

MODELACIÓN NUMÉRICA DE LA DISTRIBUCIÓN BIDIMENSIONAL DE LA VELOCIDAD MEDIA LONGITUDINAL EN CANALES A SUPERFICIE LIBRE UTILIZANDO DATOS DE LSPIV

NUMERICAL MODELING OF THE TWO-DIMENSIONAL DISTRIBUTION OF MEAN LONGITUDINAL VELOCITY IN CHANNELS AT FREE SURFACE USING LSPIV DATA

Rodrigo N. Schöninger^a, Juan F. Weber^c, Leticia Tarrab^a, Leandro Massó^{a,b}, Antoine Patalano^{a,b}, Andrés Rodríguez^{a,b}

^a LH-CETA. Laboratorio de Hidráulica – Centro de Estudios y Tecnología del Agua, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, http://www.inv.lab_hidraulica.efn.uncor.edu/

^b IDIT. Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología (IDIT CONICET/UNC). FCFyN, Córdoba, Argentina, <http://www.inv.idit.efn.uncor.edu/>

^c GRHiS. Grupo de Investigación, Desarrollo y Transferencia en Recursos Hídricos y Saneamiento. Facultad Regional Córdoba, Argentina, <https://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/hidraulica/>

Palabras clave: Hidrodinámica, Velocimetría por Imágenes, Diferencias Finitas.

Resumen. Se presentan aplicaciones de un modelo, basado en las ecuaciones de Navier-Stokes, para estimar la distribución de la componente longitudinal de velocidad en la sección, promediada en el tiempo, para canales abiertos con flujo uniforme y estacionario. El modelo está constituido por una ecuación diferencial en derivadas parciales elíptica, no homogénea, sobre la cual se aplicó el método de diferencias finitas para su resolución. Se implementó el modelo en un canal en el que se dispone de información sobre el campo de velocidades superficiales medidos con técnicas de velocimetría por imágenes. Los resultados obtenidos por modelación permiten estimar la distribución de velocidades y el caudal. Para el caso de estudio, además, el perfil lateral de velocidades medias obtenido por modelación es comparado con mediciones realizadas en la sección con un perfilador acústico doppler lo que permitió ajustar los parámetros del modelo e investigar sobre la distribución de velocidades obtenida en la modelación.

Keywords: Hydrodynamics, Imaging Velocimetry, Finite Differences.

Abstract. Applications of a model based on the Navier-Stokes equations are presented for estimating the distribution of the longitudinal component of velocity in the cross-section, time-averaged, for open channels with uniform and steady flow. The model consists of a non-homogeneous elliptic partial differential equation, for which the finite difference method was applied for its resolution. The model was implemented in a channel where information about the surface velocity field was available, measured using image velocimetry techniques. The results obtained through modeling allow for the estimation of velocity distribution and discharge. Additionally, for the case study, the lateral profile of mean velocities obtained through modeling is compared with measurements taken at the section using an Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), which allowed for the adjustment of model parameters and investigation into the velocity distribution obtained in the modeling.

1. INTRODUCCIÓN

El agua es, por la propia naturaleza humana, un recurso de vital importancia para el desarrollo. Al recorrer la historia de las más reconocidas civilizaciones antiguas en el Medio Oriente, África oriental e inclusive poblaciones precolombinas en América podemos ver vestigios de esta realidad (por la ubicación de las localidades, los sistemas de riego y abastecimiento, etc.) (Girón, 1985). En los tiempos contemporáneos, se dispone de modernos -y complejos- sistemas de captación, regulación y abastecimiento de agua; se destinan grandes inversiones a la infraestructura hídrica ya que se trata de necesidades vitales y básicas para la sociedad. Por lo tanto, podemos afirmar que el agua era un problema central en la antigüedad; es un problema central en la actualidad y, presumiblemente, será un problema central en el futuro. Es por ello que tanto esfuerzo se ha dedicado desde diferentes disciplinas para conocer y caracterizar los servicios ambientales asociados al ciclo hidrológico. Dentro de ese gigantesco ciclo natural -que moviliza el agua en el mundo- se encuentran nuestros ríos y arroyos. En el estudio particular de estos canales naturales se pueden abordar múltiples aspectos que se engloban fundamentalmente en dos áreas: (1) calidad de aguas y (2) cantidad, es decir, caudales; Schöninger *et al.* (2023).

