



Sociedad Colombiana
de Ingenieros



Sociedad Tolimense
de Ingenieros



XXIII SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA IBAGUÉ, 15 AL 17 DE AGOSTO DE 2018

MEDICIÓN DE CAMPO DE VELOCIDADES EN CANALES CURVOS USANDO ADVPII

Hernán Javier Gómez-Zambrano

Docente del Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Nariño, Colombia, hgoomez@udenar.edu.co,

Francisco Mauricio Toro-Botero

Docente del Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia, Colombia, fmtoro@unal.edu.co.

Andrés Evelio Gómez-Giraldo

Docente del Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia, Colombia, eagomezgi@unal.edu.co.

RESUMEN:

Se utiliza un Acoustic Doppler Velocimeter Vectrino Profiler II (ADVPII) para realizar mediciones de campos de velocidad en un canal curvo. Se establecen nuevos criterios para la configuración de los parámetros de entrada de dicho instrumento, como la frecuencia de medición, el tiempo de medición de un experimento y se verificó los criterios para establecer el valor de parámetros adicionales. Campos de velocidad en la dirección tangencial, radial y axial del flujo fueron medidos, analizando los vectores de velocidad en sentido transversal del flujo, identificando movimiento vortical, mediante técnicas de visualización del flujo. Los valores experimentales permitieron encontrar la relación entre la intensidad del flujo secundario y el ángulo de curvatura del canal.

ABSTRACT:

An Acoustic Doppler Velocimeter Vectrino Profiler II (ADVPII) is used to perform velocity fields measurements on a curved channel. New criteria are established for the configuration of the input parameters of such instrument, as the measurement frequency and the measurement time of an experiment, and the criteria for establishing the value of additional parameters were verified. Velocity fields in the tangential, radial and axial direction of the flow were measured, analyzing the velocity vectors in the transverse direction of the flow, identifying swirl motion, by means of flow visualization techniques. The experimental values allowed to find the relation between the intensity of the secondary flow and the angle of curvature of the channel.

PALABRAS CLAVE: canal curvo, campos de velocidad, velocímetro acústico Doppler.

Mayor Información

Comisión Técnica Permanente
de Ingeniería de Recursos Hídricos

☎ 57 (1) 5550520 📧 logistica@sci.org.co



INTRODUCCIÓN

El efecto Doppler acústico ha sido utilizado ya hace varias décadas, pero solo a partir de la década de los 90 aparecieron los primeros instrumentos comerciales (Craig et al., 2011). Para la medición del campo de velocidades se utilizó un ADV Vectrino Profiler II (ADVPII) por su acrónimo en inglés “Acoustic Doppler Velocimeter”, este dispositivo es capaz de medir las tres componentes de velocidad del flujo como son la velocidad axial (V_z), radial (V_r) y circunferencial (V_t). La diferencia con un ADV convencional, es que este mide las componentes de velocidad en un punto, en cambio el ADVPII mide un perfil longitudinal completo en la profundidad, hasta una longitud de 0.035 m, con una resolución mínima de un milímetro.

En la literatura no se reportan casos de medición con ADVPII en canales curvos, por ser este un dispositivo relativamente nuevo, donde su salida al mercado se inició en el año 2011 (Craig et al., 2011). A partir de dicha fecha se han reportado investigaciones relacionadas con flujo en canales abiertos, generalmente canales rectos. (Craig et al., 2011) compara los resultados del perfil de velocidades obtenidos con ADVPII, con datos obtenidos con PIV por su acrónimo en inglés “Particle Image Velocimeter”, encontrando similitudes coherentes, desafortunadamente este trabajo no reporta la configuración de los parámetros del software controlador ADVPII. (Rusello and Allard, 2012) presentan un estudio para mediciones cerca al fondo evaluando el efecto del tipo de material del fondo sobre los perfiles de velocidad, en este trabajo se estipulan algunas recomendaciones para configurar el software controlador del ADVPII relacionados con el manejo de la relación señal/ruido (SNR) por sus siglas en inglés “Signal to Noise Ratio” en lo cual el valor del SNR debe ser lo más alto posible. Entre los trabajos prácticos está el reportado por (Leng and Chanson, 2016) quienes utilizan el ADVPII para medir campos de velocidad en secciones transversales de un canal recto, cuyas mediciones fueron validadas con un ADV Vectrino de medición puntual, y reportan algunos criterios de configuración del dispositivo de medición, destacándose la frecuencia de medición (Sampling Rate (SR)) usada de 100Hz, el rango de velocidades (velocity range, (VR)) de 1.0m/s, resolución del perfil de un mm (0.001m) y altura del perfil de 0.030m, con 25 repeticiones por perfil. En relación con campo de velocidades en canales curvos, se presentan datos medido con un ADV puntual en un canal de 180° de curvatura, reportando datos de 0 a 180°, en secciones cada 30° (Bai et al., 2014).

Este trabajo tiene como objetivos obtener datos de los campos de velocidad para identificar flujo vortical con datos de experimentación física en el área medida usando el ADVPII y proporcionar datos depurados que puedan ser utilizados para la calibración y validación de modelos hidrodinámicos con los cuales se pueda calcular el campo de velocidades en un canal curvo.

Se obtuvo campos de velocidad en diferentes secciones transversales en un canal curvo, para varios perfiles verticales por sección, los cuales permitieron construir líneas de corriente del flujo secundario en cada sección e identificar cualitativamente el patrón de flujo y cuantitativamente algunas magnitudes características de flujo vortical usando el criterio de helicidad (He), la cual fue relacionada con el cambio de curvatura del canal.

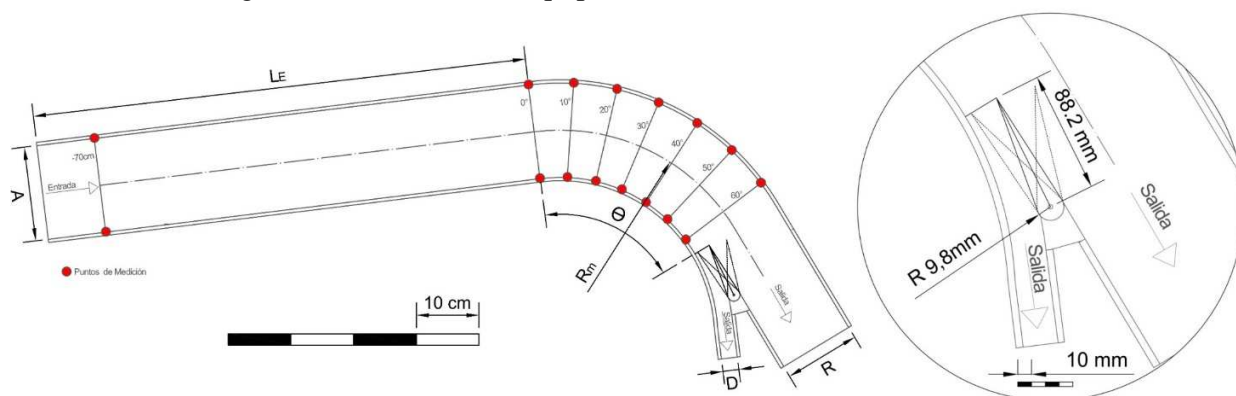
Al final se obtiene una nueva metodología para determinar el tiempo de medición, basada en energía cinética turbulenta (TKE_c) y en conceptos estadísticos de bondad de ajuste. Esto debido que no existe una metodología para estimar dicho tiempo, ya que este depende de las condiciones del flujo y la geometría del canal.

