

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXVI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES  
MEDIANTE INFORMACIÓN REMOTA. ENFOQUE 1D.**

**RODRIGO MENESES P.<sup>1</sup>**  
**DAVID POBLETE L.<sup>2</sup>**  
**MATÍAS PEREDO P.<sup>3</sup>**  
**FELIPE NICOLAS A.<sup>4</sup>**

**RESUMEN**

Este trabajo describe una propuesta metodológica para la estimación del caudal en ríos a través del procesamiento de imágenes que pueden ser obtenidas desde un dron. Una dificultad considerable se encuentra en la falta de información del cauce como el desconocimiento de la batimetría, de la rugosidad y de la pendiente de fondo o de propiedades del flujo como el gradiente de velocidades o la velocidad media del flujo. Para abordar esta problemática, se propone un procedimiento de cálculo en el cual se utilizan la cota del nivel del agua y un estimativo de la velocidad media, a través de la velocidad máxima superficial, como datos de entradas en un esquema numérico modificado de las ecuaciones de Saint Venant en 1D. Con lo anterior, el procedimiento consiste en una metodología numérica de dos fases: La primera fase, llamada *Predictor*, se focaliza en la estimación del caudal y de la batimetría en varias secciones transversales de manera independiente considerando un enfoque del tipo problema inverso para el caudal, junto con la aproximación del campo de velocidades promedio de una sección transversal estimada mediante el principio de máxima entropía; la segunda fase, llamada *Corrector*, se focaliza en la comprobación del cálculo preliminar mediante el cumplimiento de restricciones y condiciones en un modelo de optimización. En este modelo, la función objetivo expresa la comparación entre las observaciones y el resultado numérico y las restricciones están dadas por las ecuaciones de Saint Venant. Con el objetivo de desarrollar comparaciones, el esquema numérico se ensaya considerando una colección de diversos escenarios conocidos generados en HEC RAS. . Se obtienen caudales estimados similares a los usados en los escenarios, con errores relativos menores al 5%.

---

<sup>1</sup> Profesor Adjunto, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Valparaíso - email: rodrigo.meneses@uv.cl

<sup>2</sup> Profesor Adjunto, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Valparaíso – email: david.poblete@uv.cl

<sup>3</sup> Plataforma de investigación ECOHYD – email: matias.peredo@ecohyd.com

<sup>4</sup> Alumno de pregrado, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Valparaíso – email: felipe.nicolas@alumnos.uv.cl

## 1. INTRODUCCIÓN

Contar con mecanismos apropiados para la estimación del caudal tiene diversos alcances dentro de la Ingeniería Hidráulica. Entre estos se encuentran la gestión de los recursos hídricos, el diseño de estructuras, la prevención de riesgos por inundaciones, la comprensión de la evolución de ecosistemas, entre otros puntos.

Al realizar un aforo, ya sea en ríos o canales, es necesario contar con el área de la sección transversal y su velocidad media del escurrimiento en dicha sección. Para el caso de cauces naturales, la geometría de una sección se obtiene generalmente a partir de batimetría y para canales, típicamente de formas rectangulares o trapecoidales, a partir de los datos de diseño de los mismos. La velocidad media se puede estimar a partir de mediciones en terreno usando molinetes, ADCPs o instrumentos similares y en el último tiempo, la tecnología ha permitido la observación de algunas variables como el ancho y la velocidad superficial por métodos no invasivos o de percepción remota. Por ejemplo, existen metodologías para la obtención de la velocidad superficial como el *Surface Velocity Radar* y el *Large Scale Particle Image Velocimetry* (Gessese et al., 2013; Moramarco et al., 2017) y la sección de escurrimiento puede ser estimada a partir de la elevación o cota de la superficie libre mediante LIDAR e incluso usando imágenes satelitales (Tourian et al., 2016).

Independiente de la metodología para realizar el aforo, la medición de caudales requiere información de terreno, cuya obtención ante distintas condiciones hidráulicas de los ríos puede ser compleja y por tanto, costosa. Ante ello, surge la necesidad de realizar mediciones del caudal con medios no invasivos, permitiendo así extender el rango de caudales medibles en una sección.

Trabajos previos han mostrado metodologías para la estimación de la forma de la sección transversal a partir de la profundidad de escurrimiento y la forma de fondo de un canal simulado en 1D, suponiendo un caudal y velocidad superficial conocidos (Gessese et al., 2011, 2013) usando las ecuaciones de Saint Venant y suponiendo valores de rugosidad del cauce. En ambos trabajos, los autores utilizan la fuerte correlación entre la velocidad promedio y la velocidad máxima para determinar una relación a través del denominado parámetro de entropía (Chiu et al., 1989; Chiu & Said, 1995; Chiu & Tung, 2002; Moramarco et al., 2017; Moramarco & Dingman, 2017; Moramarco & Singh, 2010). En el caso de Moramarco et al. (2019), los investigadores estiman tanto la batimetría como el caudal usando información remota de la cota del nivel del agua y la velocidad superficial del flujo en secciones conocidas de los ríos Tiber y Po en Italia y del río Sagavanirktok en Estados Unidos, con errores medios de no más del 30%, comparando los caudales. Pero no se han encontrado hasta la fecha estudios que estimen el caudal en varias secciones de un mismo río de manera simultánea.