En la actualidad, dentro de las técnicas de aforo en campo más novedosas se encuentran la de velocimetría por imágenes de partículas y la de velocimetría por seguimiento de partículas, ambas aplicadas a gran escala (LSPIV/LSPTV respectivamente, por sus siglas en inglés); cuya finalidad es estimar el campo de velocidades superficiales mediante filmaciones con cámaras de video. Luego, para estimar un caudal, estas velocidades superficiales se transforman a velocidades medias usando un coeficiente, que se denomina comúnmente con la letra α , definido de la siguiente manera (Patalano, 2017):

$$\alpha = \frac{U_{media}}{U_{superficial}} \quad (1)$$

Este coeficiente se multiplica por la velocidad superficial en cada vertical para obtener la velocidad media en esa misma progresiva, es decir, de la distribución lateral de velocidades superficiales se obtiene una distribución lateral de velocidades medias. Usualmente se utiliza un valor de α constante en todo el ancho, tomando valores en el rango de 0.80 a 0.93 (Patalano, 2017). Esto se justifica para la estimación de caudales teniendo en cuenta el orden de incertidumbre con el que se trabaja usualmente en el ámbito de la hidrología. No obstante, en este trabajo se analiza una alternativa superadora a esta perspectiva involucrando un modelo matemático basado en las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en el tiempo (ecuaciones RANS) para estimar el campo de velocidad media longitudinal en toda la sección imponiendo como condición de contorno el perfil lateral de velocidades superficiales obtenidos por velocimetría de imágenes. El modelo matemático utilizado fue desarrollado originalmente por Weber y Martijena (2008) y contrastado por los mismos autores en modelaciones de canales de laboratorio con secciones rectangular y trapezoidal. En este caso, se trata de una sección trapezoidal de un canal de riego ubicado en la localidad de Villa Dolores, Provincia de Córdoba, Argentina. Los objetivos perseguidos son la mejora en la estimación de caudales por una metodología mixta (experimental-modelación) que involucre mediciones por velocimetría de imágenes junto con la modelación tal como se mencionó anteriormente y, además, la obtención de curvas que muestren la variación la relación α a lo largo del ancho del canal.

2. DISTRIBUCIONES DE VELOCIDAD

El conocimiento de la distribución transversal de la velocidad media en canales abiertos es fundamental debido a que aporta información para el estudio detallado en las dos áreas mencionadas (calidad de aguas y, caudales). Además, desde un punto de vista científico, poder modelar la distribución transversal de la velocidad en canales abiertos representa un fin en sí mismo. El interés por esta temática no es nuevo, de hecho, varios autores ya desde finales del siglo XIX y principios del siglo XX, con las herramientas teóricas y experimentales de la época, han estudiado y caracterizado las distribuciones transversales de la velocidad en cauces naturales (Forchheimer, 1935). Algunos trabajos, como Gibson (1909), ya dilucidaron aspectos fundamentales como la observación de que normalmente la velocidad máxima se encuentra por debajo de la superficie libre y que la posición en la vertical de esta velocidad, para la zona central del canal, está en función de la relación de aspecto $A_r = B/H$, donde B y H son el ancho y la altura promedio, respectivamente. El avance posterior en las investigaciones esclareció como estas observaciones podían ser explicadas por la existencia de corrientes secundarias de velocidad cuyos vórtices están regidos por la relación de aspecto A_r . Para canales angostos ($A_r < 5$) la velocidad máxima tiende a estar por debajo de la superficie en la zona central y, para canales anchos ($A_r > 10$), el fenómeno desaparece (en la zona central) (Chow, 1994). Esto se explica por un patrón de celdas de recirculación diferente en ambos casos (Figura 1).

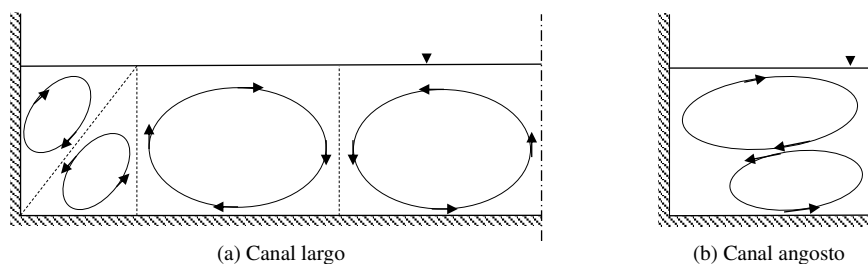


Figura 1: Celdas de recirculación. Basado en Dey, S. (2014), pág. 134.