Mayor Información

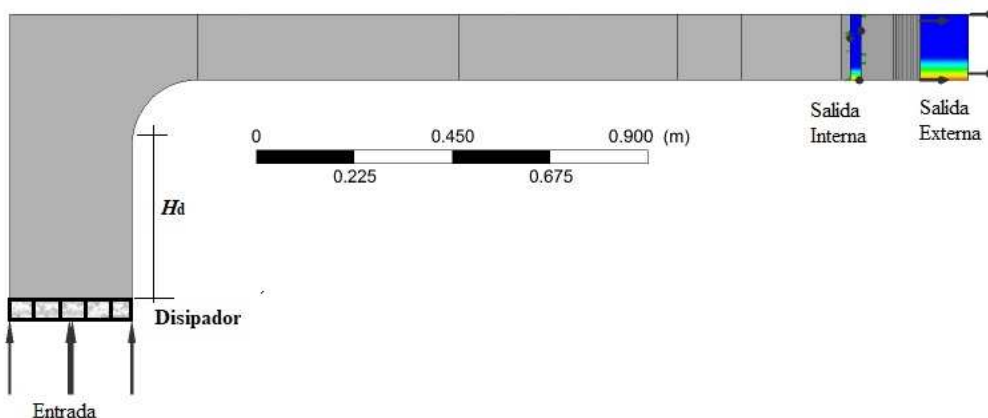
MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de instalación física

El canal fue construido en acrílico transparente tanto en las paredes como el fondo, con un sistema recirculatorio impulsado por una bomba sumergible, el agua sale de la bomba por medio de una tubería a presión, la cual llega a un tanque vertical que sirve de abastecimiento del canal, continúa por un tramo de canal recto, seguido de la curvatura y termina en una salida bifurcada, para retornar el flujo por caída libre al tanque de succión donde está conectada la bomba, la cual vuelve a realizar la recirculación. El fondo del canal es horizontal tanto en el tramo recto como en la curvatura. Las dimensiones del canal según Figura 1(a) son dadas como: el ancho en la alimentación (A) es igual a 0.15m, h_e es la profundidad del agua en la entrada del canal de 0.0972m, R_m es el radio medio de la curva del canal de 0.325m, Q es el caudal de $0.0051\text{m}^3/\text{s}$, θ es el ángulo de curvatura total de 66° , L_E es la longitud del tramo recto de entrada antes de la curva de 1.25m; la salida del rebose (R) con un ancho de 0.121m y la salida de descarga (D) con un ancho de 0.025m. El tanque vertical a la entrada se empata con el fondo de la parte recta del canal con una transición vertical circular de radio 0.25m, la sección de entrada del tanque es de $0.25\text{m} \times 0.15\text{m}$, la altura (H_d) entre el dispositivo disipador de energía y el inicio de la transición circular es de 0.5m. En la Figura 1 (a,b) se indican los esquemas y detalles geométricos del canal. Los perfiles medidos se distribuyeron separados 0.01m uno del otro, como se indica en la Figura 1(c), iniciando en 0.035 m desde la pared interna de la curva, para obtener un total de nueve perfiles verticales. En la figura 1(d) se indica la fotografía del canal con el equipo ADVPII instalado.

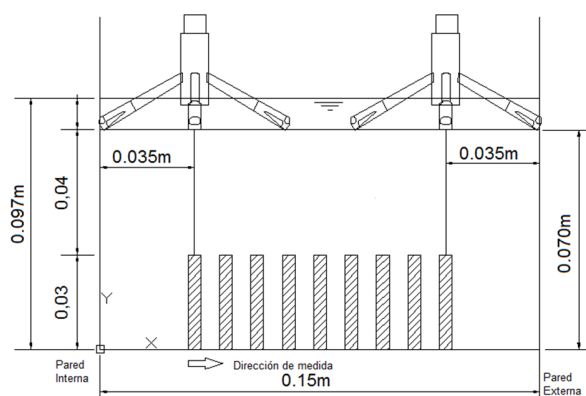


(a)

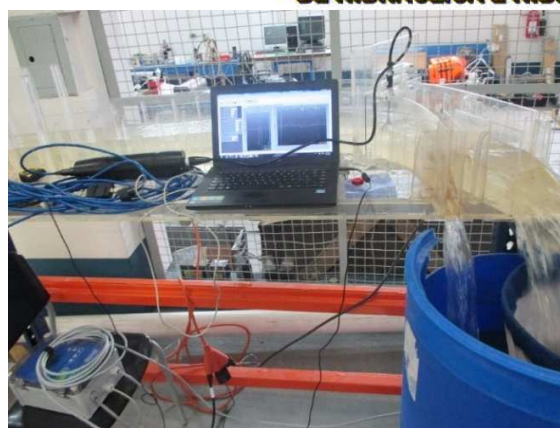


(b)

Mayor Información



(c)



(d)

Figura 1.- Geometría del canal. (a) Planta del canal sin el tanque de entrada. (b) Perfil del canal indicando el tanque de entrada. (c) Distribución de los perfiles medidos en cada sección. (d) fotografía del canal y los dispositivos de medición.

Sistemas de referencia

El origen del sistema de referencia para las velocidades está localizado en el centro circunferencial de la curva del canal con ejes t - r - z (diferentes al sistema de referencia global x - y - z), se llamará velocidad tangencial (V_t) o la velocidad principal del flujo tangente a la curva, (conocida también como velocidad circunferencial), con signo según la regla de la mano derecha desde el eje z al eje r ; a la velocidad transversal se llamará velocidad radial (V_r) positiva si crece con el radio; la velocidad vertical (V_z) se llamará velocidad axial, paralela al eje z ortogonal al plano t - r ; positiva si crece con z , en la Figura 2, se indica el sistema de referencia en forma gráfica.

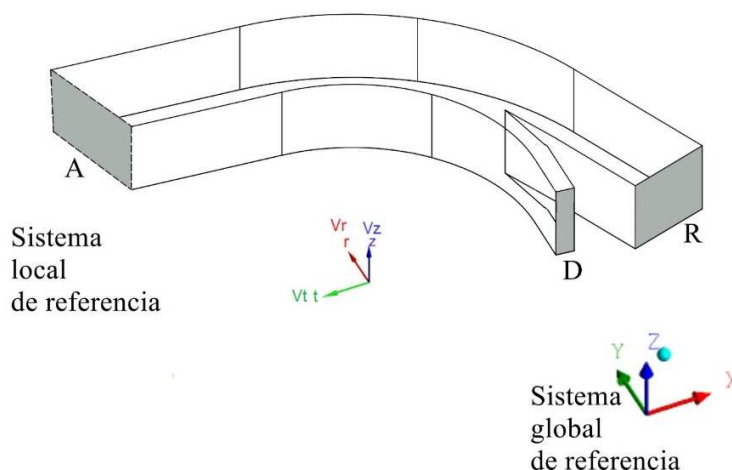


Figura 2.- Sistema de referencia para las velocidades.