Considerando que las herramientas utilizadas para las estimaciones están fuertemente influenciadas por condiciones hidráulicas y geométricas locales, la necesidad de vincular distintas metodologías para el análisis con enfoques locales como globales refleja una propuesta de contar con estimaciones y mecanismos de control y/o confiabilidad de la robustez de los resultados numéricos.

El objetivo de este trabajo es el de presentar una propuesta metodológica teórica para la estimación de caudales usando información que pueda ser recopilada u obtenida desde fuentes remotas, como son la velocidad superficial, el ancho superficial y la elevación de la superficie libre del agua con respecto a una cota de referencia. El enfoque de modelación se basa en las ecuaciones de Saint Venant en 1D y se considera el régimen en estado estacionario. Se usan datos modelados en el software HEC RAS en reemplazo de posibles observaciones desde un dron como inputs, las que sirven a su vez para comparar los caudales obtenidos con la metodología versus los caudales originales.

## 2. MODELO MATEMATICO Y DISCRETIZACION DEL MODELO

Se utiliza  $h(x, y)$ ,  $u(x, y)$  y  $v(x, y)$  para denotar la altura vertical de agua, la componente horizontal y la componente vertical del campo de velocidad respectivamente.

La medida para  $h(x, y)$  se considera desde el lecho a la superficie del agua. La elevación del lecho se describe mediante la superficie  $z = Z(x, y)$ , por lo tanto  $h + Z$  representa el nivel de la superficie de agua, variable que puede ser registrada. En la formulación se considera un flujo unidimensional, es decir,  $u = u(x)$  y  $h = h(x)$  con  $v = 0$ . De esta manera, las ecuaciones de gobierno en estado estacionario quedan expresadas en el siguiente sistema:

$$\frac{d[hu]}{dx} = 0 \quad (1a)$$

$$\frac{d}{dx} \left[ hu^2 + \frac{1}{2} gh^2 \right] = -gh \left( \frac{dZ}{dx} + S_e \right) \quad (1b)$$

Siendo  $g$  la aceleración de gravedad y  $S_e$ , el término utilizado para describir el efecto de las pérdidas de energía, lo que se detalla en la Ecuación (5). Asumiendo  $h \neq 0$  en el dominio de trabajo, la ecuación (1b) se reescribe como sigue

$$\frac{d}{dx} \left[ \frac{1}{2g} u^2 + h + Z \right] = -S_e \quad (2)$$

Así, al integrar sobre el dominio de control  $[x_i, x_{i+1}]$  se tiene

$$\frac{1}{2} [u^2]_i^{i+1} + [h]_i^{i+1} + [Z]_i^{i+1} = - \int_{x_i}^{x_{i+1}} S_e dx \quad (3)$$

donde  $[f]_a^b$  denota la diferencia  $f(b) - f(a)$ . Luego, la aproximación de la ecuación en el volumen de control  $[x_i, x_{i+1}]$  se obtiene mediante la cuadratura de la integral del lado derecho.

La cota de fondo del canal  $Z$  se parametriza a partir de la medición remota del nivel o elevación de la superficie del agua con respecto una cota de referencia ( $WS$ ) y de la profundidad de escurrimiento  $h$ :

$$Z = WS - h \quad (4)$$

Con respecto a las pérdidas de energía  $S_e$ , éstas se descomponen en dos términos: uno por fricción ( $S_f$ ) y otro por contracción y expansión asociados a cambios de velocidad ( $S_{ec}$ ):

$$S_e = S_f + S_{ec} \quad (5)$$

Las pérdidas de energía por fricción  $S_f$  se estiman mediante la ecuación de Manning, típicamente utilizada asumiendo un flujo pseudo-uniforme entre secciones transversales lo suficientemente cercanas de un canal rectangular muy ancho con respecto a la altura de escurrimiento:

$$S_f = n^2 \cdot u|u| \cdot R_H^{-4/3}, \quad (6)$$

donde  $n$  representa el coeficiente de rugosidad de Manning y  $R_H$ , el radio hidráulico.  $R_H$  se define mediante la proporción entre el área de la sección transversal  $A = A(x)$  y el perímetro mojado  $P = P(x)$ , siendo  $x$  la ubicación de la sección transversal del río. De la ecuación de continuidad se tiene además  $A = Q/u$  y reemplazando en (6) sigue:

$$S_f = \frac{n^2 u^{7/3} |u| P^4}{Q} \quad (7)$$

Para el caso de sección rectangular con espesor  $b = b(x)$  se tiene:

$$P = b + 2h \quad (8a)$$

$$A = bh \quad (8b)$$

, por lo que la expresión para la pendiente de las pérdidas por fricción (7) se presenta como:

$$S_f = \frac{n^2 b^{4/3} u^{10/3}}{Q^{4/3}} \left(1 + \frac{2Q}{u b^2}\right)^{4/3} \quad (9)$$