En un canal angosto se produce un patrón muy influido por el efecto de las paredes laterales creándose un vórtice en la superficie libre y un vórtice inferior (Figura 1b). A medida que la relación de aspecto crece el vórtice superior desaparece gradualmente en la zona central (Figura 1a). El efecto de caída de velocidad está dado por el vórtice superior que transfiere cantidad de movimiento desde los filetes de líquido en lo alto hacia la región central. Estas corrientes secundarias hacen que el perfil de velocidad en la zona central en un canal angosto, con $A_r < 5$, tienda a un máximo en una posición que está por debajo de la superficie libre. No obstante, es importante aclarar que este fenómeno desaparece en la zona central de los canales anchos, pero sigue presente en la zona de los taludes laterales. Esta última afirmación empírica demuestra por sí misma que el valor de la relación α entre velocidad superficial y velocidad media en cada vertical no es constante a lo largo del ancho y esto repercute de forma desfavorable en la determinación por velocimetría de imágenes.

Por otra parte, en las mediciones en campo con perfilador acústico doppler (ADCP, por sus siglas en inglés), las velocidades no son determinadas en las zonas cercanas a los taludes, al fondo y en la superficie, sino estimadas por métodos de cálculo (por las limitaciones propias del aparato), teniendo también un impacto negativo sobre la incertidumbre en la determinación del caudal (esta incertidumbre es mayor cuanto más angosto es el canal). Esto justifica el interés por una perspectiva mixta para calcular caudales (experimental-modelación).

3. MODELO MATEMÁTICO

Aquí se expresan las ecuaciones matemáticas fundamentales del modelo y las hipótesis utilizadas. Como se mencionó previamente, los autores del modelo parten de las ecuaciones RANS escritas para la dirección principal de flujo, es decir, la longitudinal, que se hace coincidir con el eje x de un sistema coordenado ubicado en la sección tal como se muestra en la Figura 2.

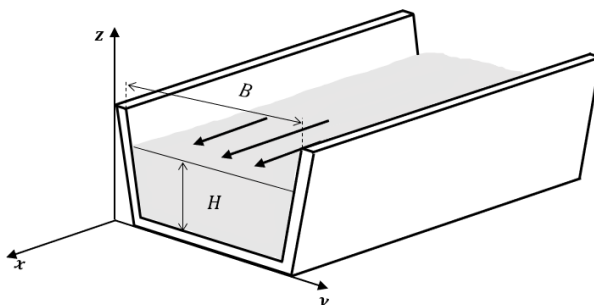


Figura 2: Esquema de ubicación de ejes en relación al sentido de flujo.

Luego, considerando las hipótesis usuales de flujo uniforme, estacionario y, despreciando las componentes de velocidad asociadas a las corrientes secundarias y los efectos viscosos -que se concentran en las cercanías de la pared- se obtiene la ecuación gobernante para distribución de la velocidad media longitudinal en la sección (Weber y Martijena, 2008):

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_{yx} \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_{zx} \frac{\partial U}{\partial z} \right) = -gS_0 \quad (2)$$

Donde U es la velocidad, media temporal, en la dirección x (longitudinal), S_0 es la pendiente de fondo y g es la aceleración gravitatoria. Los parámetros ϵ_{yx} y ϵ_{zx} son las viscosidades de torbellino en la dirección lateral y vertical, respectivamente; se trata de parámetros asociados a la transferencia de cantidad de movimiento en un flujo turbulento. Para su cuantificación se proponen las siguientes ecuaciones:

$$\epsilon_{yx} = U_c \kappa y \left(1 - \frac{y}{B} \right); \quad \epsilon_{zx} = U_c \kappa z \left(1 - \frac{z}{H} \right) \quad (3)$$

Donde B es el ancho de boca del canal, H es la profundidad de flujo, $\kappa = 0.41$ es la constante de Von Karman. Weber y Martijena (2008) proponen una función definida por tramos para ϵ_{yx} , no obstante, para este trabajo se han considerado las ecuaciones análogas definidas anteriormente.

4. SOLUCIÓN POR EL MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS

Como se ha mostrado en el apartado anterior, el modelo se basa en una ecuación diferencial en derivadas parciales (EDP) elíptica y no homogénea (ecuación 2). Para resolverla, y obtener la distribución de velocidades $U = U(y, z)$, se utilizó el método de diferencias finitas (MDF), implementado por medio de un programa escrito en el lenguaje de programación *Python*. El MDF es un método numérico que permite transformar una EDP en un sistema de ecuaciones algebraicas (lineales, si la EDP es lineal, como en este caso). Para hacer la transformación se aproximan las derivadas exactas con diferencias finitas divididas (denominadas *derivadas numéricas*). Las ecuaciones algebraicas resultantes pueden ser resueltas de dos maneras: (a) por solución directa o (b) de forma iterativa. En este caso se ha propuesto una solución iterativa o método de relajación.