Características del ADVPII

El ADVPII es un dispositivo ultrasónico que permite medir los campos de velocidad en un flujo de agua al más bajo precio, quizá a un costo 10 veces menor que otros dispositivo como un velocímetro de procesamiento de imágenes (PIV) (Carrillo, 2016). El sistema perfilador Doppler, muestrea múltiples volúmenes por ciclos de medición, por lo tanto, proporciona velocidades en tres dimensiones (3D) para

Mayor Información

un rango de volúmenes, lo que permite medir un perfil con resolución de un milímetro en una longitud de 0.035m (Craig et al., 2011).

El ADVPII está compuesto de una sonda central que hace de receptor y cuatro emisores (beams), donde x es positivo en dirección del receptor con la marca roja en Figura 3 (a), donde z es positivo hacia la parte superior de la sonda y y es determinado según la regla de la mano derecha, estas direcciones se indican en los esquemas de la Figura 3(a). El volumen de muestreo se indica en la figura 3(b) con una longitud máxima de 0.035m. La escala geométrica de tamaño del dispositivo se indica en la figura 3(c). Los “beams” están colocados a 30° con referencia a la sonda central como lo indica la Figura 3(d). El ADVPII proporciona valores de la velocidad en (m/s) en dirección x (V_x), velocidad en y (V_y) y dos velocidades en z (V_{z1} , V_{z2}), estas velocidades en z , deben tener la misma magnitud y por lo general se suelen promediar para el post proceso. Se debe tener en cuenta que las velocidades dependen de la dirección en que se coloque el instrumento con respecto a la instalación física en la cual se esté midiendo. Además de las velocidades también se reporta indicadores de la calidad de la señal, como la *amplitud* (A) de la señal; la (SNR) y la *correlación* (COR) que es una medida de la calidad de la señal, dada en porcentaje. Altos valores de SNR siempre producen altos valores de COR (Nortek USA, 2012).

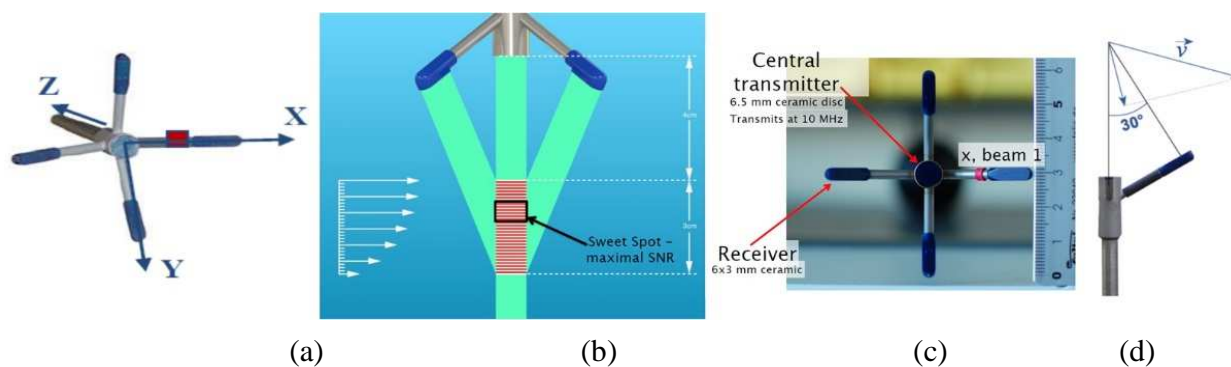


Figura 3.- Esquemas del ADVPII. (a) Sistema de referencia de las velocidades. (b) Tamaño del volumen de muestreo. (c) Receptores y transmisores. (d) Inclinación de los emisores con respecto a la sonda central (Nortek USA, 2012).

Para establecer la frecuencia de medición adecuada, en este trabajo se adaptó un nuevo criterio basado en turbulencia que permite hacer un estimativo de la frecuencia mínima (García et al., 2005), (Gunawan et al., 2011) y (Herrero, 2014). Para estimar el tiempo de medición no existe una metodología establecida, se propone un nuevo criterio fundamentado en el concepto de energía cinética turbulenta y estadística de bondad de ajuste, como el coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe (NSE) con uso del Software FITEVAL (Ritter and Muñoz-Carpena, 2013). Para la configuración de los otros parámetros (Nortek AS, 2016), (Craig and Gómez, 2015) y (Gómez-Zambrano, 2017) proporcionan recomendaciones puntuales, para cada uno de ellos.

Criterio para establecer el tiempo de medición

Teniendo en cuenta que el flujo estudiado es tridimensionalmente complejo, donde existe una combinación de efectos espacio-temporales, se introduce el concepto de energía cinética turbulenta (TKE_e) por sus siglas en inglés “Turbulence Kinetic Energy” en vez de estudiar el flujo con componentes

Mayor Información



de velocidad por separado. Con los valores medidos con el ADVPII, es posible conocer su valor y establecer un criterio para determinar el tiempo de medición.

En la literatura se ha propuesto el cálculo de TKE como base a las varianzas de las fluctuaciones turbulentas (Wallace and Hobbs, 2006). Retomando la física básica donde la energía cinética es dada como $KE=1/2mV^2$, donde m es la masa y V es la velocidad, y si se da en términos de energía cinética específica, se tiene que $TKE_e=KE/m=1/2V^2$, o energía cinética por unidad de masa (Wallace and Hobbs, 2006). Extendiendo el concepto a las fluctuaciones turbulentas se puede obtener una ecuación para TKE_e útil para nuestro caso, ec. [1].

$$TKE_e = \frac{1}{2}(\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2) \quad [1]$$

σ_u^2 , σ_v^2 , σ_w^2 son las varianzas de las componentes de velocidad en x,y,z; respectivamente. Tomando el concepto de bondad de ajuste del software FITEVAL es posible hacer una comparación de un grupo de datos con otros y observar que tan similares son, por medio del índice estadístico NSE (Ritter and Muñoz-Carpena, 2016), (Ritter and Muñoz-Carpena, 2013), (Zoubir and Boashash, 1998).

Metodología para determinar el tiempo de medición

Este método consiste en realizar un filtrado de los perfiles promedio de la TKE_e , descartando aquellos perfiles que no cumplan el umbral estadístico establecido. En términos prácticos lo que mide es el grado de dispersión de los perfiles con el tiempo. En el diagrama de flujo de la Figura 4, se indica los pasos a seguir una vez se tenga la medición temporal de los campos de velocidad.

