

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

**APLICACIÓN DEL MÉTODO INVERSO DE ASIMILACIÓN DE DATOS TIPO  
PREDICTOR-CORRECTOR (IPCA) PARA LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES  
USANDO INFORMACIÓN DE UN MODELO 1D DEL RÍO BIOBÍO.**

**VALERIA MADRID.<sup>1</sup>**  
**DAVID POBLETE L.<sup>2</sup>**  
**RODRIGO MENESES P.<sup>3</sup>**  
**MATÍAS PEREDO P.<sup>4</sup>**  
**FELIPE AGUILAR M.<sup>5</sup>**

**RESUMEN**

En este trabajo se aplica el método Inverso de Asimilación de Datos tipo Predictor-Corrector para la estimación de caudales (IPCA). El método fue desarrollado para estimar caudales en ríos o canales utilizando información de variables superficiales, como la velocidad superficial, el ancho del canal y la cota de la superficie libre a lo largo de un tramo del río. Con la finalidad de estimar caudal y batimetría, el IPCA compara las respuestas de las ecuaciones de Saint-Venant en 1D con las observaciones de dichas variables. Si bien está pensado para utilizar información capturada por drones, en este estudio la metodología se pone a prueba usando los resultados obtenidos desde modelos hidráulicos sintéticos generados en HEC-RAS 1D.

En una primera etapa de pruebas se evalúa la sensibilidad del método frente a incertidumbres en el coeficiente de rugosidad de Manning ( $n$ ) y en el ángulo lateral  $\theta$  de un canal trapezoidal. En una segunda etapa, se explora su aplicación en condiciones más complejas, considerando caudales entre 850 y 14 500 m<sup>3</sup>/s en un tramo de 7,5 km del río Biobío. Los resultados de la primera parte indican que, al utilizar el Manning base del modelo, los errores son cercanos al 5 %, mientras que variaciones de  $\pm 15$  % en  $n$  generan un aumento lineal del error relativo con una relación aproximada 1:5.

Para la segunda clase de pruebas, el método se aplicó al Biobío bajo enfoques de rugosidad constante y variable en el espacio. Los resultados muestran que, aunque el uso de  $n$  variable permite capturar mejor la heterogeneidad hidráulica, no siempre reduce el error global de caudal y puede amplificar inestabilidades en tramos con cambios geomorfológicos abruptos.

---

<sup>1</sup> Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Valparaíso – email: [valeria.madrid@estudiantes.uv.cl](mailto:valeria.madrid@estudiantes.uv.cl)

<sup>2</sup> Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Valparaíso – email: [david.poblete@uv.cl](mailto:david.poblete@uv.cl)

<sup>3</sup> Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Valparaíso - email: [rodrigo.meneses@uv.cl](mailto:rodrigo.meneses@uv.cl)

<sup>4</sup> Plataforma de investigación ECOHYD – email: [matias.peredo@ecohyd.com](mailto:matias.peredo@ecohyd.com)

<sup>5</sup> Plataforma de investigación ECOHYD – email: [felipe.aguilar@ecohyd.com](mailto:felipe.aguilar@ecohyd.com)

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Marco general para la estimación de caudales con métodos no intrusivos

La instalación de estaciones de aforo en sistemas fluviales se ve considerablemente dificultada por la complejidad técnica inherente y las significativas implicancias económicas asociadas a su instalación y operación. Alternativas pragmáticas llevan a procedimientos para la estimación de caudales en causas naturales o artificiales en base a los procedimientos de aforo, que consisten en la subdivisión de una sección transversal del cauce en unidades o celdas elementales, seguida de la determinación de la velocidad media del flujo en cada una de estas celdas. Sin embargo, es importante señalar que este proceso puede resultar laborioso y conllevar riesgos considerables para el personal técnico, ya sea por la magnitud y fuerza del flujo o por la dificultad inherente de acceder a los sitios específicos del cauce donde deben realizarse las mediciones.