4.1. Discretización y geometría

El primer paso de la solución por el MDF consiste en la discretización del dominio (la sección del canal). Para ello, se utiliza una malla rectangular de ancho B (igual al ancho de boca del canal) y altura H (igual a la mayor profundidad del canal) con n nodos en el eje y (horizontal) y m nodos en el eje z (vertical). La cantidad de nodos es calculada a partir de especificar una discretización Δ_y en la dirección horizontal y Δ_z en vertical (aunque el programa permite utilizar discretizaciones independientes se busca hacerlas similares en magnitud). Esta malla rectangular se superpone sobre la sección (trapezoidal, en este caso) y el programa selecciona aquellos nodos que quedan dentro del dominio de cálculo (es decir, dentro de la sección). El siguiente paso consiste en obtener las ecuaciones de cálculo en diferencias finitas necesarias para generar el sistema de ecuaciones algebraicas cuyas incógnitas serán los valores de velocidad U en cada nodo. Esto consiste en obtener una ecuación algebraica general, denominada *molécula de cálculo*, cuya aplicación sucesiva sobre en los nodos interiores al dominio de solución (es decir, los nodos que no son condición de contorno) origina el sistema de ecuaciones algebraicas a resolver. Esta fórmula se presenta en el subapartado siguiente.

4.2. Molécula de cálculo

En los nodos interiores del dominio de solución la molécula de cálculo resultante es de cinco puntos y posee la siguiente forma:

$$a_{i,j}U_{i,j} + b_{i,j}U_{i,j+1} + c_{i,j}U_{i,j-1} + d_{i,j}U_{i-1,j} + e_{i,j}U_{i+1,j} + f = 0 \quad (4)$$

Donde el subíndice i indica la ubicación del nodo según el eje z y el subíndice j indica la ubicación del nodo según el eje y , de tal forma que se puede pasar del espacio de coordenadas al espacio de índices de forma inequívoca (es decir, cada nodo posee un par coordenadas cartesianas y dos índices). Los coeficientes que multiplican a las velocidades $U_{i,j}$ se definen de la siguiente manera:

$$a_{i,j} = -2 \left(\frac{\epsilon_{yx_{i,j}}}{\Delta_y^2} + \frac{\epsilon_{zx_{i,j}}}{\Delta_z^2} \right); b_{i,j} = \frac{\epsilon_{yx_{i,j}}}{\Delta_y^2} + \frac{\epsilon'_{yx_{i,j}}}{2\Delta_y}; c_{i,j} = \frac{\epsilon_{yx_{i,j}}}{\Delta_y^2} - \frac{\epsilon'_{yx_{i,j}}}{2\Delta_y}; \quad (5)$$

$$d_{i,j} = \frac{\epsilon_{zx_{i,j}}}{\Delta_y^2} + \frac{\epsilon'_{zx_{i,j}}}{2\Delta_z}; e_{i,j} = \frac{\epsilon_{zx_{i,j}}}{\Delta_z^2} - \frac{\epsilon'_{zx_{i,j}}}{2\Delta_z}; f = gS_0$$

Donde $\epsilon'_{yx_{i,j}} = \partial \epsilon_{yx_{i,j}} / \partial y$ y $\epsilon'_{zx_{i,j}} = \partial \epsilon_{zx_{i,j}} / \partial z$ son las derivadas parciales de las viscosidades turbulentas respecto a su variable correspondiente. El término f es una constante mientras que los demás coeficientes son variables conformando una matriz con un valor en cada nodo del dominio solución.

Con el objetivo de mejorar la velocidad de convergencia de este método se usó la sobre-relajación simultánea (SOR) que se basa en ponderar dos iteraciones sucesivas (k y $k + 1$) mediante un parámetro ω (Smith, 1985):

$$U_{ij}^{k+1} = \omega U_{ij}^{k+1} + (1 - \omega) U_{ij}^k \quad (6)$$

Se llama sobre-relajación cuando el parámetro ω está contenido en el intervalo entre 1 y 2. Para el caso particular de $\omega = 1$ la ponderación desaparece (Chapra y Canale, 2011).