Quedando entonces su contribución de manera aproximada por la regla del trapecio como sigue:

$$\int_{x_i}^{x_{i+1}} S_f dx \approx \frac{\Delta x_{i+1}}{2} (S_f(x_{i+1}) + S_f(x_i)) \quad (10)$$

El segundo término en las pérdidas de energía  $S_{ec}$ , se asocia con los efectos de compresión y expansión, vinculado cambios bruscos en la geometría de las secciones y la generación de remolinos (Chow et al., 1988; Maidment, 1993). La contribución de este término en todo el volumen de control  $[x_i, x_{i+1}]$ , queda expresada como sigue (Maidment, 1993):

$$\int_{x_i}^{x_{i+1}} S_{ec} dx = \frac{K_{ec}^i}{2g} [u^2]_i^{i+1} \quad (11)$$

siendo  $K_{ec}$  un coeficiente adimensional utilizado para identificar una contracción o bien una expansión. Para cambios graduales, se consideran valores de -0.3 para expansiones y 0.1 para contracciones (Maidment, 1993).

De este modo, al considerar las descripciones y aproximaciones anteriores, la ecuación de balance de la cantidad de movimiento (3), conduce a la siguiente relación:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2g} [u^2]_i^{i+1} (1 + K_{ec}^i) + [WS]_i^{i+1} \\ = -\frac{\Delta x_{i+1} n^2}{2 Q^{4/3}} \left( b_{i+1}^{4/3} u_{i+1}^{10/3} \left( 1 + \frac{2Q}{b_{i+1}^2 u_{i+1}} \right)^{4/3} + b_i^{4/3} u_i^{10/3} \left( 1 + \frac{2Q}{b_i^2 u_i} \right)^{4/3} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

### 3. PROPUESTA METODOLÓGICA

La metodología consta de dos fases y se define como un método de *Predictor-Corrector*: la fase del tipo *Predictor* involucra un análisis del tipo local, donde se aplican las ecuaciones de balance entre secciones consecutivas para expresar una relación en términos del caudal. La fase *Corrector* es de carácter global y se basa en la manipulación de las ecuaciones de balance de Saint-Venant consideradas como restricciones en un problema de optimización, donde el mecanismo de control se sintetiza en la formulación de la función objetivo descrita en términos de las observaciones superficiales junto con las variables hidráulicas utilizadas en las descripciones del modelo.

#### Predictor

En la etapa de Predictor, los datos recopilados por medios remotos, como la velocidad superficial del flujo  $u_i^{sup}$ , ancho superficial  $b_i$  y la cota o elevación de la superficie libre del agua  $WS_i$ , se usan para caracterizar las distintas  $i$  secciones transversales en una zona de río de largo  $L$ , con  $i$  desde 1 hasta  $N$ .

Tanto  $b$  como  $WS$  se miden directamente y se reemplazan en (12), pero desde medios remotos solo se puede medir la velocidad superficial del flujo  $u_i^{sup}$ , no su velocidad media  $u_i$ . A partir del trabajo de varios autores (Chiu & Said, 1995; Moramarco & Singh, 2010), se puede estimar la velocidad media de cada sección transversal usando la relación:

$$u^{ent} = \Phi(M) \cdot u_{max}^{sup} \quad (13)$$

Donde  $u_{max}^{sup}$  es la velocidad máxima observada en cada sección transversal,  $u^{ent}$  es la velocidad media de la sección estimada por el método de máxima entropía y  $\Phi(M)$  el factor de corrección que depende del coeficiente  $M$ , el que según autores como Chiu & Said (1995) y Moramarco & Singh (2010), se ha definido como constante para cada sección transversal, independiente de las condiciones de flujo. En este trabajo consideramos la (13) para cada una de las  $N$  secciones transversales del tramo de río con mediciones de velocidad superficial, ancho superficial y cota de la superficie libre, por lo que queda:

$$u_i^{ent} = \Phi(M_i) \cdot u_{max_i}^{sup} \quad i = 0..N \quad (14)$$

La relación anterior permite proponer una aproximación  $u_i = u_i^{ent}$  y  $u_{i+1} = u_{i+1}^{ent}$  en (12). A través de este enfoque, la ecuación (12) de cada volumen de control  $[x_i, x_{i+1}]$  puede reescribirse como  $f_i(Q) = 0$ , siendo  $f_i$  una función monótona decreciente:

$$f_i(Q) = \frac{1}{2g}[u^2]_i^{i+1} (1 + K_{ec}^i) + [WS]_i^{i+1} + \frac{\Delta x_{i+1} n^2}{2 Q^{4/3}} \left( b_{i+1}^{4/3} u_{i+1}^{10/3} \left( 1 + \frac{2Q}{b_{i+1}^2 u_{i+1}} \right)^{4/3} + b_i^{4/3} u_i^{10/3} \left( 1 + \frac{2Q}{b_i^2 u_i} \right)^{4/3} \right) \quad (15)$$

