

OPTIMIZACIÓN DE ESTRATEGIAS DE MUESTREO DE TÉCNICAS DE MEDICIÓN HIDROACÚSTICAS A PARTIR DEL USO DE SIMULACIONES NUMÉRICAS DIRECTAS

Leticia Tarrab, Vicente G. Gil Montero, Carlos M. García

Laboratorio de Hidráulica, FCEFyN, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Filloy s/n, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina. ltarrab@efn.uncor.edu, <http://www.efn.uncor.edu/investigacion/DETU/>

Keywords: Turbulencia, velocímetros acústicos Doppler (ADV), perfiladores de corriente acústicos Doppler (ADCP), Simulación numérica directa (DNS).

Abstract. En este trabajo se presentan relaciones adimensionales elaboradas mediante el análisis de un campo de flujo turbulento tridimensional de alta resolución espacial y temporal obtenido de una simulación numérica directa (DNS por sus siglas en inglés), con el fin de optimizar las estrategias de muestreo de técnicas de medición hidroacústicas para determinar en forma precisa el caudal y parámetros representativos de la turbulencia (como velocidades media, fluctuaciones turbulentas, esfuerzos de Reynolds, etc). El campo de velocidades del flujo turbulento simulado con DNS fue validado con observaciones experimentales de laboratorio publicadas previamente en la literatura y luego fue muestreado simulando la metodología de registro de un perfilador de corriente acústico (ADCP) y de un velocímetros acústico Doppler (ADV) para diferentes condiciones de flujo y adoptando diferentes estrategias espaciales y temporales de muestreo. Los resultados muestran en el caso de mediciones de caudal realizadas con ADCP, que los errores aleatorios (incertidumbre) debidos a la turbulencia del flujo son relevantes en ríos poco profundos muestreados a grandes velocidades del bote. Sin embargo, estos errores no son significativos si se realizan al menos cuatro transectas. En lo que respecta a las mediciones con ADV, se observó que en la región cercana al fondo las mediciones del flujo con este instrumento presentan un sesgo negativo relevante en los parámetros de la turbulencia debido al efecto producido por el promediado espacial en el volumen de medición.

1 INTRODUCCION

La tecnología hidroacústica Doppler, en particular los velocímetros acústicos Doppler (ADV) y los perfiladores de corriente acústicos Doppler (ADCP), son usados mundialmente para caracterizar experimentalmente flujos turbulentos en laboratorio y campo. A su simplicidad y bajo costo relativo se le adiciona el hecho de proveer una alta resolución temporal y espacial del campo de flujo, adquiriendo información que es no es posible obtener por medio de métodos mecánicos convencionales.

El instrumento acústico utilizado comúnmente en el caso de mediciones en campo, es el perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP, por sus siglas en inglés). Este equipo es de aplicación en cuerpos de agua de gran escala, tales como ríos, estuarios y canales. Permite la medición precisa de caudales y la caracterización del flujo medio y de la estructura de la turbulencia (Simpson, 2001; Oberg et al., 2005) contribuyendo a una mejor caracterización de la dinámica fluvial y los procesos de hidrodinámicos asociados.

El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) utiliza en forma exhaustiva esta tecnología desde la década del 90 y ha desarrollado a través de la Oficina de Agua Superficial (OSW) memorándums y reportes técnicos a los fines de estandarizar y optimizar el uso de los ADCP en la medición de los caudales. Las guías desarrollada por la OSW (Oberg et al., 2005; Mueller and Wagner, 2006) incluye recomendaciones que aseguran una buena calidad en los datos obtenidos y permiten minimizar los errores en las mediciones del caudal.

Varios factores afectan la incertidumbre en las mediciones de caudal utilizando ADCP, tales como la ubicación de zona de medición, la configuración de registro del instrumento, la configuración interna del instrumento para el pre-procesamiento de los datos, niveles de ruido, y las estrategias espaciales y temporales de la medición. En los casos de mediciones desde plataformas móviles (como por ejemplo botes), la estrategia de muestreo espacial y temporal actualmente recomendada por el USGS para la determinación del caudal medio en ríos y canales consiste en realizar con la embarcación un mínimo de cuatro transectas (cruces) en pares recíprocos. El caudal es calculado como el promedio de los caudales medidos en las cuatro transectas. A pesar de que el uso de esta estrategia es una práctica común en varios países, no existen evidencias científicas que muestren que cuatro transectas es una aproximación óptima para mediciones del caudal con ADCP en ríos con diferentes condiciones de flujo (Oberg and Mueller, 2007). Mediciones recientes de campo (Oberg and Mueller 2007) sugieren que la duración total de la medición (denominada tiempo de exposición y relacionada a la velocidad del bote) es más significativa en la reducción de la incertidumbre de la medición del flujo realizada con ADCP que el número de transectas realizadas. Siguiendo la misma línea de razonamiento y basados en estudios de campo, Czuba and Oberg (2008) proponen que el tiempo es un factor crítico en la reducción de la incertidumbre en la medición.

El instrumento acústico utilizado para el caso de mediciones en laboratorio es el ADV (García et al., 2005; Precht et al., 2006), el cual a diferencia del ADCP (el cual registra patrones de flujo en un perfil o columna de agua) mide la velocidad del flujo en un volumen de medición muy pequeño (variando desde 0.09 a 2 cm³ dependiendo del instrumento seleccionado) y a frecuencias relativamente altas (hasta 200 Hz). Existen antecedentes que prueban que los velocímetros acústicos Doppler reportan en forma precisa valores medios de la velocidad del agua en las tres direcciones del flujo incluso en condiciones de bajas velocidades del agua (Lohrmann et al. 1994). La mayoría de las investigaciones relacionadas con la capacidad de los velocímetros acústicos Doppler para resolver la turbulencia del flujo

se han centrado en la definición del nivel del ruido de la señal y en la forma de removerlo (Lohrmann et al., 1994; Anderson and Lohrmann 1995; Lane et al. 1998; Nikora and Goring, 1998; Voulgaris and Trowbridge, 1998; Lemmin and Lhermitte, 1999; McLelland and Nicholas, 2000). Sin embargo, son escasos los antecedentes en la literatura donde se evalúa el sesgo sobre los parámetros de la turbulencia (momentos, espectros, funciones de autocorrelación, etc.) generado por los efectos de filtrado debido a las estrategias de muestreo típicas de este instrumento incluyendo el promediado espacial (Voulgaris and Trowbridge 1998) y temporal (Garcia et al. 2005).