4.3. Condiciones de contorno

Para resolver la EDP deben fijarse las condiciones en todo el contorno mojado de la sección y sobre la superficie libre. En este caso, se imponen condiciones de borde esenciales, es decir, en el propio valor de la velocidad U .

Los valores de la velocidad U en el contorno rígido no son especificados sobre pared debido a que el modelo no considera los efectos viscosos, que son dominantes en la región de la capa límite más cercana a la pared, denominada subcapa viscosa; por lo tanto, los nodos adyacentes a las paredes estarán situados a una distancia $d > \delta$, siendo δ el espesor de la subcapa. A partir de distancia d los efectos viscosos son insignificantes frente a las tensiones turbulentas. Se pueden dar tres casos a tener en cuenta: (1) fondo hidráulicamente liso; (2) fondo de transición y (3) fondo hidráulicamente rugoso. Estrictamente hablando, en un fondo hidráulicamente rugoso se rompe la subcapa viscosa y no es correcto hablar de su espesor, no obstante, debido a las complejidades inherentes a esa zona inferior de la capa límite y, teniendo en cuenta las irregularidades que se pueden presentar en los ríos y canales desgastados, se ha optado por situar los primeros nodos, inclusive en el caso de fondo hidráulicamente rugoso, por encima del nivel de fondo, a una distancia prudencial de $5z_0$, siendo $z_0 = k_s/30$, el nivel (medido desde un fondo de referencia) donde la velocidad es cero y a partir del cual se comienza a desarrollar el perfil y k_s la rugosidad equivalente de Nikuradse.

Para poder caracterizar el régimen de flujo en las cercanías de la pared se utiliza el número de Reynolds de grano $R_e^* = U_c k_s / \nu$. Según este criterio, se considera fondo hidráulicamente liso cuando $R_e^* \leq 5$, fondo hidráulicamente rugoso si $R_e^* \geq 70$ y, en la zona intermedia ($5 < R_e^* < 70$), se considera la transición (Dey, 2014). Para incluir todas las posibilidades de manera en el programa se ha utilizado la ecuación de Swamee (1993) que permite estimar los perfiles de velocidad de pared tanto para la subcapa laminar como para la zona turbulenta. Así mismo, permite una aproximación de las velocidades en la zona de amortiguación intermedia.

$$U^+ = \left\{ (z^+)^{-\frac{10}{3}} + \left[\frac{1}{\kappa} \ln \left(1 + \frac{9z^+}{1 + 0,3R_e^*} \right) \right]^{-\frac{10}{3}} \right\}^{-0,3} \quad (7)$$

Donde el superíndice “+” indica una variable adimensionalizada; $U^+ = U/U_c$, $z^+ = U_c z / \nu$. Esta formulación tiene la ventaja de ser válida para fondo hidráulicamente liso y para fondo hidráulicamente rugoso.

Para la superficie libre se usaron los datos obtenidos por velocimetría de imágenes de partículas (LSPIV) como condición de contorno (Figura 3). Debido a que la discretización horizontal de la sección en general no coincide con los puntos dato, se utilizan interpolaciones para aproximar los puntos intermedios necesarios.

5. DATOS UTILIZADOS

La información utilizada para las modelaciones fue extraída de Massó (2022). Como se mencionó anteriormente, el caso de estudio se trata de un canal de riego de sección trapezoidal ubicado en la localidad de Villa Dolores, provincia de Córdoba, Argentina. Las mediciones fueron llevadas a cabo en el contexto de una ‘regata’ de mediciones interinstitucional, metodología usualmente empleada a nivel mundial para capacitar a técnicos, verificar instrumental y homogeneizar metodologías de medición con diferentes técnicas. En esta ocasión se realizaron mediciones de caudal líquido con técnicas hidroacústicas y de velocimetría por imágenes digitales en el canal en cuestión. En particular, se utilizaron perfiladores de corriente acústicos doppler (ADCP), velocímetros acústicos doppler (ADV) y la técnica de velocimetría por imágenes de partículas a gran escala (LSPIV). En relación a las mediciones con equipos hidroacústicos, se desarrollaron en base a las recomendaciones definidas por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). De esta regata, además de la cuantificación del caudal líquido escurrido,