Se inicia dividiendo la señal completa de tiempo T , (por ejemplo $T=30$ minutos), en periodos intermedios en minutos ($0-t_1, 0-t_2, 0-t_i, \dots, 0-T$), con (i) igual al número de intervalos asumidos, luego se calcula el perfil promedio de TKE_e para cada sub-tiempo de medición, se compara estadísticamente el primer perfil con los subsiguientes, el segundo con los subsiguientes, y así sucesivamente, se calcula el estadístico NSE entre los dos perfiles y la probabilidad de que el NSE caiga dentro del intervalo 0.9-1.0; como cada perfil promedio corresponde a un tiempo de medición, se relaciona la probabilidad con cada tiempo y se escoge aquel correspondiente a una probabilidad del 90%.

Mayor Información

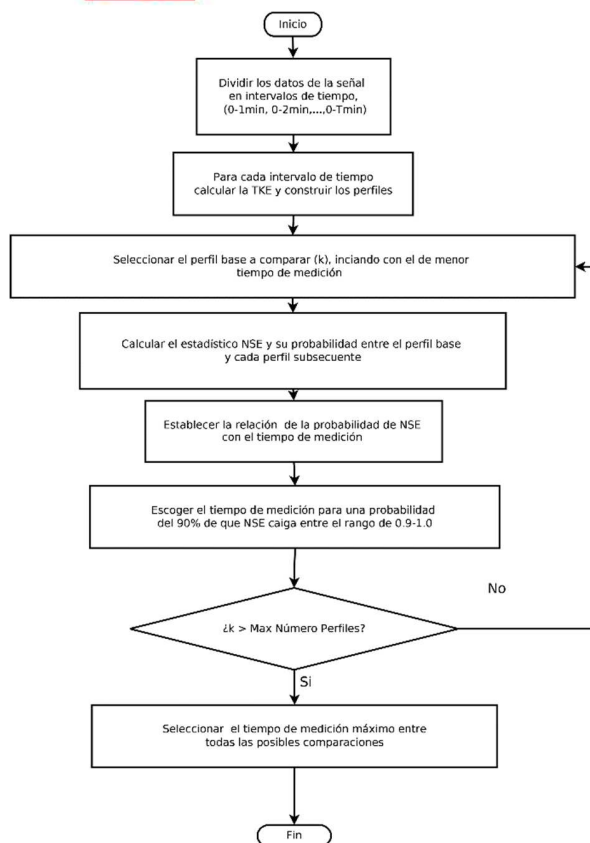


Figura 4.- Diagrama de flujo para encontrar el tiempo de medición (CT) para el ADVPII.

Criterio para establecer la frecuencia de medición

No existe un criterio de la frecuencia de medición específico para el ADVPII, pero es posible estudiarlo a partir de conceptos de turbulencia. Retomando el criterio de (García et al., 2005) y aplicado por (Gunawan et al., 2011) y (Herrero, 2014); donde la frecuencia de medición debe satisfacer la condición $F=f_m T_f > 20$, donde T_f es la escala de tiempo de la turbulencia del flujo generado por fricción con el fondo, que se estima como $T_f = L/V_c$, L es la escala de longitud de los grandes vórtices (del orden de la profundidad H del flujo) y V_c es la velocidad convectiva (del orden de la velocidad media del flujo en la dirección longitudinal). Otro criterio es el dado por Nezu and Nakagawa (Gunawan et al., 2011), donde se estipula que la frecuencia de medición debe ser mayor a $f_{\min}=50* V_c/\pi/H$.

Caracterización del flujo secundario

El flujo secundario se genera cuando un flujo es forzado a moverse en un conducto curvo ya sea con flujo a superficie libre o flujo a presión (Van Balen, 2010). Teniendo en cuenta que el flujo secundario posee estructuras complejas, se establecen unos criterios más simplificados para su cuantificación. En nuestro caso se utilizó el concepto de helicidad (Moffatt and Tsinober, 1992). La helicidad fue inicialmente propuesta para estudios de campos magnéticos (Berger and Field, 1984). Posteriormente este concepto fue introducido para estudiar flujo vortical (Moffatt and Tsinober, 1992). La helicidad (H_e) ha sido usada para evaluar la intensidad de corrientes secundaria (ICS), como lo reportan (Bai et al., 2014), quienes estudian la evolución del flujo secundario a través de una canal de 180° de curvatura. La helicidad para nuestro caso fue planteada como se indica en ec.[2].



$$H_e = (\nabla \times V) \cdot V \quad [2]$$

La ICS de flujo secundario (I_h), es evaluada con ec. [3].

$$I_h = \int_{\forall} H_e d_x^3 \quad [3]$$

En ec. (2) el término H_e se conoce como la densidad de helicidad del flujo y es el producto del rotacional ω , ($\omega = \nabla \times V$), por el vector velocidad (V), ω actúa en un punto infinitesimal del flujo. Tanto H_e como I_h son cantidades pseudo-escalares, ya que tienen implícita una dirección de giro, por ejemplo cambian de signo según el marco de referencia de la regla de la mano derecha o de la mano izquierda (Moffatt and Tsinober, 1992).

Metodología de configuración del ADVPII

Para encontrar una configuración adecuada para operar el ADVPII, es necesario realizar una serie de actividades que garantice la buena calidad de los datos, en este sentido se propone y ejecuta la siguiente metodología, basada en experimentación preliminar propia, en recomendaciones dadas en la literatura y recomendaciones dadas por el fabricante (Nortek USA, 2016). Existen tres pasos generales que hay que realizar: 1) maximizar los valores de COR y SNR, 2) establecer los valores de la frecuencia de medición y el tiempo de medición, 3) configurar parámetros restantes según recomendaciones del fabricante. A continuación, se presenta los pasos a seguir para la configuración y ejecución de las mediciones con el ADVPII.

1. Identificar los parámetros a evaluar de entrada del software controlador del ADVPII.
2. Identificar las variables de salida o de respuesta a ser evaluadas (COR, SNR).
3. Asignar los valores (o niveles) a cada parámetro de entrada, mediante la aplicación de diseño estadístico de experimentos (Gutiérrez and De la Vara, 2012).
4. Ejecutar el arreglo experimental en un perfil vertical de velocidades previamente seleccionado.
5. Realizar post proceso consistente en el filtrado de las señales originales por medio de algoritmos ya estandarizados (Goring and Nikora, 2002) y software VTMT (Becker, 2014).
6. Evaluar el efecto de los parámetros de entrada sobre COR y SNR.
7. Seleccionar aquellos parámetros que maximicen los valores de COR y SNR.
8. Verificar que la señal no esté produciendo valores conocidos como “weak spots”.
9. Establecer la frecuencia mínima de medición.
10. Calcular el tiempo mínimo de medición, con experimentos preliminares de larga duración.
11. Configurar el software controlador del ADVPII con los parámetros seleccionados.
12. Ejecutar las mediciones de los perfiles en las secciones transversales del canal.
13. Realizar el post proceso de mediciones finales, calcular los valores medios temporales de cada componente de velocidad.

Los parámetros de entrada del software controlador del ADVPII, identificados fueron: los parámetros (Sampling Rate (SR) en Hz, Ping Algorithm (PA), Power Level (PL), Velocity Range (VR) en m/s, Collection time (CT) en minutos), según la interfaz de usuario. (Gómez-Zambrano, 2017), presenta en detalle la ejecución de la metodología propuesta mediante las mediciones en un canal curvo.