El análisis sistemático de errores (incluyendo sesgo e incertidumbre) en la caracterización de flujos turbulentos debido a la configuración espacial y temporal de muestreo con técnicas hidroacústicas requiere una alta resolución espacial y temporal del flujo (Garcia et al., 2005), lo cual es difícil de alcanzar con mediciones de campo y de laboratorio. La simulación directa numérica (DNS) es una herramienta computacional ideal para generar este tipo de datos, ya que resuelve todas las escalas turbulentas presentes en el flujo sin necesidad de adoptar esquemas de cierre de la turbulencia. A pesar de que DNS difícilmente se puede aplicar para simular condiciones de flujo observados en campo (debido a limitaciones asociadas al costo computacional de esta técnica de simulación), los niveles de turbulencia alcanzados para números de Reynolds moderados en donde es factible aplicar DNS, son representativos de flujos turbulentos desarrollados. En base a la similitud del número de Reynolds los resultados pueden ser extrapolados con cierto criterio a números de Reynolds mayores.

El objetivo del presente trabajo es optimizar, mediante el análisis del campo de flujo turbulento tridimensional generado con DNS, las estrategias de muestreo de técnicas de medición hidroacústicas (ADV y ADCP) con el fin de determinar en forma precisa el caudal y parámetros representativos de la turbulencia (como velocidades media, fluctuaciones turbulentas, esfuerzos de Reynolds, etc). Para ello se realizó una simulación con DNS para un número de Reynolds de $Re = 9164$ la cual fue validada con resultados experimentales disponibles en la literatura (Nezu y Nakagawa, 1993). Luego se muestrearon campos de flujo sintéticos obtenidos de la modelación numérica simulando el uso de los instrumentos acústicos Doppler (ADV y ADCP) para diferentes condiciones de flujo y adoptando diferentes estrategias espaciales y temporales de muestreo. Para el caso de las mediciones con ADCP se cuantificaron las incertidumbres máximas en la medición de caudales y se evaluaron los parámetros de una ecuación que permite la estimación de las mismas en función de parámetros adimensionales. Con respecto a las mediciones con ADV se analizó el sesgo en los valores representativos de la turbulencia producido por el promediado espacial realizado por el instrumento

2 MODELO MATEMÁTICO Y NUMÉRICO

Se realizaron simulaciones numéricas directas para el flujo en un canal horizontal en donde el flujo es impulsado por un gradiente de presión media uniforme en la dirección del flujo (x). Las ecuaciones adimensionales que gobiernan el flujo son:

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} = \mathbf{G} - \nabla p + \frac{1}{Re^*} \nabla^2 \mathbf{V} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (2)$$

donde $\mathbf{V}=(u,v,w)$ es el vector de velocidad adimensional del flujo, p es la presión dinámica

adimensional y $\mathbf{G} = (1,0,0)$ es el valor negativo del gradiente de presión media adimensional. Las variables adimensionales se definen a partir de las siguientes escalas: la escala de velocidad es la velocidad de corte, $u^* = (\tau_w/\rho)^{1/2}$, donde τ_w es el esfuerzo de corte en el fondo y ρ es la densidad del fluido; la escala de longitud es la altura del canal H ; y las escalas que se derivan de ellas son: $T=H/u^*$ para el tiempo, y $P=\rho u^{*2}$ para la presión. El número adimensional en la ecuación [15] es el número de Reynolds definido la ecuación [8] y para este trabajo $Re^*=509$, lo que resulta en un número de Reynolds global ($Re = VH/\nu$) = 9164 (asumiendo una relación $V/u^* = 18$).

Las ecuaciones que gobiernan el flujo se resuelven empleando un código pseudoespectral (Canuto, et al., 1988). Este código utiliza expansiones de Fourier para las variables del flujo en las direcciones horizontales (x e y , las cuales se refieren a la dirección del flujo y a la dirección transversal al flujo, respectivamente). En la dirección no homogénea vertical el código utiliza expansiones de Chebyshev con puntos de cuadratura de Gauss-Lobatto. La ecuación de momento y la condición de incompresibilidad se resuelven con una estrategia de pasos fraccionados (Brown et al., 2001). En primera instancia, se resuelve una ecuación de advección-difusión sin tener en cuenta la presión para calcular un campo de velocidades intermedio. Luego se resuelve una ecuación de Poisson para calcular el campo de presiones, y finalmente se realiza un paso de corrección de presión a los fines de obtener el campo flujo incompresible final. La integración temporal de las ecuaciones se realiza a través de un esquema compuesto Runge-Kutta de tercer orden y Crank-Nicolson. Los detalles de la implementación de este esquema numérico se pueden ver en Cortese and Balachandar (1995). La validación del código se encuentra en Cantero et al. (2007a) y Cantero et al. (2007b).

El tamaño del dominio computacional queda definido por: largo del canal $L_x=4\pi H$; ancho $L_y=4/3\pi H$, y altura $L_z=H$. La resolución de la grilla usada es $N_x=256$; $N_y=256$ y $N_z=129$ (donde N_i es el número de nodos de la grilla en la dirección i) y los términos no lineales son calculados en una grilla $3N_x/2 \times 3N_y/2 \times N_z$ a los fines de prevenir errores por "aliasing". La pared del fondo representa un contorno no deslizante para el flujo y la pared superior es un contorno de deslizamiento libre. Las condiciones de borde adimensionales utilizadas son:

$$\mathbf{V} = 0 \quad \text{at } z = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \quad \text{and } w = 0 \quad \text{at } z = 1 \quad (4)$$

El tiempo integral adimensional utilizado en este trabajo es $T_i u^*/H=50$ luego de que el flujo haya alcanzado estadísticamente el estado estacionario.

Los datos simulados con DNS son validados comparando perfiles verticales de parámetros de la turbulencia para un flujo en un canal abierto con resultados experimentales (Nezu, 1977 and Nezu and Nakagawa, 1993) y curvas semi-teóricas (Nezu and Rodi, 1986, y Nezu and Nakagawa, 1993). Las variables medias del flujo fueron obtenidas promediando en el tiempo los valores instantáneos en cada localización.

La Figura 1 muestra los perfiles verticales de la velocidad adimensional media en la dirección del flujo ($u^+ = u/u_*$). Esta Figura también incluye la ley de la pared para flujos en canales abiertos (Nezu and Nakagawa, 1993):

$$u^+ = \frac{u}{u_*} = z^+ = \frac{z u_*}{\nu} \quad (5)$$

el cual es validado para la subcapa viscosa ($z^+ < 5$), y

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(z^+) + A \quad (6)$$

la cual es conocida como la ley logarítmica que es inherentemente válida en la región de la pared ($z/H < 0.2$). Nezu and Rodi (1986) proponen que para un flujo en canal abierto con fondo liso, la constante de von Karman κ , y la constante integral A presentan los valores universales de 0.41 y 5.29, respectivamente.

Las desviaciones de la ley logarítmica que se observan para $z/H > 0.2$ fueron consideradas por Nezu and Nakagawa (1993) agregando una función de estela. Se observa un buen ajuste entre los datos simulados con DNS y las distribuciones de velocidad para cada región.