se obtuvieron perfiles de velocidades medias sobre una sección transversal (a partir de las mediciones con ADCP, en particular se utilizaron modelos de equipos S5 y M9 de la firma Sontek), y perfiles de velocidades medias a diferentes profundidades a partir de mediciones con ADV (se utilizaron equipos Flow Tracker II de la firma Sontek). En relación a las técnicas por imágenes, se aplicaron las metodologías definidas por Patalano (2017), haciendo uso del paquete computacional RIVeR para el procesamiento del material digital registrado. Las secuencias de imágenes fueron capturadas por una cámara digital GoPro Hero5 ubicada en el centro del canal con visual hacia aguas abajo. De su procesamiento se obtuvo el campo superficial de velocidades medias en el área de estudio, y a partir de éste una estimación del caudal líquido escurrido adoptando un valor del coeficiente α de 0.89, ajustado en base a las mediciones obtenidas con ADCP. El caudal obtenido con ADCP es de $3.74 \text{ m}^3/\text{s}$ con una velocidad media de flujo de 0.88 m/s . En base al coeficiente α ajustado el caudal por velocimetría de imágenes es de $3.18 \text{ m}^3/\text{s}$. En la Figura 3 se muestra el perfil de velocidades superficiales obtenido con LSPIV que se utilizó como condición de contorno en la superficie para el modelo ajustado en el presente trabajo.

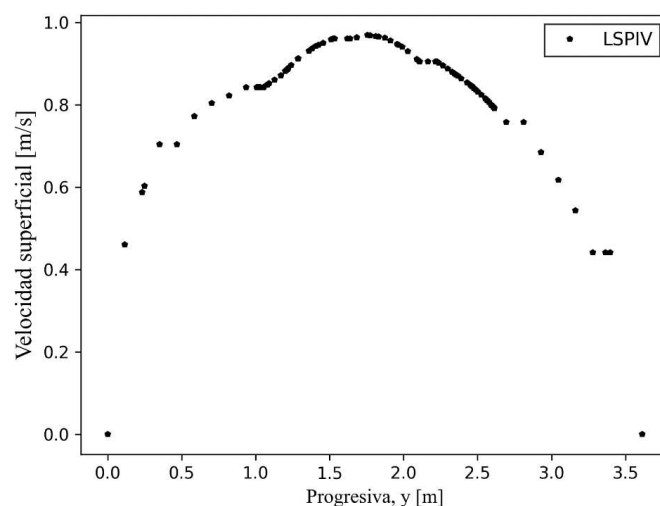


Figura 3: Perfil lateral de velocidades superficiales medido con LSPIV.

6. RESULTADOS

La implementación del modelo descrito permitió obtener una estimación de la distribución de la velocidad longitudinal $U = U(y, z)$, promediada en el tiempo, en toda la sección transversal del canal. Estos resultados se compararon en base a los datos que se dispone, presentados anteriormente. Los valores y parámetros utilizados en los cálculos se resumen en la Tabla 1:

k_s [mm]	S [m/m]	Cant. de nodos	Separación entre nodos $\Delta_y = \Delta_z$ [cm]	ω (SOR)
1	0.0016	51042	1	1.95

Tabla 1: Parámetros introducidos al programa.

Por su parte, los resultados de esta modelación se presentan en la Tabla 2:

U_{media} [m/s]	A [m ²]	Q [m ³ /s]	R_e^*	Iteraciones (SOR)	Tiempo de ejecución [min]
0.88	4.61	4.07	529	1343	1.8

Tabla 2: Resumen de los resultados de la modelación.

En la Figura 4 se muestra el perfil lateral de velocidades medias obtenido a partir de la modelación; junto a este, se coloca una serie de puntos que se corresponden con el perfil lateral de velocidades medias, en cada vertical, obtenidas de tres transectas con ADCP.

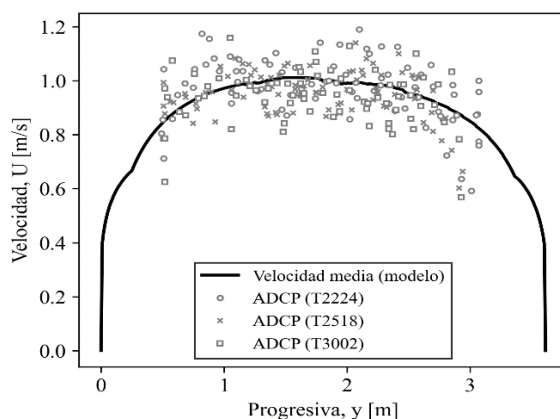


Figura 4: Perfil lateral de velocidades (modelo) junto a tres transectas medidas con ADCP.