En los últimos años, se han estudiado ampliamente enfoques indirectos basados en datos obtenidos a partir de observaciones remotas como alternativas viables para la estimación de caudales. Entre los marcos teóricos más utilizados para abordar este problema destacan las técnicas de asimilación de datos y la teoría de problemas inversos. La formulación de modelos dentro de estos marcos puede variar significativamente, dando lugar a una diversidad de métodos. El enfoque de *Control Óptimo* permite vincular conceptualmente la asimilación de datos con problemas inversos, siendo eficaz para la formulación y resolución de fenómenos en ingeniería hidráulica, como lo evidencian diversos estudios (Atanov et al., 1999; Atanov & Voronin, 1981; Chertok & Lardner, 1996; Ding et al., 2004; Garambois et al., 2020; Garambois & Monnier, 2015; Hostache et al., 2010; Lai & Monnier, 2009; Larnier et al., 2021; Pujol et al., 2022).

## 1.2. Método inverso de asimilación de datos tipo Predictor-Corrector (IPCDA) para la estimación de caudales

El método Inverso de Asimilación de Datos tipo Predictor-Corrector para la estimación de caudales (IPCDA, por sus siglas en inglés), presentada en Meneses et al. (2025), fue desarrollada con el objetivo de estimar el caudal en ríos o canales utilizando únicamente información accesible mediante observaciones superficiales, como aquellas obtenidas mediante drones. Para esto se requiere la medición, a lo largo de un tramo del río, de la velocidad superficial, la cota de la lámina libre y el ancho superficial del canal, como también de la rugosidad del cauce y la pendiente lateral del terreno. Se busca minimizar la suma de los errores entre los resultados del modelo, derivados de las ecuaciones de Saint-Venant uno dimensional (1D), y las mediciones de la velocidad superficial como de nivel del escurrimiento.

El modelo se formula utilizando las ecuaciones de continuidad y de cantidad de movimiento (en su forma de energía mecánica). Se utilizan las variables  $Q$ , que denota el caudal,  $U$  la velocidad media,  $h$  la cota de pelo de agua y  $Z$  la cota de fondo de una sección. Las pérdidas de energía por fricción, y por cambios bruscos de velocidad entre secciones se denotan por  $S_f$  y  $S_e$ , y dependen de las variables anteriormente indicadas. Las expresiones de estas pérdidas de energía pueden ser vistas en Chow (1959).

En el método IPCDA tanto  $Z$  como  $h$  son variables que no se encuentran disponibles, como tampoco el ancho basal del canal o río. De esta manera y suponiendo un canal trapezoidal, se proponen relaciones geométricas para el área y el perímetro mojado, donde  $A = B h - \cot \theta h^2$  y  $P = B + \frac{2}{\sin \theta} h (1 - \cos \theta)$ . En este caso,  $\theta$  es el ángulo que forma la pared lateral con la horizontal del canal y  $B$ , el ancho superficial del flujo, ambas variables que se asumen conocidas o que pueden ser observadas.

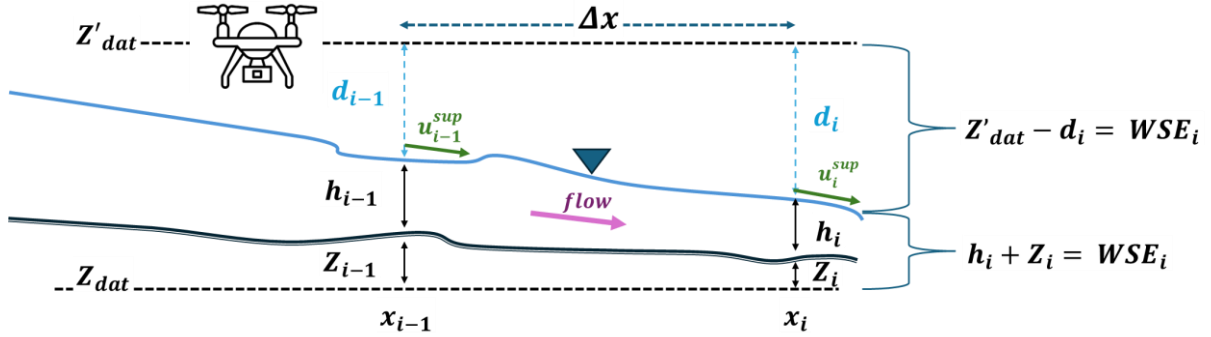


Figura 1. Esquema del problema, introduciendo  $WSE$  como variable auxiliar. Fuente: Meneses et. al (rev).