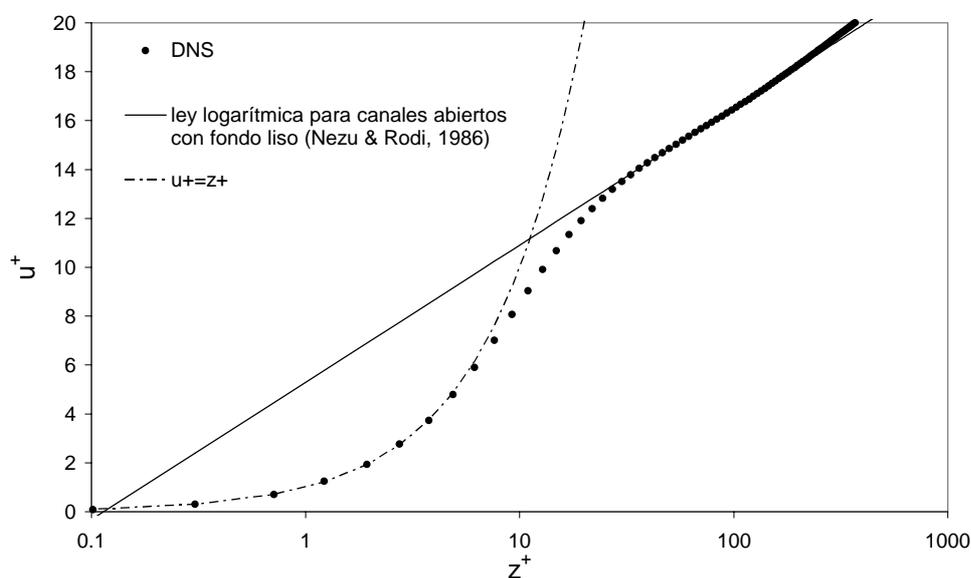


Figura 1: Perfil vertical de la velocidad adimensional media en la dirección del flujo ($u^+ = u/u^*$ y $z^+ = zu^*/\nu$)

Las Figuras 2, 3 y 4 muestran los perfiles verticales adimensionales de la raíz media cuadrática de las fluctuaciones de la velocidad para la componente en la dirección del flujo (u'), en la dirección transversal (v') y la dirección vertical (w') respectivamente calculadas con los datos obtenidos de la simulación con DNS. Además, estas figuras incluyen datos experimentales medidos en trabajos de investigación previos para canales abiertos con fondo liso (Nezu, 1977) y relaciones semi-teóricas (ecuaciones (7), (8) y (9)). Las relaciones semi-teóricas para la raíz media cuadrática de las fluctuaciones de la velocidad adimensionalizadas con la velocidad de corte fueron presentadas por Nezu and Nakagawa (1993), las cuales son válidas para la región en donde la energía turbulenta se encuentra en equilibrio (la tasa de producción de energía turbulenta es igual a la tasa de disipación turbulenta):

$$\frac{u'}{u_*} = D_u \exp\left(-\frac{z}{H}\right) \quad (7)$$

$$\frac{v'}{u_*} = D_v \exp\left(-\frac{z}{H}\right) \quad (8)$$

$$\frac{w'}{u_*} = D_w \exp\left(-\frac{z}{H}\right) \quad (9)$$

donde D_u , D_v , y D_w son constantes empíricas. Las mediciones con hilo caliente presentadas en Nezu (1977) permitieron evaluar las estas constantes empíricas como: $D_u = 2.30$, $D_v = 1.63$, y $D_w = 1.27$, las cuales demostraron ser independientes del número de Reynolds y del número de Froude.

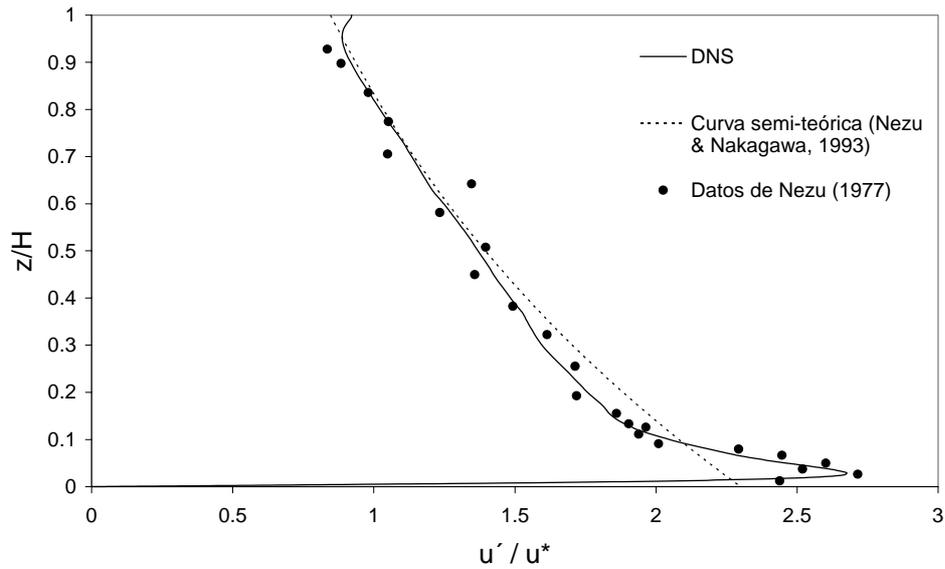


Figura 2: Raíz media cuadrática adimensional de las fluctuaciones de la velocidad en la dirección del flujo

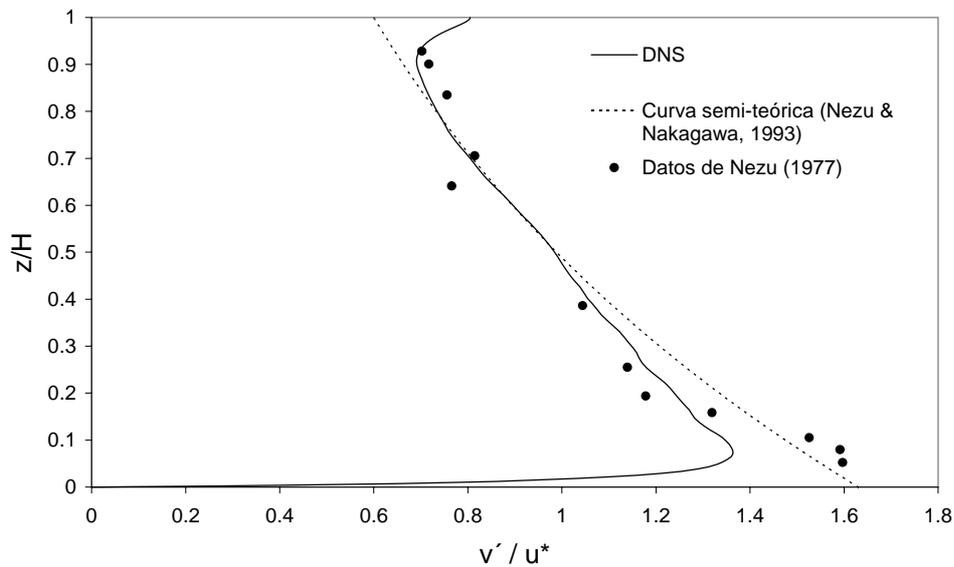


Figura 3: Raíz media cuadrática adimensional de las fluctuaciones de la velocidad en la dirección transversal al flujo