Luego, en caso de existir, la solución de la Ec. (15) es única. El tratamiento  $f_i(Q) = 0$  presenta un problema sobre los volúmenes de control donde las variaciones de las observaciones son despreciables, lo que conduce a que (16) no tiene solución numérica. En estos casos se adopta el criterio de cálculo basado en la aplicación de (3) bajo la consideración  $S_0 = S_e$ , estableciéndose entonces la relación:

$$\frac{WS_{i+1} - WS_i}{\Delta x_{i+1}} = S_0 = b_i^{4/3} u_i^{10/3} \left( 1 + \frac{2Q}{b_i^2 u_i} \right)^{4/3} \quad (16)$$

El procedimiento de la primera fase de la etapa del predictor se presenta en el algoritmo de la Figura 1.

---

**Algorithm 1: Estimación del caudal  $Q$ . Fase 1 enfoque predictor.**

---

**Input:** Ingreso de los datos de velocidad de entropía, superficie de agua, anchos de las secciones y la tolerancia.

**Output:** Listas de las aproximaciones de los caudales, profundidades y la topografía del lecho

```

1 for  $i = 1, i \leq ntot - 1$  do
2   Cálculo de los términos de pérdidas por fricción. Integración numérica.
3   Cálculo de los términos de pérdidas por contracción/expansión.
4   if  $|U_{i+1}^{ent} - U_i^{ent}| < tol$  then
5     Estimación del caudal mediante (15)
6   else
7     Estimación del caudal mediante (16)
8   Almacenar  $Q_{i+1}$ .
9   Calcular y almacenar  $H_{i+1}^{pred}, Z_{i+1}^{pred}$ 

```

Figura 1. Algoritmo de la Fase 1 del Predictor.

Antes de pasar a la etapa de Corrector, se realiza un proceso de agrupamiento o clusterización de los caudales  $Q_i$  calculados para cada volumen de control. Se identifica el *cluster* con mayor cantidad de datos, del que se calcula el promedio, valor que pasará a la etapa Corrector. Se usó la función *hclust* con el método “*ward.D*” de la librería *stats* en R para la clusterización de los caudales resultantes.

De esta manera, se genera un solo caudal, que llamaremos *caudal predictor*,  $Q^{pred}$ . Usando las ecuaciones de continuidad, (4) y (16), se calculan las cotas de fondo del canal  $Z_i$ , las

alturas y las velocidades de escurrimiento  $h_i$  y  $u_i$ , las que serán utilizadas en la etapa Corrector.

### Corrector

A diferencia de la etapa anterior, en esta etapa se realiza el cálculo para todas las secciones transversales a la vez y se busca la minimización de las diferencias entre las variables observadas y los resultados de las aproximaciones numéricas de la ecuación de Saint Venant.

Para el uso de (3a) y (3b) en sus versiones discretas de la forma de (12), se utilizan las aproximaciones generadas en la fase Predictor, específicamente, en la expresión vinculada con la batimetría denotada por  $Z^{pred}$ .

La estructura de la formulación está dada por:

- Un objetivo definido utilizando las observaciones y las aproximaciones numéricas. Se considera un funcional  $\mathcal{F}$  para la minimización, la cual está vinculada con el criterio de comparación.
- Restricciones descritas en términos de las ecuaciones de conservación de masa y de la cantidad de movimiento.

Para  $u$ ,  $u^{sup}$  y  $b$  definidas sobre  $[0, L]$ , al denotar por  $\mathcal{F}(u, h, Q; u^{sup}, b; \alpha)$  el funcional mediante el cual se define el objetivo vinculado con la comparación y donde  $\alpha = \emptyset(M)$ , la formulación general del problema de control viene dada por:

$$\min \mathcal{F} = \min \sum_{k=1}^N \gamma_1 \left( \frac{1}{2g} (u_k^{ent})^2 - \frac{1}{2g} (u_k)^2 \right)^2 + \gamma_2 \left( h_k - \frac{Q^{pred}}{b_k u_k^{ent}} \right)^2$$

sa:

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{1}{2g} u^2 + h + Z^{pred} \right) = -S_{fx}(u, h, Q^{pred}, x) - S_e(u) \quad (a)$$

$$u, h, Q \geq 0 \quad (b)$$

Donde  $\gamma_1$  y  $\gamma_2$  son constantes. Luego se simplifica la ecuación de cantidad de movimiento, reemplazando el término buscado de la velocidad de altura de escurrimiento por los valores obtenidos en el paso anterior. La contribución del enfoque inverso está reflejada en el término  $Z^{pred}$  el cual ha sido calculado en la fase Predictor. La expresión  $Z^{pred} = Z^{pred}(x)$  se puede obtener mediante procesos de construcción de funciones por interpolación (polinomial por tramos) o bien por mínimos cuadrados (serie de Fourier discreta). Señalamos que este procedimiento no será necesario ya que el tratamiento se aborda de manera discreta.