Se introduce además la variable  $WSE$  (cota de la superficie libre) como la suma de la cota de fondo del canal y la altura de escurrimiento,  $WSE = z + h$ . La Figura 1 muestra estas variables y el esquema general del problema. De esta manera, la variable  $h$  se puede reescribir como  $h = \frac{Q}{UB} + \frac{\cot \theta Q^2}{U^2 B^3}$ , por lo que  $A$  y  $P$ , y por lo tanto  $R_H$ , quedan en función de  $U$ ,  $B$ ,  $\theta$  y de la variable buscada  $Q$ .

Después de un reordenamiento de términos, la pendiente de la pérdida de energía por fricción queda representada por los parámetros del problema y la variable buscada  $Q$ , según se presenta en la Ecuación 1:

$$S_f(Q) = n^2 U^{\frac{10}{3}} \left( \frac{B}{Q} + \frac{2}{\sin \theta} (1 - \cos \theta) \left( \frac{1}{UB} + \cot \theta \frac{Q}{U^2 B^3} \right) \right)^{\frac{4}{3}}$$

Ecuación 1. Reescritura de la ecuación para la estimación de la pendiente de pérdidas de energía por fricción en función de los parámetros del problema y la variable buscada  $Q$ .

Los valores de  $WSE$  se asumen conocidos dadas las mediciones, los cuales son fundamentales en distintas etapas del procedimiento numérico.

El método se implementa en dos fases: Predictor y Corrector. En la fase inicial local (Predictor), se estima el caudal  $Q$  en cada una de las celdas de trabajo a lo largo de un tramo de río. En la fase Corrector, el caudal calculado como el promedio de los caudales obtenidos en las celdas del modelo en la fase previa es usado como condición inicial y es modificado a través de una optimización iterativa usando las ecuaciones de Saint-Venant como restricciones del problema de optimización, donde las variables a ajustar son  $WSE$  y  $U$  en función de las observaciones  $WSE^{obs}$  y  $U^{obs}$  en cada punto de la malla de trabajo. La Figura 2 presenta el diagrama de flujo de la metodología

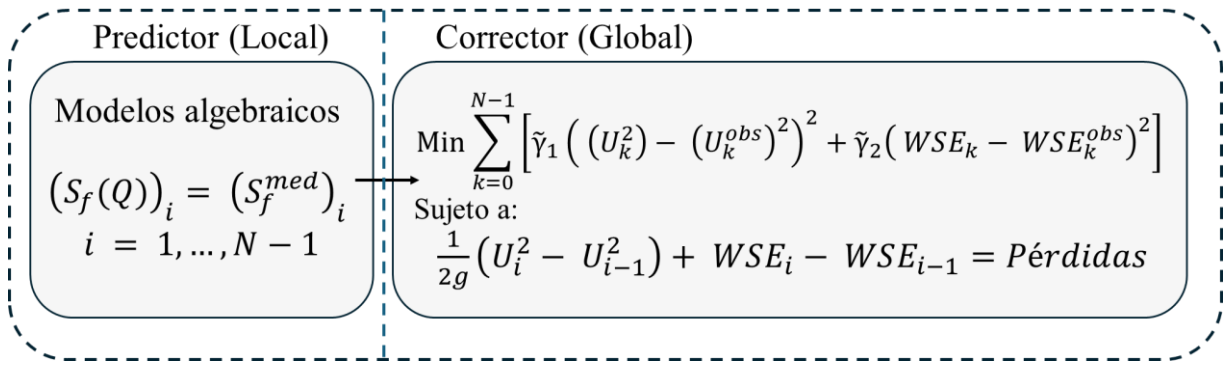


Figura 2. Diagrama y ecuaciones del método IPCDA.