Mayor Información

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto de los parámetros de entrada sobre COR y SNR

Aplicando un diseño estadístico de experimentos (DEE) se realizaron 8 experimentos, evaluando el efecto con 3 parámetros PA, PL y SR, para un diseño factorial 2^3 , donde cada experimento correspondió una combinación diferente de los tres factores. Inicialmente se realizó una evaluación cualitativa de los valores resultantes de COR y SNR por medio gráfico de los arreglos experimentales, donde se grafican los valores promedios de las dos variables de respuesta. En la Figura 5 se observa los valores de SNR para la dirección x, donde los valores más altos son producidos cuando el parámetro o factor PL adquiere un nivel máximo (*Hight*).

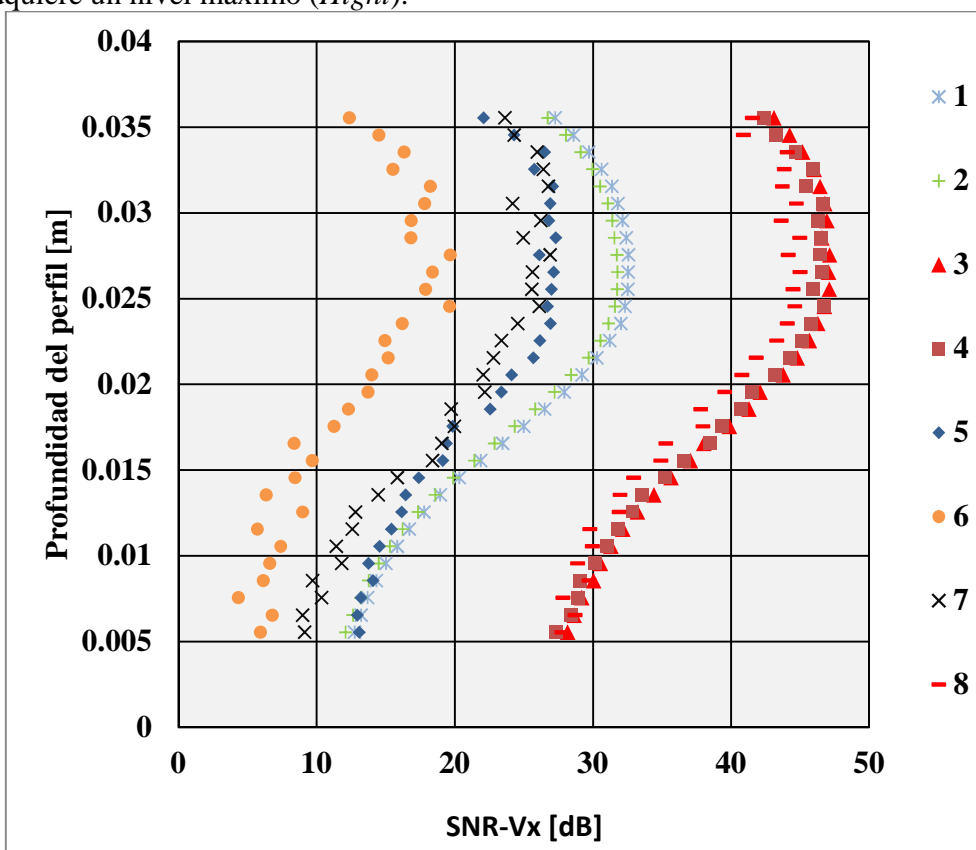


Figura 5.- Gráficas de SNR en dirección x (V_x) para los ocho experimentos. (Cada color en la gráfica corresponde a una medición del mismo perfil para un total de 8 experimentos, indicados en convención en la margen derecha de la figura).

Es de anotar que al agua se agregaron pequeñas partículas de antracita, entre 53micrones y 200 micrones, en concentración volumétrica de 0.01%, lo que elevó el valor de SNR el cual es susceptible a las partículas dispersas en el agua “scatterings” esto fue posible por ser un sistema recirculatorio en donde las partículas no salen del sistema y se garantiza una concentración constante en el tiempo.

Para realizar el análisis cuantitativo mediante la aplicación del método de análisis de varianza (ANOVA), se promediaron los valores de COR y SNR a lo largo del perfil y para las tres velocidades. Para los datos a lo largo del perfil se aplicó el promedio aritmético y para el promedio de las velocidades

Mayor Información

se hizo un promedio usando el concepto de la media cuadrática (X_{rms}), $X_{rms} = ((V_x^2 + V_y^2 + V_z^2)/3)^{0.5}$. El diseño experimental 2^3 y los resultados se indican en la Tabla 1.

Tabla 1.- Valores promedios de las variables de respuesta para el arreglo experimental factorial 2^3 .

| No de Experimento | Niveles Codificados | | | Niveles Reales | | | COR[%] | SNR[dB] |
|-------------------|---------------------|----|----|----------------|------|-----|--------|---------|
| | PA | PL | SR | PA | PL | SR | | |
| 1 | - | - | - | Min Interval | Low- | 10 | 94.9 | 25.2 |
| 2 | + | - | - | Adaptative | Low- | 10 | 94.1 | 24.8 |
| 3 | - | + | - | Min Interval | High | 10 | 95.3 | 40.8 |
| 4 | + | + | - | Adaptative | High | 10 | 94.1 | 40.5 |
| 5 | - | - | + | Min Interval | Low- | 100 | 85.7 | 23.2 |
| 6 | + | - | + | Adaptative | Low- | 100 | 78.8 | 14.9 |
| 7 | - | + | + | Min Interval | High | 100 | 95.9 | 22.8 |
| 8 | + | + | + | Adaptative | High | 100 | 95.6 | 39.8 |

Se realiza el ANOVA usando el software Statgraphics y se obtiene que el factor más significativo es el nivel de potencia (PL) para un nivel de confianza del 95% y en un nivel máximo (+), lo que indica que PL se debe configurar en High, un valor alto de PL permite que la señal cruce todo el perfil medido dentro del agua, aunque puede traer el inconveniente de rebote de la señal en el fondo. Los factores menos significantes se configuran en el valor óptimo encontrado en el ANOVA.

Efecto del tiempo de medición sobre la TKE_e

Como resultado de aplicar la metodología propuesta para determinar el tiempo de medición se encontraron los tiempos mínimos de medición para los diferentes perfiles distribuidos en el dominio del canal. Se realizaron seis mediciones en la parte curva del canal, tres a cero grados y tres a 60 grados, ya a 0.035m, 0.075m y 0.115m medidos desde la pared interna del canal curvo y, para un valor de $NSE > 75\%$; los datos se indican en la Tabla 2. Se observó que estos tiempos tienen una gran variabilidad espacial, con perfiles donde su variabilidad temporal es tan pequeña que son independientes del tiempo, hasta perfiles con tiempos de medición de aproximadamente una hora, por lo tanto, no se pudo establecer un patrón de variabilidad espacial de tiempos de medición dentro del dominio del canal. Tomando como criterio el valor absoluto de $NSE > 0.75$, se obtiene valores un poco menores, que entrarían en el rango de -aceptables- según el criterio expuesto anteriormente (Ritter and Muñoz-Carpena, 2013). Con este método el tiempo de medición es dependiente del valor adoptado del índice estadístico.