La discretización del problema de control (17) conduce a la formulación de un problema de optimización. Tomando las relaciones anteriores se tiene:

$$\min \sum_{k=1}^N \gamma_1 \left( \frac{1}{2g} (u_k^{ent})^2 - \frac{1}{2g} (u_k)^2 \right)^2 + \gamma_2 \left( h_k - \frac{Q^{pred}}{b_k u_k^{ent}} \right)^2$$

sa:

$$\frac{1}{2g} (u_{i+1}^2 - u_i^2 + K_{ce}^i |u_{i+1}^2 - u_i^2|) + h_{i+1} - h_i + Z_{i+1}^{pred} - Z_i^{pred} = \quad (18)$$

$$\frac{\Delta x_{i+1} n^2}{2 (Q^{pred})^{\frac{4}{3}}} \left( b_{i+1}^{\frac{4}{3}} u_{i+1}^{\frac{10}{3}} \left( 1 + \frac{2Q^{pred}}{b_{i+1}^2 u_{i+1}} \right)^{\frac{4}{3}} + b_i^{\frac{4}{3}} u_i^{\frac{10}{3}} \left( 1 + \frac{2Q^{pred}}{b_i^2 u_i} \right)^{\frac{4}{3}} \right), i = 0 \dots N - 1 \quad (a)$$

$$u_i, h_i, Q \geq 0 \quad (b)$$

La estructura no lineal del problema discreto no es favorable para la generación de resultados que permitan el desarrollo de análisis estadístico. Con el objetivo de resolver esta problemática, se consideran las siguientes linealizaciones de los términos involucrados en las relaciones:

$$u_{i+1}^2 - u_i^2 \rightarrow u_{i+1} u_{i+1}^{ent} - u_i u_i^{ent}$$

$$|u_{i+1}^2 - u_i^2| \rightarrow |(u_{i+1}^{ent})^2 - (u_i^{ent})^2|$$

$$u_i^{\frac{10}{3}} \left( 1 + \frac{2Q^{pred}}{b_i^2 u_i} \right)^{\frac{4}{3}} \rightarrow u_i (u_i^{ent})^{7/3} \left( 1 + \frac{2Q^{pred}}{b_i^2 u_i^{ent}} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (19)$$

$$Z_k^{pred} \rightarrow WS_i - \frac{Q^{pred}}{b_i u_i^{ent}}$$

donde  $u^{ent}$  representan las aproximaciones obtenidas de la aplicación del principio de máxima entropía utilizando las mediciones superficiales según (13). Mediante estas aproximaciones se tienen restricciones lineales. La aproximación indicada al final de la lista ha sido considerada con el propósito que la variable  $Q$  se encuentre expresada de manera lineal en las restricciones.

#### 4. CASO DE ESTUDIO Y RESULTADOS

El objetivo de esta sección es poner a prueba la metodología presentada usando valores sintéticos de velocidades medias de cada sección. En esta dirección, se generaron distintos casos de análisis, simulando en HEC RAS un canal con de batimetría rectangular y de ancho y pendiente conocidas. Se desarrollaron nueve simulaciones a partir de un canal rectangular de 20 m. de ancho, 2000 m. de largo y tres secciones de distinta pendiente de fondo y rugosidad de Manning igual a 0.014. En todos los casos se impuso la altura crítica como condición de borde de aguas abajo. Las principales características de este canal se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros del canal generado en HEC RAS.

Sección	Característica	Valor	Unidad
1	Largo	1000	m
	Pendiente	0.135	%
2	Largo	500	m
	Pendiente	0.200	%
3	Largo	500	m
	Pendiente	0.040	%

Para los casos 1, 2 y 3 se usaron caudales de 2, 25 y 100 m<sup>3</sup>/s respectivamente y se truncaron los resultados a la tercera cifra significativa decimal. En los casos 4, 5 y 6 se generó un angostamiento gradual, pasando de 20m de ancho superficial a 17m, en un tramo de 50m y luego ensanchamiento gradual también en 50m y también distintos caudales. Y en los casos 7, 8 y 9 se usó un coeficiente de rugosidad de Manning de 0.035 en vez de los 0.014 usados en los casos anteriores. Todos los datos se muestran en la Tabla 2.