El proceso se detiene cuando la variación entre los resultados de las iteraciones es menor que una tolerancia previamente establecida. Como resultado, se obtiene el caudal y, de forma indirecta, una batimetría simplificada del río o canal al reemplazar  $WSE$  y  $h$  en la relación  $WSE = z + h$  para todas las celdas de la malla.

### 1.3. Propuesta para el presente trabajo

En el método IPCDA, los parámetros  $n$  y  $\theta$  se asumen conocidos y constantes a lo largo del tramo de río analizado. Sin embargo, en la realidad estos valores pueden variar espacialmente y están sujetos a incertidumbres asociadas a su estimación.

Como parte del proceso de evaluación del método, este trabajo presenta un análisis de sensibilidad enfocado en el ángulo lateral del cauce ( $\theta$ ) y en el coeficiente de rugosidad de Manning ( $n$ ). El objetivo es cuantificar el impacto de dicha incertidumbre sobre los resultados del IPCDA. La validación se realiza mediante la estimación del error relativo del caudal corrector. Con este enfoque se busca identificar el grado de dependencia del método respecto de esos parámetros y medir su influencia en la estimación de caudal.

En este contexto, el estudio persigue un doble objetivo: (i) realizar un análisis de sensibilidad de los parámetros de rugosidad de Manning y del ángulo lateral del canal  $\theta$ , empleando el mismo modelo unidimensional (1D) de sección transversal trapezoidal con un lecho de pendiente variable, y (ii) aplicar el método IPCDA a un caso más complejo y representativo de condiciones reales.

## 2. METODOLOGÍA DE LOS EXPERIMENTOS

Se aborda un problema unidimensional en estado estacionario, donde el IPCDA ajusta el caudal a partir de observaciones superficiales y las contrasta con la respuesta del modelo HEC-RAS 1D. Se consideran dos escenarios: (a) Canal trapezoidal sintético (Fila 1 de la Figura 3), usado para el análisis de sensibilidad a los parámetros  $n$  y  $\theta$ ; (b) Río Biobío (Fila 2 de la Figura 3), comparando  $n$  constante versus  $n$  variable.

En ambos experimentos, las métricas de desempeño se basan en el error relativo del caudal corrector.