Puede notarse que el perfil lateral de velocidades medias presenta una forma muy semejante a lo esperado teóricamente para un canal de este tipo. En los laterales del perfil modelado pueden verse quiebres que se deben al efecto de los taludes del canal. Los puntos obtenidos con ADCP presentan una considerable dispersión (debido a que son valores de transectas individuales sin promediar), no obstante, se ajustó el modelo para que representara una zona intermedia de estos valores. En la Figura 5 se muestra la distribución para el coeficiente α resultante de hacer el cociente entre el perfil lateral de velocidades medias mostrado previamente y el perfil de velocidades superficiales obtenido por LSPIV. A simple vista se observa que la distribución no es uniforme a lo ancho del canal, el valor medio obtenido es de 1.17, lo cual representa casi un 24% de variación con respecto al valor de 0.89 estimado en base a las mediciones con ADCP. Se calculó también un valor medio considerando solo la zona central del canal coincidente con la región de medición del ADCP resultando en un valor de 1.13, siendo un 21% superior al valor estimado con las técnicas hidroacústicas. Todo esto puede ser atribuible a que en este caso se trata de un canal angosto donde el instrumento hidroacústico presenta limitaciones debido a que no permite medir las regiones cercanas a los taludes, así como la cercana al fondo, por el principio de funcionamiento del aparato, y la zona superior por la propia intrusión del instrumento.

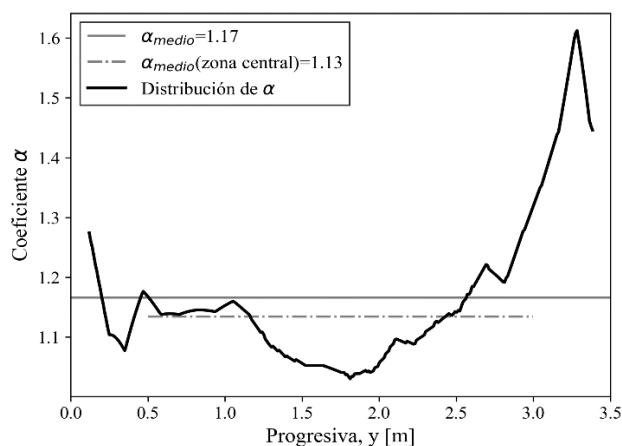


Figura 5: Distribución lateral del coeficiente α

La forma de la sección del canal introducida al modelo (batimetría) fue relevada con el instrumento hidroacústico en la zona del fondo (notar la acumulación de sedimentos en la zona central y hacia margen la derecha) y, además, relevada manualmente para poder corregir los taludes. Se destaca que el caudal obtenido en la modelación es, aproximadamente, un 8% superior al obtenido por las mediciones con ADCP.

En la Figura 6 se observa que para este canal el efecto de las paredes es muy fuerte y asemeja el flujo al de un tubo. El ADCP mide, en este caso, en una zona que coincide en gran medida con la región central donde las velocidades y, por lo tanto, el porcentaje de caudal que atraviesa la sección es mayor. Las diferencias de caudales entre la metodología mixta (modelación-LSPIV) y el instrumento hidroacústico (ADCP) son apreciables y, debido a las limitaciones propias del instrumento de medición para este tipo de casos, la metodología mixta presentada muestra claras ventajas desde el punto de vista económico y técnico debido a que se modela en base a las ecuaciones RANS toda la distribución de velocidades y el instrumento puede, en este caso, medir un porcentaje reducido del perfil de velocidades.

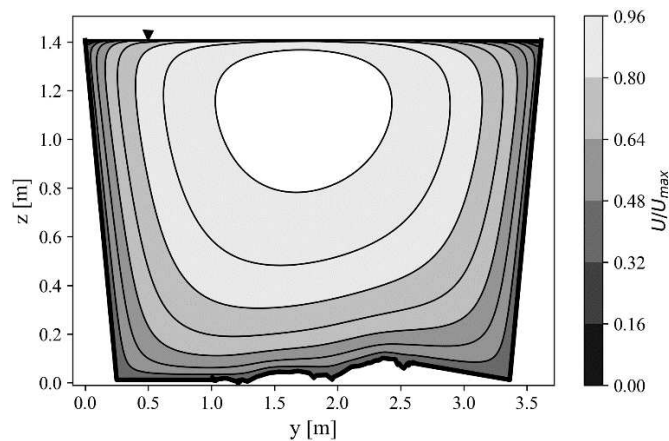


Figura 6: Distribución bidimensional de la velocidad media en la sección.