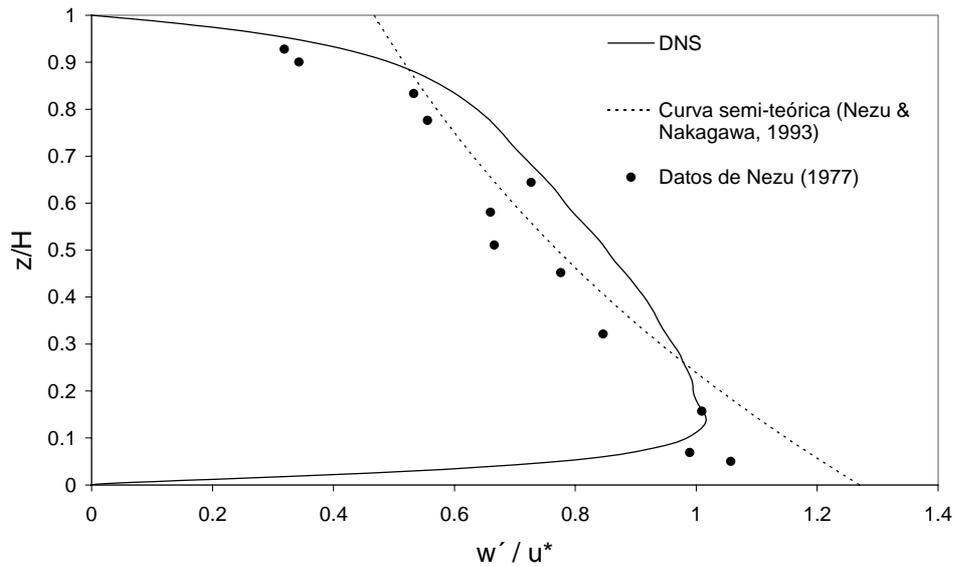


Figura 4: Raíz media cuadrática adimensional de las fluctuaciones de la velocidad en la dirección vertical

La Figura 5 muestra una comparación entre los perfiles verticales del flujo de la energía cinética turbulenta (TKE) calculada con los datos de la simulación con DNS y la relación semi-teórica propuesta por Nezu and Nakagawa (1993) para la región en donde la energía turbulenta se encuentra en equilibrio:

$$\frac{TKE}{u_*^2} = D \exp\left(-2 \frac{z}{H}\right) \tag{10}$$

Los datos obtenidos con hilo caliente publicados en Nezu (1977) permitieron evaluar la constante empírica como $D = 4.78$.

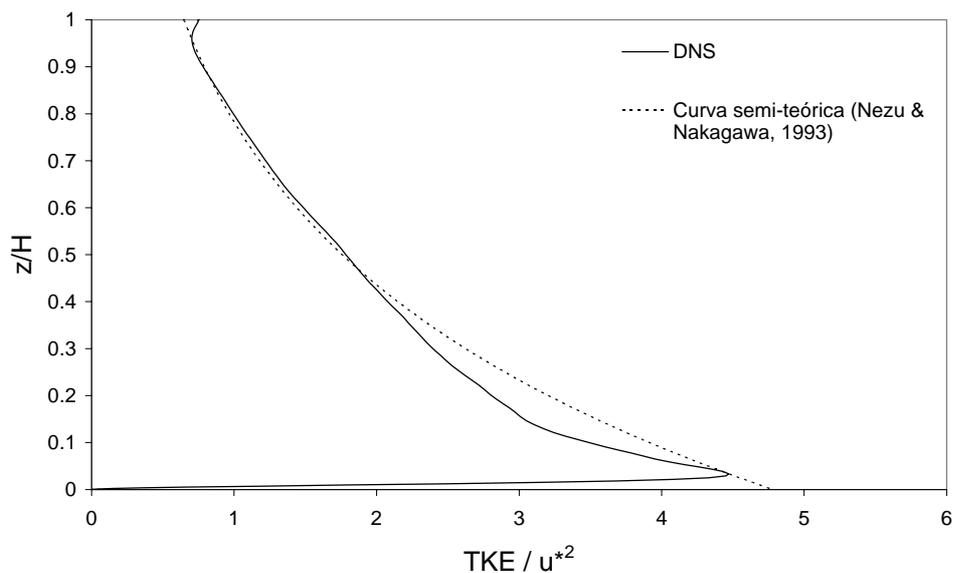


Figura 5: Energía cinética turbulenta adimensional

3 OPTIMIZACION DE ESTRATEGIAS DE MUESTREO CON ADCP

Los errores relativos en las mediciones de caudales con ADCP (ε_Q) pueden ser cuantificados usando información relacionada a las condiciones de flujo y a la metodología experimental seleccionada. Las condiciones de flujo pueden ser caracterizadas con la profundidad del flujo (H), el ancho del río (B), la velocidad media del flujo (V), la viscosidad cinemática del agua (ν) y la velocidad de corte (u^*). Por otra parte, la metodología experimental seleccionada puede ser representada por el número total de transectas realizadas (N_T), la velocidad del bote (V_b), la frecuencia de muestreo del instrumento (f) y el modo seleccionado de medición del ADCP el cual define el nivel de ruido representado por (σ_u): la desviación estándar de la velocidad horizontal.

A partir de estas variables y el teorema Pi de Buckingham, se forma una relación funcional adimensional que describe la evolución del error relativo en las mediciones con ADCP (ε_Q), la cual luego de adoptar algunas hipótesis (la relación B/H no es relevante, Re suficientemente grande para adoptar turbulencia totalmente desarrollada, valores aproximadamente constantes de la relación V/u^* y que los efectos del ruido son despreciables) puede ser expresada como:

$$\varepsilon_Q = a \left(N_T^b \left(\frac{T_t}{T_c} \right)^c \left(\frac{T_t}{\Delta t} \right)^d \right) \quad (11)$$

donde $T_t = H/u^*$ es la escala de tiempo de una estructura turbulenta de tamaño H , $T_c = H/V_b$ es el tiempo que el bote demora en cruzar una estructura turbulenta de tamaño H y $\Delta t = 1/f$ es el intervalo de tiempo de muestreo entre perfiles de velocidad.