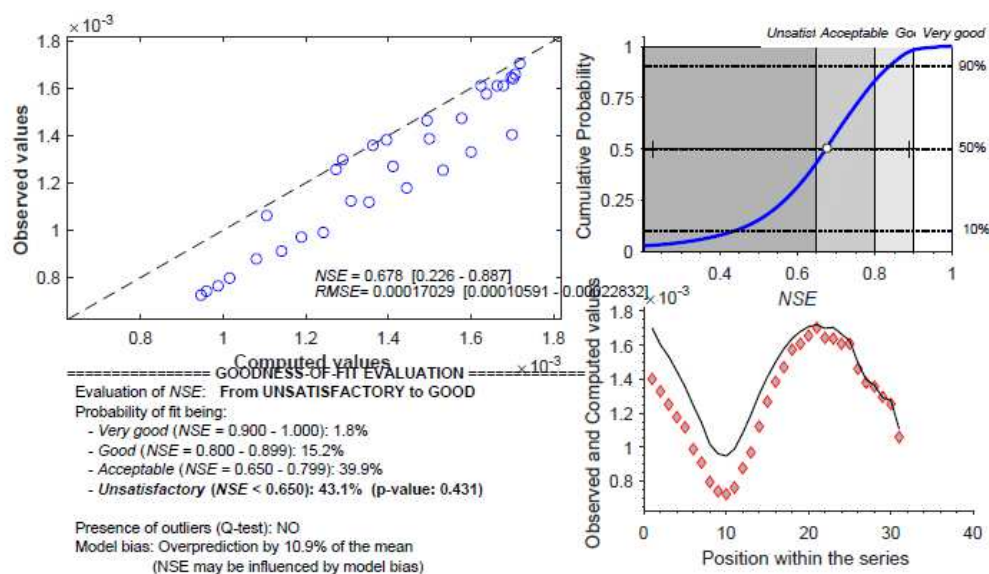
Tabla 2.- Tiempos de medición en minutos, de los seis perfiles medidos en el canal, para valores de $NSH > 75\%$

| Valor de NSE | 60gr0.035m | 60gr0.075m | 60gr0.115m | 0gr0.035m | 0gr0.075m | 0gr0.115m |
|--------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| > 0.75 | 0 | 49 | 1 | 18 | 16 | 32 |

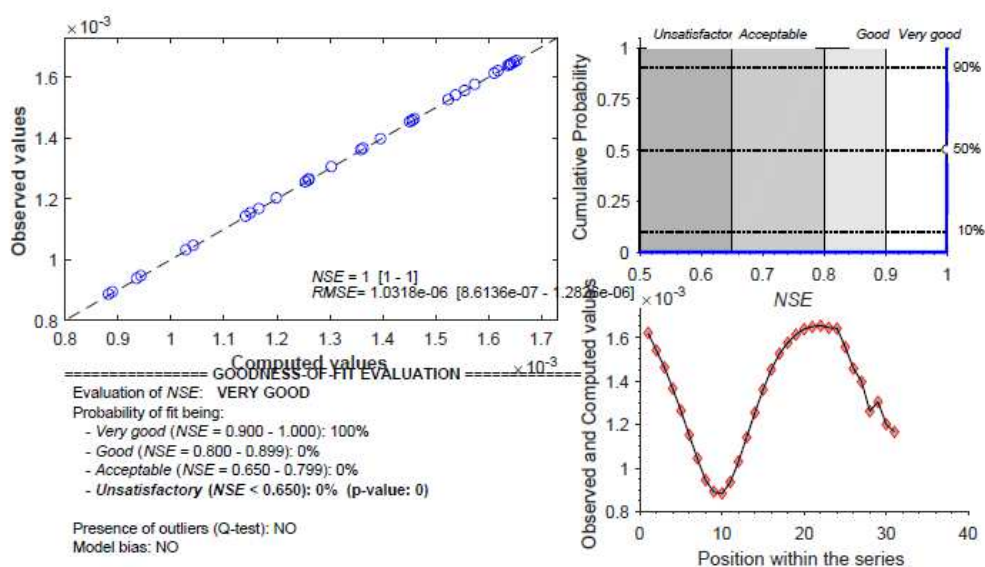
En la Figura 6, se indica el resultado de comparar dos pares de perfiles de TKE_e usando el software FITEVAL, el perfil de tiempo de medición de un minuto con el perfil de 10 minutos, Figura 6(a) y el perfil de 105 minutos con el perfil 120 minutos, Figura 6(b). Se observa que la probabilidad de que NSE esté entre el rango 0.9-1.0 para los perfiles de un minuto y dos minutos es de 1.8%, lo cual indica que estos perfiles están alejados más allá del rango de la probabilidad deseada y el segundo par de perfiles

Mayor Información

con una probabilidad del 100%, los cuales por corresponder a un largo periodo de medición están dentro de la probabilidad deseada.



(a)



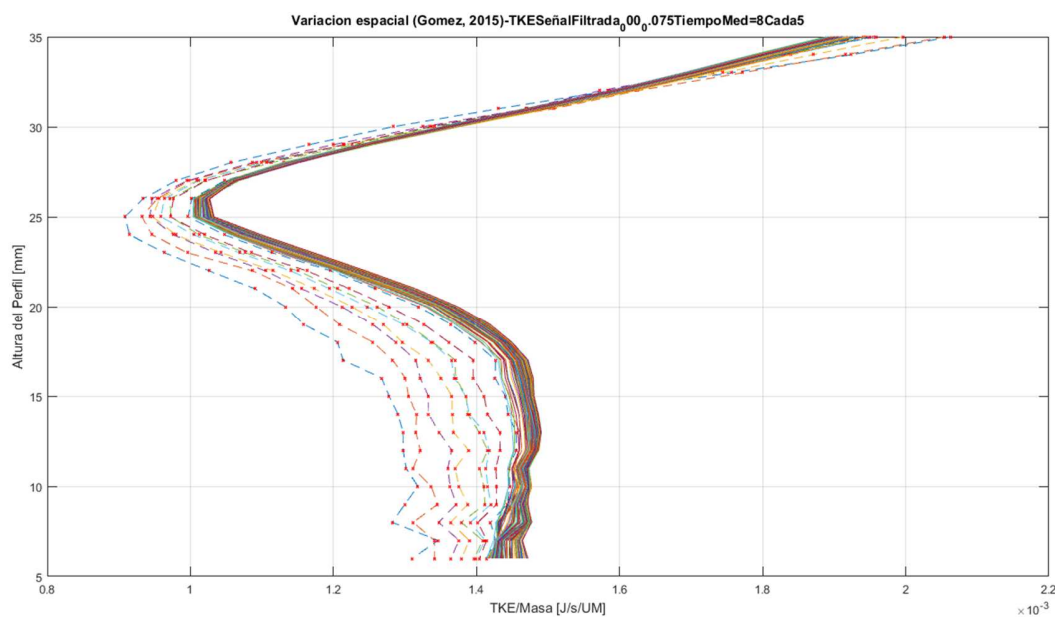
(b)

Figura 6.- Datos de salida del software FITEVAL, para la comparación de dos perfiles de TKE_e promedio en el tiempo de la sección $60^\circ-0.115m$. (a) Estadístico para el perfil de 1 minuto (\diamond) y perfil dos minutos ($--$). (b) Estadístico para el perfil 115 minutos (\diamond) y el perfil 120 minutos ($--$).