De estas simulaciones en HEC RAS, se extrajeron los resultados de la velocidad media, la elevación de la superficie libre, la ubicación espacial y el ancho superficial de cada sección transversal. En una aplicación real, la velocidad media deberá ser estimada a partir de la velocidad máxima de cada sección usando por ejemplo la metodología del método de máxima entropía, sugerido por Chiu y Said (1995) y Moramarco y Singh (2010), lo quedará propuesto para estudios posteriores.

La Tabla 2 muestra la comparación entre los caudales usados en la modelación hidráulica en HEC RAS y los valores obtenidos en la etapa Predictor. Se observa que en general los errores son relativamente bajos y que los datos usados para calcular el promedio de cada caso están entre un 72% y un 99% de los caudales individuales, es decir en la mayoría de las  $N$  secciones se logran caudales pertenecientes al *cluster* elegido y que en promedio se comportan de manera similar al usado para la simulación en HEC RAS. Este filtrado se realizó mediante la elección del *cluster* con mayor cantidad de datos. En general, entre los casos 4 y 6, la dispersión de los datos del *cluster* elegido es más baja que la de los casos 1 al 3, donde la dispersión es mayor. Atribuimos esto a que los datos usados en los primeros tres casos están truncados al tercer decimal lo que genera estimaciones más gruesas y dispersas. Por último, el coeficiente de variación de los resultados de los casos 7 al 9 son mucho menores con un promedio de 0.01 versus 0.34 y 0.12 de los otros dos grupos de casos. Esos casos usan un coeficiente de Manning de más del doble que en los casos anteriores.

Tabla 2. Resultados obtenidos en las nueve simulaciones.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8	Caso 9
Caudal real [m <sup>3</sup> /s]	2.00	25.00	100.00	7.00	30.00	75.00	5.00	35.00	90.00
Caudal pred. [m <sup>3</sup> /s]	1.91	25.87	103.90	6.89	29.39	74.10	5.00	35.09	90.51
Desv. Est. [m <sup>3</sup> /s]	0.55	8.26	37.31	0.40	3.25	15.21	0.03	0.32	0.84
CV	0.29	0.32	0.36	0.06	0.11	0.21	0.01	0.01	0.01

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8	Caso 9
datos usados	82%	99%	86%	89%	95%	97%	90%	79%	72%
Error absoluto	4.4%	3.5%	3.9%	1.5%	2.0%	1.2%	0.0%	0.2%	0.6%

En la Figura 2 se muestra el histograma de los caudales generados por la etapa de Predictor para el caso 5 ( $Q = 30 \text{ m}^3/\text{s}$ ), donde los colores amarillos indican caudales que pertenecen al *cluster* elegido mientras que caudales con colores oscuros fueron descartados. Se observa una concentración importante de caudales en torno a los 27 y 33  $\text{m}^3/\text{s}$ .