A los fines de estimar los coeficientes de la forma funcional (11) se realizó un análisis de los datos sintéticos obtenidos mediante la simulación con DNS para tres condiciones de flujo (Tabla 1). Para cada condición de flujo analizada se adoptaron diferentes estrategias de muestreo variando en cada caso el número total de transectas realizadas (N_T) y la velocidad del bote (V_b).

Tabla 1: Condiciones de flujo analizadas en los datos de la simulación con DNS

Profundidad media H [m]	Ancho B [m]	Velocidad de corte u^* [m/s]	Velocidad media del agua V [m/s]	B/H	Número de Reynolds Re	Número de Froude Fr
0.0641	0.269	0.0079	0.143	4.2	9164	0.180
0.1282	0.537	0.0040	0.071	4.2	9164	0.064
0.18	0.754	0.0028	0.051	4.2	9164	0.038

El caudal se calcula integrando en la sección transversal del flujo los datos de velocidad generados en los experimentos numéricos con DNS. Los datos sintéticos son obtenidos en diferentes verticales simulando el uso de un instrumento desde una plataforma móvil.

La variación en la descarga medida para una misma condición de muestreo puede ocurrir debido a errores aleatorios generados por el instrumento, la turbulencia del flujo y la no estacionalidad del flujo. A partir de los datos generados con DNS solo se pueden considerar los errores aleatorios debido a la turbulencia del flujo.

Se relevaron 12 transectas con datos de la velocidad del flujo para cada condición de muestreo. A los fines de estimar la incertidumbre (o error relativo) asociado a la turbulencia del flujo se asumió que el caudal real es el caudal promediado en 12 transectas. El error

relativo en las mediciones de caudal (ε_Q) asociados con el uso de 1, 2, 4 y 8 transectas se calculó como un porcentaje de la diferencia media para 12 transectas (para $N_T = 12$, $\varepsilon_Q = 0\%$). Para el caso de $N_T = 1, 2, 4$ y 8 , se calculó la media móvil con un set de 12, 11, 9 y 5 valores de caudal respectivamente, utilizando datos secuenciales debido a que las múltiples transectas son medidas secuencialmente. Por lo cual, a $N_T = 1, 2, 4$ y 8 , le corresponde un set de 12, 11, 9 y 5 valores de ε_Q respectivamente.

El máximo de estos valores (ε_{Qmax}) fue calculado para cuatro diferentes valores de N_T , para 8 velocidades de bote diferentes y para cada una de las tres condiciones de flujo presentadas en la Tabla 1, con lo cual se obtuvieron 96 valores en cada set de datos. Considerando que el error relativo máximo (ε_{Qmax}) en la determinación del caudal es una variable aleatoria, se realizaron 20 sets (cada set consta de 96 valores) de datos independientes (muestreados a diferentes tiempos) a los fines de evaluar (para cada condición experimental y de muestreo) la media y los intervalos de confianza de ε_{Qmax} . Los valores incluidos en la Figura 6 corresponden a la media de los 20 sets de datos calculados variando N_T y V_b para las 3 condiciones de flujo. El intervalo de confianza que se muestra en la figura corresponde a la condición de flujo en donde $H = 0.0641$ m. Como era de esperarse, el error relativo máximo disminuye al incrementarse N_T y V_b . En base a estos valores, se estimaron los parámetros de la forma funcional (ecuación (11)) mediante una regresión no lineal. Los parámetros c y d obtenidos del ajuste presentaron valores similares y los intervalos de confianza indicaron que los valores no eran estadísticamente significativos por lo cual la ecuación (11) puede ser expresada como:

$$\varepsilon_Q = 3.9 N_T^{-0.79} \left(\frac{T_c}{\Delta t} \right)^{-0.43} \quad \text{o} \quad \varepsilon_Q = 3.9 \left(N_T \left(\frac{T_c}{\Delta t} \right)^{-0.55} \right)^{-0.79} \quad (12)$$

La ecuación adimensional puede ser utilizada como una herramienta para definir estrategias óptimas de muestreo para realizar una caracterización del flujo con tecnología acústica Doppler. Por ejemplo, en el caso de una medición de caudal en donde la frecuencia del instrumento es de 1 Hz ($\Delta t = 1$ s) y $N_T = 1$, se observa que $\varepsilon_{Qmax} < 5\%$ si $T_c > 1.12$ s. Esto implica que en el caso en que $H = 2$ m la velocidad del bote debe ser menor 1.8 m/s y si $H = 0.5$ m la velocidad del bote debe ser $V_b < 0.4$ m/s. En el caso de mediciones desde una plataforma móvil, se complica realizar las transectas a velocidades tan bajas, por lo cual en estos casos se sugeriría realizar más transectas. Para el caso en que $N_T = 4$, $\varepsilon_{Qmax} < 5\%$ si $T_c > 0.08$ s y si $H = 0.5$ m, V_b en este caso debe ser menor que 6 m/s, lo cual es habitual. Esto significa que los errores aleatorios debidos a la turbulencia del flujo son relevantes en ríos poco profundos muestreados a grandes velocidades del bote. Sin embargo, estos errores no son significativos si se realizan al menos cuatro transectas.

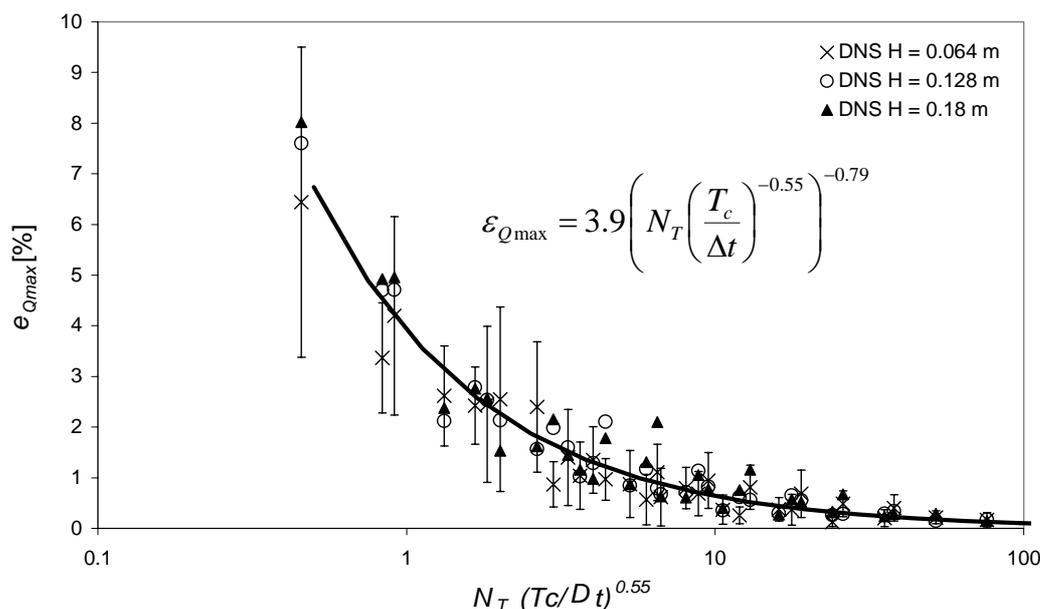


Figura 6: Error máximo relativo en la determinación de los caudales en función de parámetros adimensionales.