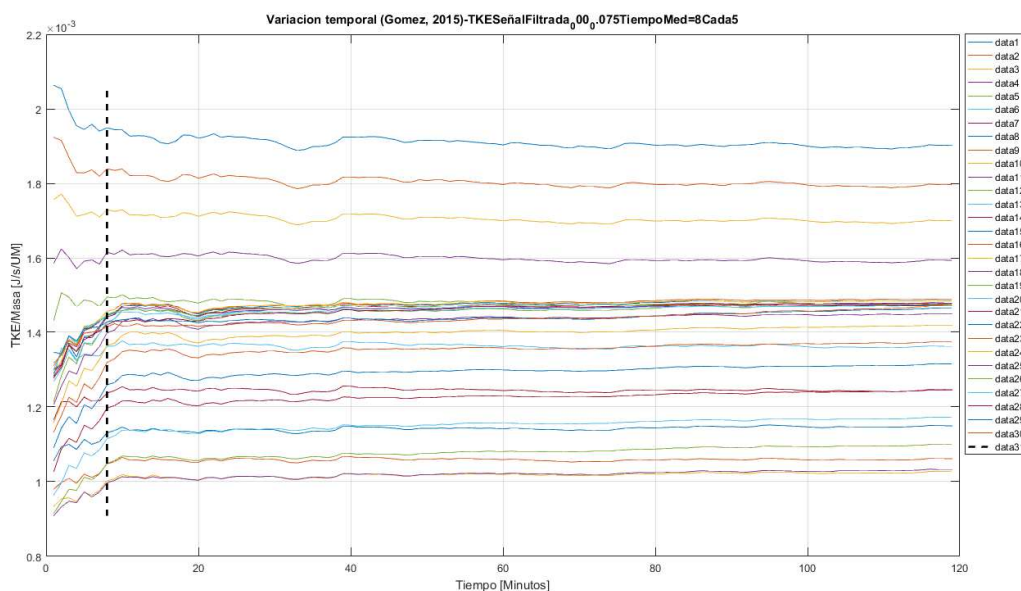
Aunque no hay antecedentes similares de este método aplicado a calcular tiempos de medición con dispositivos ADV, es bastante consistente con el comportamiento de los perfiles promedio en el tiempo, ya que al graficar la TKE_e contra el tiempo, Figura 7(a), para todos los puntos del perfil vertical, la señal tiende a estabilizarse con el tiempo, lo que indica que a partir de cierto tiempo de medición se consiguen perfiles promedios muy similares, este tiempo límite se indica con la línea punteada. En la

Mayor Información

Figura 7(b), se observa una mayor dispersión para tiempos cortos de medición y para tiempos mayores los perfiles verticales tienden a acomodarse en una franja más estrecha, que correspondería a la parte final de la curva en la Figura 7(a). Desafortunadamente el costo computacional de este método es importante, ya que cada vez que se hace el cálculo de la probabilidad se debe realizar el proceso de “bootstrapping” (Ritter and Muñoz-Carpena, 2013), (Zoubir and Boashash, 1998), (por ejemplo tres horas para datos a 100hz, en dos horas de medición, con subdivisiones de toda la señal cada minuto).



(a)



(b)

Figura 7.- Variación de TKE_e . (a) Variación de los promedios temporales de TKE_e para todos los puntos del perfil vertical (b) Variación temporal de los perfiles de TKE_e en un punto del perfil vertical, se tomó el de mayor dispersión (línea discontinua marca el tiempo mínimo de medición).

Mayor Información

Caracterización cualitativa del flujo secundario

Con los datos obtenidos en la campaña de medición en la cual se midieron los campos de velocidad, se obtuvieron las líneas de corriente (LC) para una caracterización cualitativa del flujo secundario y se calcularon los parámetros de intensidad del flujo. En la Figura 8 se indican los vectores transversales del flujo con sus respectivas LC. Los vectores tienen un factor de escalamiento geométrico de 0.1 según la función *quiver* de Matlab, los cuales pueden ser extraídos con una herramienta Cad.

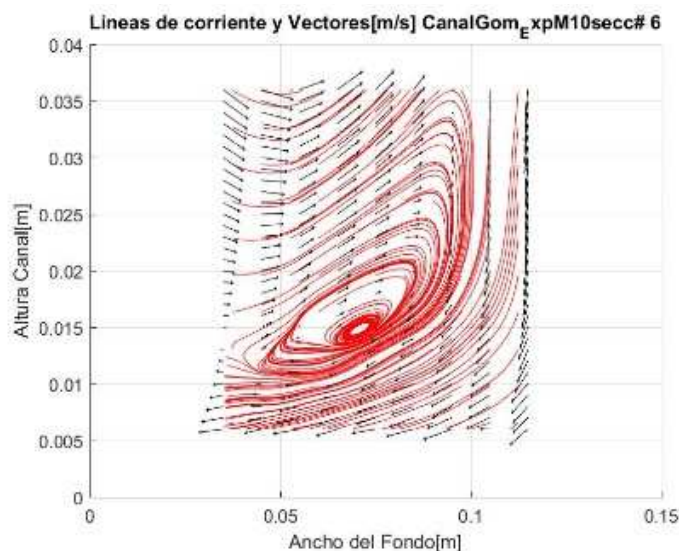


Figura 8.- Vectores de velocidad y líneas de corriente para la sección transversal de 50°. Margen izquierda de la figura corresponde a la pared interna del canal curvo.

Debido a las limitaciones geométricas del ADVPII para instalarlo dentro del canal de 0.15m de ancho, no permite identificar el flujo vortical en toda la sección, pero nos brinda una primera aproximación de cómo es su comportamiento. Según los patrones de las líneas de corriente a partir de la sección transversal de 20°, se empieza a desarrollar un flujo secundario más definido, en las dos primeras secciones no es claro el patrón de flujo.

Caracterización cuantitativa del flujo secundario

Una vez identificado el patrón de flujo en el cual se observa claramente el flujo secundario en la zona medida, se cuantifica la ICS usando el concepto de helicidad, el cambio de esta variable con respecto al ángulo de curvatura se muestra en la Figura 9, para el canal de la presente investigación (convención “Gómez”) y los datos reportados para un canal curvo dados por (Bai et al., 2014), en la cual se observa un valor máximo en la sección de 60° para los datos de Bai y una tendencia similar para los datos del presente trabajo, lo que indica que el comportamiento es comparable y que los datos experimentales obtenidos en la presente investigación representan el fenómeno físico estudiado.