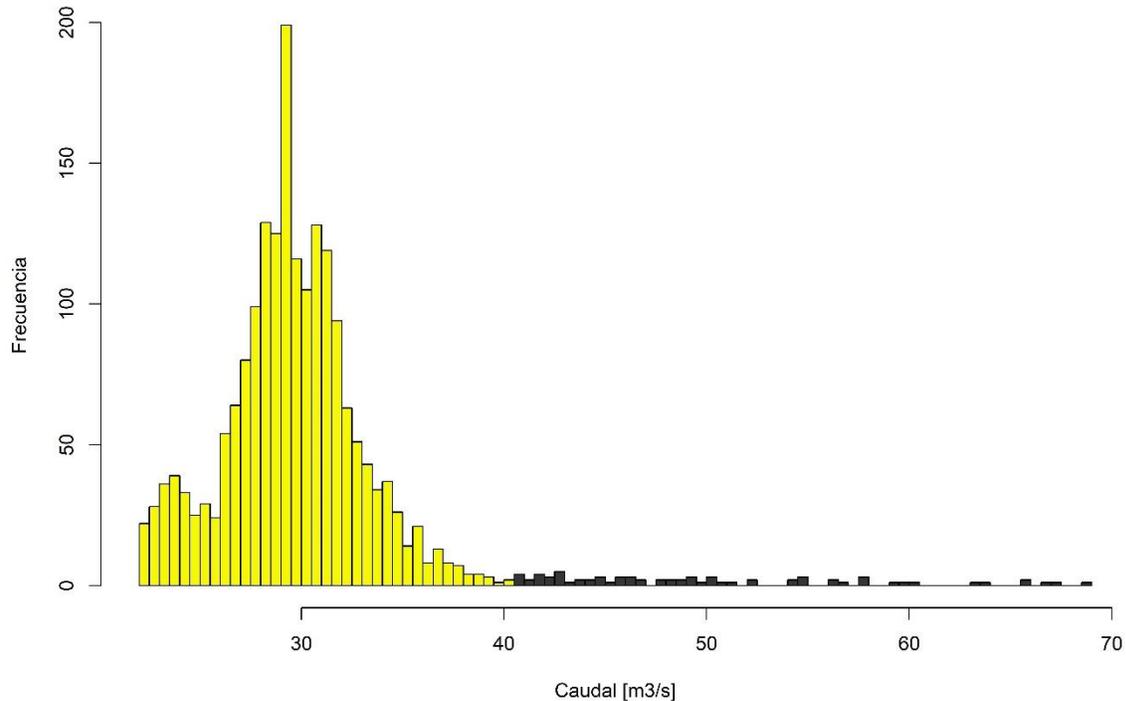


Figura 2 En amarillo se muestran los elementos que pertenecen al *cluster* elegido para definir el caudal predictor.

Por otra parte, la Figura 3 muestra el perfil longitudinal del canal diseñado, el eje hidráulico modelado por HEC RAS y el caudal estimado en cada una de las secciones transversales de la etapa Predictor. En colores rojos se muestran las secciones donde el caudal calculado no pertenece al *cluster* elegido, lo que se puede observar en el gráfico de “caudales Predictor” que se muestra en la parte inferior de la misma figura.

Se observa que en los cambios de pendiente, en el estrechamiento ubicado en la posición 1300 y en la sección final del canal (que termina con altura crítica), se generan las mayores diferencias de caudales y cambios más abruptos en las estimaciones, lo que indica un mayor cuidado al momento de elegir secciones para la estimación de los datos obtenidos por drones o percepción remota en general. Es posible observar también que en algunas secciones donde ocurre un flujo gradualmente variado, el caudal predictor tiende a disminuir o aumentar también de manera gradual con valores cercanos al caudal real, pero sin, estabilizarse en este último, lo que deberá analizarse cuidadosamente usando otras configuraciones del canal modelado y más aún, usando datos reales de ríos en condición natural.

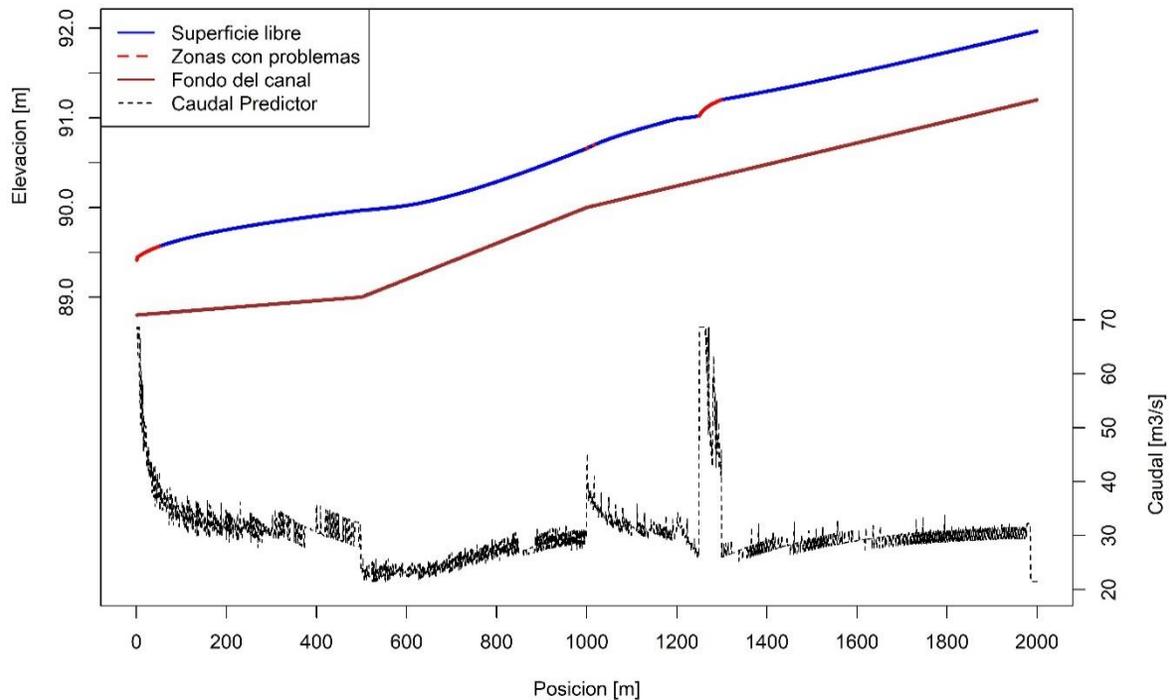


Figura 3. Perfil longitudinal del canal con el caso 5,  $Q=30\text{m}^3/\text{s}$  de caudal real. También se muestra el perfil hidráulico y los caudales calculados en cada elemento del canal. En el eje hidráulico y en color rojo, se muestran las posiciones con caudales que no quedaron agrupados en el cluster elegido.