4 OPTIMIZACION DE ESTRATEGIAS DE MUESTREO CON ADV

Se muestrearon señales de flujo sintéticas obtenidas de la modelación numérica con DNS simulando el uso de un ADV para una profundidad de flujo de $H=0.0641$ m (Tabla 1)

Considerando que el ADV mide en un volumen cilíndrico de 6 mm de diámetro y de altura variable (dependiendo del modelo de instrumento y del fabricante) se adoptaron dos configuraciones experimentales con diferentes tamaños del volumen de medición. La altura media del dominio de medición y el volumen utilizado en cada caso para realizar la promediación se muestra en la Tabla 2. Para cada configuración experimental se generaron señales sintéticas en diferentes puntos de la vertical promediando espacialmente en el volumen de muestreo del ADV los valores puntuales de velocidad. Las señales fueron muestreadas a 247 Hz y durante un tiempo de 404 segundos en 6 puntos a diferentes profundidades para el caso 1 (ADV 1) y en 10 puntos para el caso 2 (ADV 2). Con las señales promediadas, se cuantificaron los parámetros de la turbulencia a los fines de analizar el efecto del promediado espacial.

Tabla 2. Características de los volúmenes de medición del ADV analizados

Caso	Altura media	Volumen medio
	[mm]	[mm ³]
ADV 1	2.5	16
ADV 2	5.8	58

En la Figura 7 se muestra el perfil vertical de la velocidad adimensional media de la señal promediada espacialmente para los dos casos analizados. Se observa que el efecto del promediado espacial es relevante en la zona cercana al fondo y las diferencias son mayores en el caso 2 (ADV 2) en donde el volumen de promediación es mayor. Para $z^+ = 19.3$, lo que

equivale a una distancia al fondo de 2 mm, la diferencia entre el perfil teórico y el medido teniendo en cuenta el promediado espacial del instrumento es de 42%.

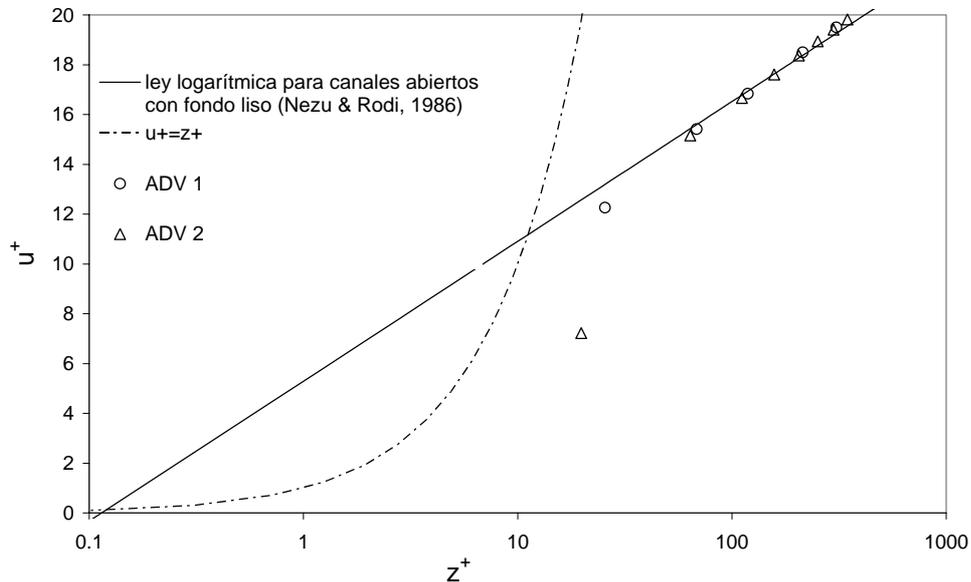


Figura 7: Perfil vertical de la velocidad adimensional media en la dirección del flujo ($u^+ = u/u^*$ y $z^+ = zu^*/\nu$) medidos simulando el uso del ADV

Las Figuras 8, 9 y 10 muestran los perfiles verticales adimensionales de la raíz media cuadrática de las fluctuaciones de la velocidad para la componente en la dirección del flujo (u'), en la dirección transversal (v') y la dirección vertical (w') respectivamente calculadas para la señal promediada en el volumen de medición del ADV en los dos casos analizados (Tabla 2). A los fines de analizar los errores en los parámetros de la turbulencia se incluyen en las mencionadas Figuras los datos experimentales medidos por Nezu (1977) y las relaciones semi-teóricas presentadas anteriormente. En el caso 1 (ADV 1) los valores son similares a los publicados en la literatura, sin embargo al aumentar el volumen de medición (y de promediación) en el caso 2 (ADV 2) los valores en la zona cercana al fondo difieren de los publicados en la literatura. En el caso del punto más cercano al fondo en donde $z/H = 0.03$ los valores de u' , v' y w' difieren en más de un 50%.

La Figura 10 muestra una comparación entre los perfiles verticales del flujo de la energía cinética turbulenta (TKE) calculada con la señal promediada en el volumen de medición del ADV para los dos casos de estudio y la relación semi-teórica propuesta por Nezu and Nakagawa (1993) para la región en donde la energía turbulenta se encuentra en equilibrio. Se observa que los valores de TKE para el caso 2 (ADV 2) son menores que para el caso en que el volumen de medición es menor (caso ADV 1), lo cual muestra el efecto de filtrado de la señal que ocurre al promediar los valores en el volumen de medición del ADV. Las diferencias con respecto a la curva teórica son para $z^+ = 0.3$ de un 12% aumentando en un 70% en la zona más cercana al fondo ($z^+ = 0.03$).