Mayor Información

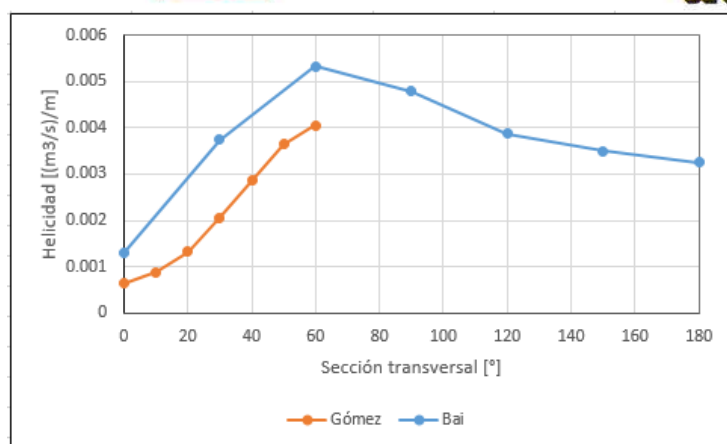


Figura 9.- Variación de la helicidad con respecto a las secciones transversales en grados del canal curvo.

CONCLUSIONES

Se realiza un análisis de sensibilidad de los parámetros de entrada del ADVPII con respecto a COR y SNR con base el diseño estadístico de experimentos. Encontrando que el nivel de potencia de la señal acústica es el parámetro que mayor influencia tiene en el valor de SNR y COR. Se considera que el DEE junto con ANOVA son adecuados para el estudio de los efectos de parámetros independientes sobre variables de respuesta en este tipo de fenómenos.

Se propuso una nueva metodología para encontrar el tiempo de medición basado en TKM y criterios estadísticos de bondad de ajuste. Los cuales proporcionan valores coherentes del tiempo de medición. Aunque los valores obtenidos son más conservadores con datos de tiempos de medición reportados en la literatura, brinda órdenes de magnitud del tiempo de medición. Se considera que tomando un tiempo máximo de los tiempos estimados, con el método propuesto se puede obtener una buena calidad de los datos de velocidad.

Se obtuvo datos de experimentación física usando el ADVPII para flujo en canales curvos. Se encontró que estos datos son coherentes con lo reportado en la literatura, donde se pudo identificar la formación de flujo secundario en diferentes secciones transversales del canal curvo. Los datos pueden ser usados para calibración y validación de modelos numéricos hidrodinámicos en canales curvos usando los datos experimentales.

REFERENCIAS

- Bai, Y., Song, X., Gao, S., 2014. Efficient investigation on fully developed flow in a mildly curved 180° open-channel. *J. Hydroinformatics* 16, 1250–1264.
- Berger, M.A., Field, G.B., 1984. The topological properties of magnetic helicity. *J. Fluid Mech.* 147, 133. <https://doi.org/10.1017/S0022112084002019>
- Carrillo, S.J.M., 2016. Programa de Doctorado: Medio Ambiente y Minería Sostenible. Trabajo fin de Período Formativo. [Documento]. Grupo de Investigación en Ingeniería Hidráulica Marítima y Medioambiental. Universidad Politécnica de Cartagena.
<https://www.upct.es/hidrom/publicaciones/Tesis_pfc/Carrillo_2013_DEA_Trabajo_Fin_Periodo_Formativo.pdf> (accessed on 02 Nov. 2016).

Mayor Información



- Craig, R.G.A., Gómez, H.J.Z., 2015. Measurement of velocity fields in curved open channel. — Nortek International— Forum. [WWW Document]. URL <http://www.nortek-as.com/en/knowledge-center/forum/vectrinoii/410236394> (accessed 11.10.16).
- Craig, R.G.A., Loadman, C., Clement, B., Rusello, P.J., Siegel, E., 2011. Characterization and testing of a new bistatic profiling acoustic Doppler velocimeter: The Vectrino-II. IEEE, pp. 246–252. <https://doi.org/10.1109/CWTM.2011.5759559>
- García, C.M., Cantero, M.I., Niño, Y., García, M.H., 2005. Turbulence Measurements with Acoustic Doppler Velocimeters. J. Hydraul. Eng. 131, 1062–1073. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2005\)131:12\(1062\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:12(1062))
- Gómez-Zambrano, H.J., 2017. Investigación experimental y numérica del proceso de separación fluido-sólidos usando conductos curvos (Experimental and numerical research of the fluid-solids separation in curved open channels) (Ph.D Thesis). Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia.
- Goring, D.G., Nikora, V.I., 2002. Despiking acoustic Doppler velocimeter data. J. Hydraul. Eng. 128, 117–126.
- Gunawan, B., Neary, V.S., McNutt, J.R., 2011. Ornl adv post-processing guide and matlab algorithms for mhk site flow and turbulence analysis [WWW Document]. UNT Digit. Libr. URL <http://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc837681/m1/13/> (accessed 11.1.16).
- Gutiérrez, P.H., De la Vara, S.H., 2012. Análisis y diseño de experimentos, 2da ed. McGraw-Hill, Mexico D.F.
- Herrero, H.S., 2014. Evolución espacial y temporal de la hidrodinámica en confluencias fluviales (PhD Thesis). UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA, Córdoba, Argentina.
- Moffatt, H.K., Tsinober, A., 1992. Helicity in laminar and turbulent flow. Annu. Rev. Fluid Mech. 24, 281–312. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.24.010192.001433>
- Nortek AS, 2016. Operation of the Nortek Vectrino Profiler. [Video]. <<http://www.nortek-as.com/en/knowledge-center/operation-of-the-nortek-vectrino-profiler>> (accessed on 02 Oct. 2016).
- Nortek USA, 2016. Vectrino Profiler — Nortek USA [WWW Document]. URL <http://www.nortekusa.com/usa/products/acoustic-doppler-velocimeters/vectrino-ii> (accessed 8.31.16).
- Nortek USA, 2012. Vectrino II A profiling bi-static acoustic velocimeter [WWW Document]. True Innov. Makes Differ. URL http://www.nortekusa.com/usa/library/data/vectrino-ii-introduction/at_download/file. (accessed 11.1.16).
- Ritter, A., Muñoz-Carpena, R., 2016. FITEVAL for Windows [Computer software]. Hydrology and Water Quality. Departament of Agricultural & Biological Engineering. University of Florida. <<http://abe.ufl.edu/Carpena/software/fiteval.shtml>> (accessed on 4 Sep. 2016).
- Ritter, A., Muñoz-Carpena, R., 2013. Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. J. Hydrol. 480, 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.004>
- Van Balen, W., 2010. Curved open-channel flows - a numerical study (PhD Thesis). Civil Engineering and Geosciences, Technische Universiteit Delft-Netherlands.
- Wallace, J.M., Hobbs, P.V., 2006. Atmospheric Science: An Introductory Survey. Academic Press.
- Zoubir, A.M., Boashash, B., 1998. The bootstrap and its application in signal processing. IEEE Signal Process. Mag. 15, 56–76. <https://doi.org/10.1109/79.647043>

Mayor Información