Para finalizar, en la Figura 7 se compararon algunos perfiles verticales con las medidas puntuales realizadas con el ADV (Flow Tracker) mencionado anteriormente. Las curvas modeladas pasan de forma satisfactoria por los puntos que están ubicados a 0.8 de la profundidad local en cada vertical. Cabe recalcar que el ajuste del modelo fue realizado en base a la nube de puntos obtenida con el perfilador doppler (ADCP), mostrado en la Figura 4 y los puntos agregados en los perfiles verticales de la Figura 7 se utilizaron como una verificación del ajuste del modelo. Como es esperable el ajuste es coherente en ambos casos.

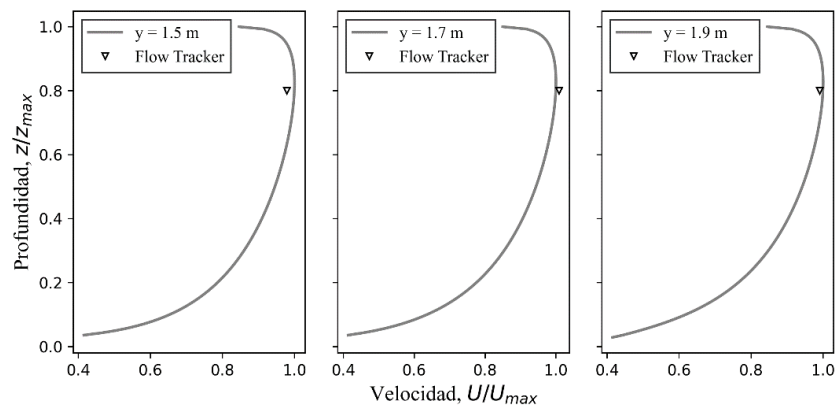


Figura 7: Perfiles verticales de velocidad modelados y comparados con mediciones de ADV

7. CONCLUSIONES

En base al caso de estudio analizado se presentaron limitaciones inherentes a algunas técnicas modernas de medición de velocidades y caudales en canales. Esto lleva a proponer alternativas mixtas de modelación numérica alimentada con datos empíricos de velocimetría superficial, cuya obtención es de mayor facilidad en la actualidad y de bajo costo. Además de esto, las modelaciones realizadas permitieron graficar curvas isotacas (curvas de nivel de la superficie de velocidades) que son de gran interés para muchas ramas de la hidráulica y la ingeniería. El modelo presenta la gran ventaja de tener un solo parámetro de calibración asociado a las rugosidades del fondo del canal lo cual facilita su uso y minimiza los errores de ajuste, haciendo de esta metodología mixta (LSPIV-modelación) una forma sencilla, rigurosa y de bajo costo para mejorar la cuantificación de caudales y estudiar la distribución de velocidades en ríos y canales artificiales.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Chapra, S. C., & Canale, R. P., *Métodos Numéricos para ingenieros*. McGraw-Hill, 2011.
- Chow, V. T, *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw-Hill, 1994.
- Forchheimer, P., *Tratado de Hidráulica*. Labor S.A., 1930.
- Gibson, A., On the depression of the filament of maximum velocity in a stream flowing through an open channel. *Proc R Soc A Math Phys Sci* 82:149–159, 1909.
- Girón, A., Evolución de la hidrología en el mundo y en Chile. *Anales de la Universidad de Chile*, pág. 591-609, 1985.
- Massó, L., Cazadores de crecidas: implementación de la técnica LSPIV para caracterizar y cuantificar recursos hídricos superficiales. Tesis de maestría, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, 2022.
- Patalano, A., *Desarrollo e implementación en gran escala de técnicas de velocimetría por imágenes para caracterizar flujos de agua con superficie libre*. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, 2017.
- Schöninger, R., Weber, J., Tarrab, L., Massó, L., Patalano A. and Rodriguez, A., aplicación de un modelo numérico basado en las ecuaciones RANS para la estimación de la distribución de la velocidad en canales – caso tramo urbano arroyo la cañada. *XXVII congreso nacional del agua*, 2023.
- Smith, G., *Numerical solution of partial differential equations*. Oxford University Press, 1985.
- Subhasish, D, *Fluvial Hydrodynamics*. Springer Berlin, Heidelberg, 2014.
- Swamee, P., Generalized Inner Region Velocity Distribution Equation. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE* 119(5), 651–656, 1993.
- Weber, J. F., & Martijena, S. (2008). Modelación numérica de la distribución transversal de velocidades en canales - caso trapecial. *Mecánica Computacional Vol XXVII*, págs. 385-401 (artículo completo), *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*. Sam Luis, 2008.