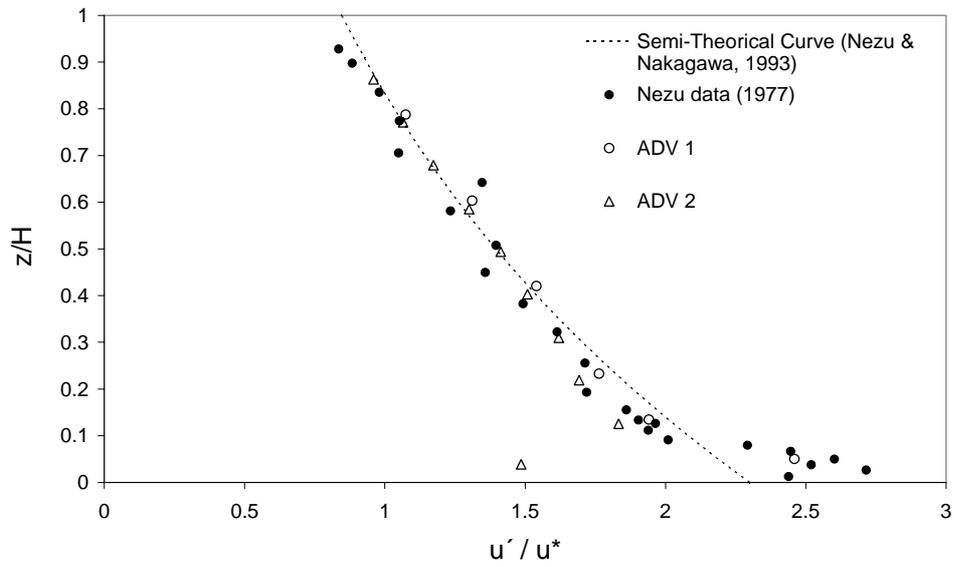


Figura 8: Raíz media cuadrática adimensional de las fluctuaciones de la velocidad en la dirección del flujo medida simulando el uso del ADV

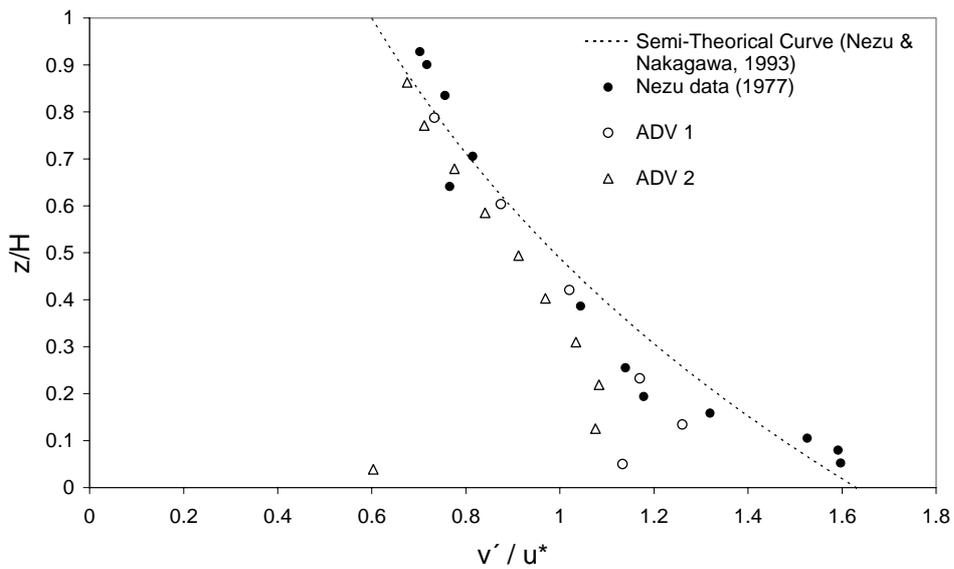


Figura 9: Raíz media cuadrática adimensional de las fluctuaciones de la velocidad en la dirección transversal al flujo medida simulando el uso del ADV

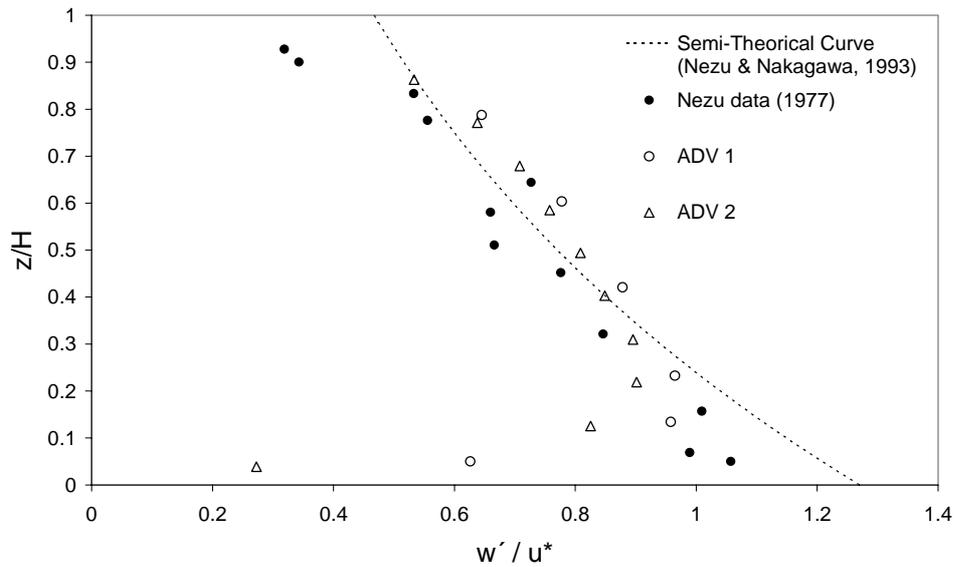


Figura 4: Raíz media cuadrática adimensional de las fluctuaciones de la velocidad en la dirección vertical medida simulando el uso del ADV

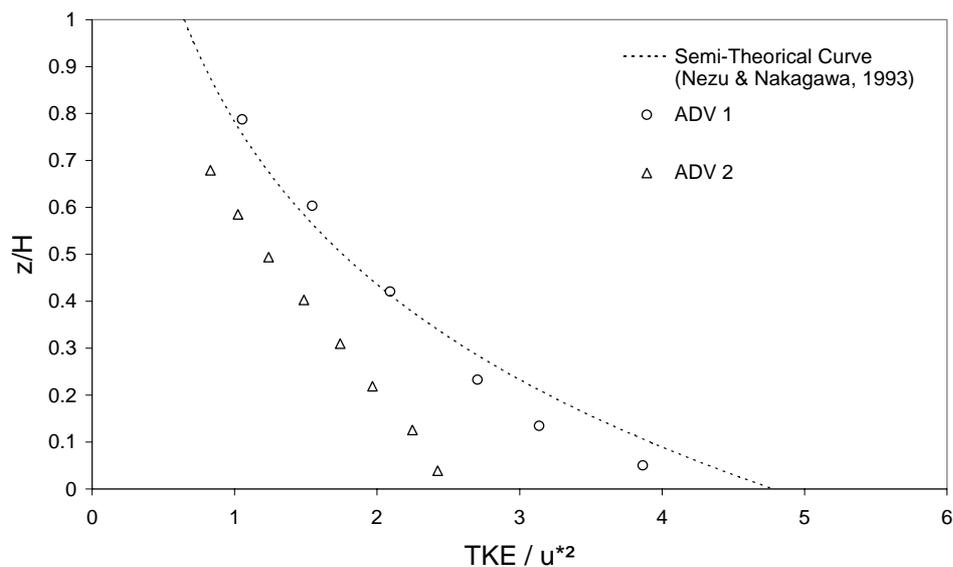


Figura 10: Energía cinética turbulenta adimensional medida simulando el uso del ADV

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan relaciones adimensionales elaboradas mediante el análisis de un campo de flujo turbulento tridimensional generado con DNS, con el fin de optimizar las estrategias de muestreo de técnicas de medición hidroacústicas (ADV y ADCP) para determinar en forma precisa el caudal y parámetros representativos de la turbulencia (como velocidades media, fluctuaciones turbulentas, esfuerzos de Reynolds, etc).