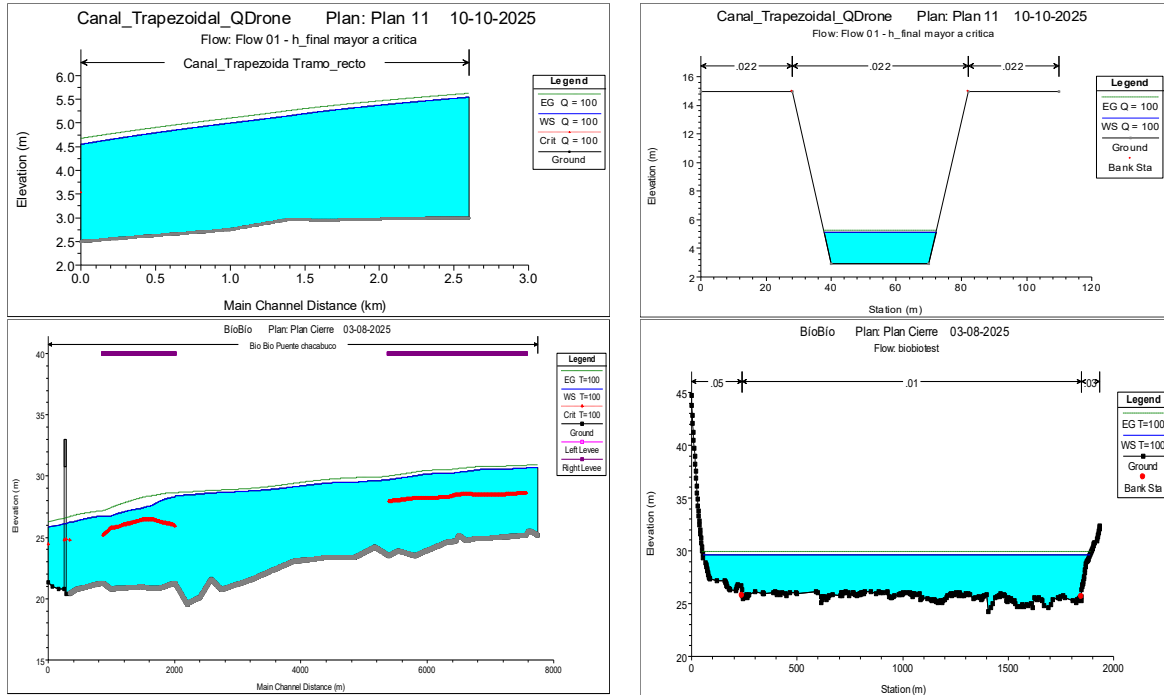


Figura 3. Configuración de experimentos: Fila 1, Modelo canal trapezoidal (HEC-RAS 1D); Fila 2, Modelo HEC-RAS del río Biobío en el tramo de desembocadura antes del puente presidente Patricio Aylwin Azócar (ex Chacabuco). Vista lateral (izq.) y sección transversal del modelo (der).

Para el experimento trapezoidal, se considera un canal de 2,6 km de longitud con pendiente de fondo variable y ancho basal fijo de 30m, discretizado espacialmente cada 1 metro. En la modelación se usó un ángulo lateral constante de  $\theta_{ref} = \pi/4$  y un valor del coeficiente de rugosidad de  $n_{ref} = 0,048$  a lo largo de todo el canal.

Para aplicar el método IPCDA en condiciones más complejas, se utilizaron los resultados de un modelo HEC-RAS previamente calibrado, de un tramo de 7.5 km del río Biobío, cercano a su desembocadura. En la Figura 3 se presenta un corte transversal a la sección modelada y una sección transversal del cauce, tal como las presenta el software. En la segunda etapa, se explora su aplicación en condiciones más complejas, considerando caudales entre 850 y 14,500 m<sup>3</sup>/s, en un tramo de 7,5 km para el modelo del río Biobío.

## 2.1. Análisis de sensibilidad de los parámetros de rugosidad de Manning y ángulo lateral

En primer lugar, se desarrolló un análisis para estudiar la dependencia en la estimación del ángulo lateral del cauce  $\theta_{ref} = \pi/4$ , manteniendo constante el valor del coeficiente de rugosidad en  $n_{ref} = 0.048$ . Para esto se consideran tres ángulos laterales asociados a relaciones H/V de 3:1, 1:1 y 0:1 (o  $\theta = 0.321$ ,  $\pi/4$  y  $\pi/2$  respectivamente). En segundo lugar, se estudió la sensibilidad del método IPCDA frente a modificaciones asociadas al coeficiente de rugosidad de Manning, se aplicó el método considerando variaciones de  $n$  entre en el rango de  $[0.85 n_{ref}, 1.15 n_{ref}]$  –es decir +-15%– en incrementos de  $0.05 n_{ref}$  (5%).

Las simulaciones se realizaron para los caudales: 2.5, 5, 10, 25, 50, 100 [m<sup>3</sup>/s], considerando siete tramos descritos mediante el comportamiento local de B, U y WSE, representando distintas condiciones hidráulicas del flujo a lo largo del canal.