## 5. CONCLUSIONES

El objetivo central de este trabajo ha sido formular un procedimiento que permita generar estimativos del caudales a partir de información recibida del procesamiento de imágenes desde un dron. Identificando y vinculando los mecanismos de transporte con un esquema numérico, se ha presentado una metodología numérica multi-etapas para la estimación del caudal de un río. Las etapas se concentraron en una fase Predictor (del tipo local) y en una fase Corrector (del tipo global). Las variables hidrodinámicas se vincularon mediante ecuaciones de balance como también con leyes empíricas, como la ecuación de Manning. El esquema ha sido formulado considerando un modelo unidimensional para clarificar los puntos cruciales en el análisis. Dentro de estos puntos destacan la identificación de la batimetría, conservación de la cantidad de masa y la estimación del caudal y profundidad de escurrimiento.

La metodología se puso a prueba utilizando una colección de observaciones sintéticas construidas mediante el software HEC RAS, donde los resultados obtenidos fueron suficientemente satisfactorios con rangos de errores relativos del orden de 10% (como cota superior). Se pudieron apreciar algunas discrepancias con las mediciones en ciertas zonas de cambio bruscos de gradiente. Pensamos que este de procedimiento se puede mejorar considerando análisis de datos por medio de clusterizaciones entre otros enfoques.

Lo realizado en este trabajo, abre la posibilidad de seguir profundizando y complejizando la sección del canal 1D acercándose a una sección más parecido a los cauces naturales, en donde

predomine la componente longitudinal del escurrimiento, pudiendo ampliarlos a una dimensión transversal de acuerdo a la discretización espacial transversal que puede obtenerse de los métodos no invasivos. De esta forma, esperamos poder dotar del concepto “pseudo 2D” a la implementación 1D. En la misma línea de trabajo, los casos de flujos en régimen transitorio como también los casos de secciones transversales con geometrías más complejas y el caso 2D son materia de trabajos futuros los cuales nos encontramos avanzado en algunos cálculos que reflejan en parte que la metodología puede ser extendida.

Las potencialidades de esta forma de estimación de caudales en ríos, permitirá cerrar brechas de información como la medición del caudal en crecidas o en secciones de difícil acceso. Permitiendo que la implementación de sistemas de alerta temprana ante eventos extremos, definición de zonas inundación o simplemente el conocimiento del recurso hídrico adquiera mayor precisión.

## REFERENCIAS

- Chiu, C., Hsu, S. M., & Tung, N. C. (1989). Velocity distribution in open channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(23463), 576–594.
- Chiu, C., & Said, C. (1995). Maximum and mean velocities and entropy in open-channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(7564), 26–35.
- Chiu, C., & Tung, N. (2002). Maximum velocity and regularities in open channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 4, 390–398.
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1988). *Applied Hydrology*.
- Gessese, A. F., Sellier, M., Van Houten, E., & Smart, G. (2011). Reconstruction of riverbed topography from free surface data using a direct numerical approach in one-dimensional shallow water flow. *Inverse Problems*, 27(2). <https://doi.org/10.1088/0266-5611/27/2/025001>
- Gessese, A. F., Smart, G., Heining, C., & Sellier, M. (2013). One-dimensional bathymetry based on velocity measurements. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 21(4), 704–720. <https://doi.org/10.1080/17415977.2012.717621>
- Maidment, D. R. (1993). *Handbook of hydrology*. McGraw-Hill.
- Moramarco, T., Barbetta, S., Bjerklie, D. M., Fulton, J. W., & Tarpanelli, A. (2019). River Bathymetry Estimate and Discharge Assessment from Remote Sensing. *Water Resources Research*, 55(8), 6692–6711. <https://doi.org/10.1029/2018WR024220>
- Moramarco, T., Barbetta, S., & Tarpanelli, A. (2017). From surface flow velocity measurements to discharge assessment by the entropy theory. *Water (Switzerland)*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/w9020120>
- Moramarco, T., & Dingman, S. L. (2017). On the theoretical velocity distribution and flow resistance in natural channels. *Journal of Hydrology*, 555, 777–785. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.068>
- Moramarco, T., & Singh, V. P. (2010). Formulation of the Entropy Parameter Based on Hydraulic and Geometric Characteristics of River Cross Sections. *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(10), 852–858. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0000255](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0000255)
- Tourian, M. J., Tarpanelli, A., Elmi, O., Qin, T., Brocca, L., Moramarco, T., & Sneeuw, N. (2016). Spatiotemporal densification of river water level time series by multitemission satellite altimetry. *Water Resources Research*, 52(2), 1140–1159. <https://doi.org/10.1002/2015WR017654>