El estudio se basa en el análisis de datos de alta resolución espacial y temporal obtenidos con simulación numérica Directa (DNS) de un flujo turbulento a Reynolds moderado ($Re = 9164$) en un canal abierto. Los niveles de turbulencia alcanzados en la simulación que se

presenta en este trabajo pueden ser considerados representativos de la naturaleza de los flujos turbulentos tal como se muestra en comparación con los resultados publicados en la literatura. Basándose en la similitud del número de Reynolds, los resultados y conclusiones pueden ser extrapolados con cierto criterio a números de Reynolds mayores.

Los instrumentos acústicos Doppler permiten caracterizar de manera óptima el flujo turbulento si se satisfacen ciertas condiciones. En el caso de mediciones de caudal realizadas con ADCP, los errores aleatorios (incertidumbre) debidos a la turbulencia del flujo son relevantes en ríos poco profundos muestreados a grandes velocidades del bote. Sin embargo, estos errores no son significativos si se realizan al menos cuatro transectas. Estos resultados son de utilidad práctica a la hora de definir una metodología experimental óptima para realizar mediciones de caudales con tecnología acústica Doppler. En estos momentos, y en base a los resultados de esta investigación se está trabajando en la modificación de los protocolos de medición del USGS.

En lo que respecta a las mediciones con ADV, se observó que en la región cercana al fondo las mediciones con este instrumento presentan un sesgo negativo relevante en los parámetros de la turbulencia debido al efecto producido por el promediado espacial en el volumen de medición. De esta forma no se recomienda utilizar esta tecnología para caracterizar en forma precisa el flujo turbulento en la región cercana a la pared (distancia menor a 1 cm aproximadamente). A los inconvenientes mencionados se debe agregar el hecho que efecto del rebote de las ondas sonoras en el fondo aumenta el nivel de ruido en las señales registradas en esa región (efecto no incluido en este estudio)

6 AGRADECIMIENTO

Al Dr. Ing. Mariano I. Cantero por el desarrollo de las simulaciones numéricas directas de flujos turbulentos que fueron analizadas en el desarrollo del presente trabajo.

7 REFERENCIAS

- Anderson, S., and Lohrmann, A. (1995). "Open water test of the Sontek acoustic Doppler velocimeter". *Proc. IEEE Fifth Working Conf. on Current Measurements*, St.Petersburg, FL. IEEE Oceanic Engineering Society . pp.188-192.
- Brown, D., Cortez, R., and Minion, M. (2001). "Accurate Projection Methods for the Incompressible Navier–Stokes Equations". *Journal of Computational Physics*, Vol.168(2), pp. 464-499.
- Cantero, M., Balachandar, S., and García, M. (2007b). "High resolution simulations of cylindrical density currents". *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 590, pp. 437-469
- Cantero, M., Lee, J., Balachandar, S., and García, M. (2007a). "On the front velocity of gravity currents". *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 586, pp.1-39.
- Canuto, C., Hussaini, M.Y., Quarteroni, A., and Zang, T.A. (1988). *Spectral Methods in Fluid Dynamics*. Springer, New York, U.S.A,
- Cortese, T., and Balachandar, S. (1995). "High Performance Spectral Simulation of Turbulent Flows in Massively Parallel Machines With Distributed Memory". *International Journal of High Performance Computing Applications*, Vol. 9(3), pp. 187-204.
- Czuba, J., and Oberg K. (2008). "Validation of Exposure Time for Discharge Measurements made with Two Bottom Tracking Acoustic Doppler Current Profilers". *9th Working conference on Current Measurement Technology, IEEE*, Charleston, South California, USA.
- García, C., Cantero, M., Niño, Y., and García, M. (2005). "Turbulence measurements using Acoustic Doppler Velocimeter". *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 131(12), pp.

1062-1073.

- Lemmin, U., and Lhermitte, R. (1999). "Discussion of 'ADV measurements of turbulence: Can we improve their interpretation?' by Nikora, V., and Goring, D." *J. Hydr. Engrg. ASCE*. Vol. 125(9), pp. 987-988.
- Lohrmann, A., Cabrera R., and Kraus, N. (1994). "Acoustic Doppler velocimeter (ADV) for laboratory use". *Proc. from Symposium on fundamentals and Advancements in Hydraulic measurements and Experimentation*, ASCE. Buffalo. pp. 351-365.
- McLelland, S. and Nicholas, A. (2000). "A new method for evaluating errors in high-frequency ADV measurements". *Hydrological Processes*. Vol. 14, pp. 351-366.
- Mueller, D., and Wagner C. (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.
- Nezu, I. (1977). *Turbulence structure in open channel flows*. Ph.D Thesis. Kyoto University. Kyoto, Japan.
- Nezu, I., and Nakagawa, H. (1993), *Turbulence in open channels*. AA Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- Nezu, I., and Rodi W. (1986). "Open-Channel Flow Measurements with a Laser Doppler Anemometer". *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 112(5), pp. 335-355.
- Nikora, V. and Goring, D. (1998). "ADV measurements of turbulence: Can we improve their interpretation?" *J. Hydr. Engrg. ASCE*. Vol. 124(6), pp. 630-634.
- Oberg, K., and Mueller, D. (2007). "Validation of Streamflow Measurements Made with Acoustic Doppler Current Profilers". *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 133(12), pp. 1421-1432.
- Oberg, K., Morlock, S., and Caldwell, W. (2005). "Quality-Assurance Plan for Discharge Measurements Using Acoustic Doppler Current Profilers". U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5183.
- Precht, Elimar; Janssen, Felix; and Huettel, Markus (2006). Near-bottom performance of the Acoustic Doppler velocimeter (ADV) – a comparative study. *Aquatic Ecology*. Vol. 40. pp. 481-492
- Simpson, M.R. (2001). Discharge measurements using a broad-band acoustic Doppler current profiler. *U.S. Geological Survey Open-File Report 01-1*, 134 pp.
- Voulgaris, G., and Trowbridge J. (1998). "Evaluation of the acoustic Doppler velocimeter (ADV) for turbulence measurements". *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 15(1), 272-288.