados realizando los calculos manualmente en Excel para diferentes configuraciones de muestreo.