## 2.2. Experimento basado en información del río Biobío

Se estudió la selección de tramos para la aplicación del método, donde el criterio principal se basa en el balance entre los términos dominantes de la ecuación de energía. Para ello, se analizaron las condiciones en las cuales la fase inicial del método, correspondiente a la etapa predictor, satisface los requerimientos necesarios para la correcta aplicación del esquema. Dado lo ancho del río en este tramo, las secciones transversales del cauce se aproximaron mediante una geometría rectangular al aplicar el método IPCDA. El análisis se realizó para los caudales 850, 2 000, 6500, 9400, 10800, 12000 y 14500 m<sup>3</sup>/s.

En esta línea, se examinaron las condiciones bajo las cuales la fase predictora cumple con los criterios necesarios relacionados con una estimación del número de Froude. El estudio se realiza considerando el comportamiento de la proporción  $I_a = \frac{u^2}{2g WSE}$ , el cual se puede vincular con el número de Froude en la ecuación de energía, y por lo tanto se vincula con la condición de régimen de río.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Canal trapezoidal

En la Tabla 1 se presentan los errores relativos del caudal calculado por la metodología para los distintos casos de estudio, asociado a la variación del ángulo lateral y la variación del caudal de diseño.

Tabla 1. Errores relativos para la estimación de caudales para un canal trapezoidal con ángulo lateral  $\theta_{ref} = \pi/4$  al usar otros valores de  $\theta$ .

Ángulo lateral	Caudal [m <sup>3</sup> /s]					
	2.5	5	10	25	50	100
0.321	1.1%	2.0%	1.5%	2.7%	3.1%	4.4%
$\pi/4$	0.5%	1.0%	0.2%	0.6%	0.1%	0.4%
$\pi/2$	-1.0%	-1.2%	-3.1%	-4.7%	-7.5%	-9.8%

Se observa que el error tiende a incrementarse con el aumento del caudal, lo que sugiere una mayor sensibilidad del método ante variaciones geométricas en eventos donde el caudal pueda ser mayor. Los valores analizados de los ángulos laterales no corresponden a una variación simétrica respecto a un valor central, pero se observa una tendencia creciente en el error permite identificar configuraciones geométricas más críticas desde el punto de vista de la calibración del modelo. Finalmente, se remarca la coherencia en los estimativos ya que al aumentar el ángulo se aumenta el área y por lo tanto el estimativo es por exceso. Similar en el caso contrario.

La Figura 4 muestra que, para los casos simulados, la variación del coeficiente de Manning implica una variación creciente, prácticamente lineal, en el error relativo del caudal corrector, con valores del coeficiente de determinación  $R^2$  entre 0.984 y 0.998 para los distintos caudales de estudio. Las curvas asociadas a los distintos caudales son casi paralelas, lo que sugiere que la precisión depende principalmente de la estimación de la rugosidad.

Un aspecto relevante que se observa es que, para variaciones pequeñas en el coeficiente ( $\pm 5\%$ ), el error en el caudal corrector se mantiene dentro de un rango de 5-10%. Sin embargo, cuando la variación alcanza el rango de  $\pm 15\%$ , se pueden generar errores de hasta un 25% en los caudales correctores.

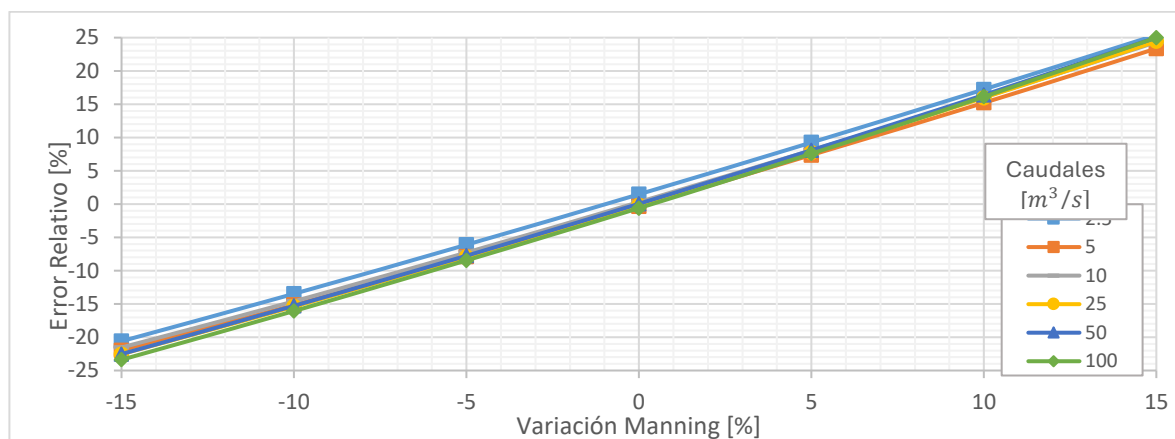
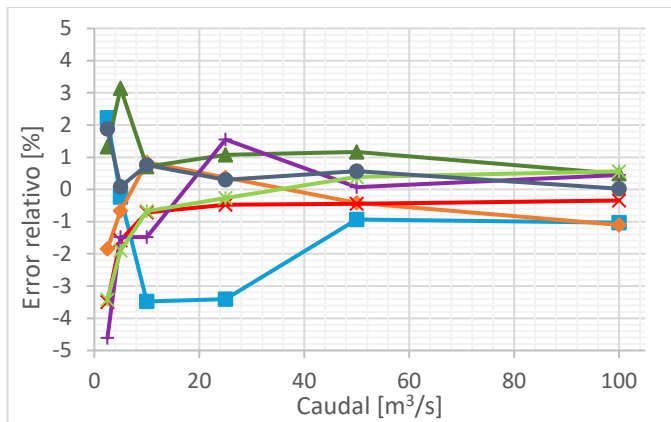


Figura 4. Variación del error relativo al caudal usado para la simulación en función de porcentajes de cambio en el coeficiente de rugosidad de Manning usado en el método IPCDA con respecto al valor del modelo original.

También se realizaron pruebas en los 7 tramos que representan diferentes condiciones del cauce (incluyendo el cauce completo), con transiciones suaves y abruptas de la velocidad superficial, ancho y cota de la superficie libre. Al igual que para el caso anterior, para cada simulación, se calculó el error relativo asociado al caudal resultante, comparado con el caudal de referencia. La Figura 5 se presentan los promedios de los errores asociados a la variación de la rugosidad, para cada tramo y caudal de diseño. Para los caudales menores a 10 [m³/s] el promedio del error relativo es mayor en relación con los caudales mayores, siendo los tramos 5 y 4 los que presentan los mayores errores promedios, mientras que en los tramos 2 y 3 presentan un comportamiento más estable con errores menores al 2% (en valor absoluto).



Tramos	Caudales [m <sup>3</sup> /s]					
	2.5	5	10	25	50	100
Tramo 1	2.2	-0.2	-3.5	-3.4	-0.9	-1.0
Tramo 2	-1.8	-0.7	0.8	0.4	-0.4	-1.1
Tramo 3	1.3	3.1	0.7	1.1	1.2	0.5
Tramo 4	-3.5	-1.6	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3
Tramo 5	-4.6	-1.5	-1.5	1.5	0.1	0.5
Tramo 6	-3.4	-1.9	-0.7	-0.3	0.4	0.6
Tramo 7	1.9	0.1	0.8	0.3	0.6	0.0

Figura 5. Errores relativos promedios entre todas las simulaciones entre caudales de referencia (en m<sup>3</sup>/s), tramos del canal para todos los casos de variación del coeficiente de rugosidad.

Esta información permite identificar tramos críticos, donde una estimación deficiente de la rugosidad podría impactar en el desempeño del método. Esto sugiere que para caudales altos el modelo es menos sensible a variaciones en la rugosidad, cuando los tramos presentan cambios suaves en su pendiente, mientras que para el canal completo en promedio los errores no dependen del caudal, dado que estos se mantienen estables en función de la variación de los caudales.

Los resultados obtenidos en esta sección corresponden a un cauce homogéneo, donde el coeficiente de rugosidad se mantiene constante a lo largo del canal. En el capítulo siguiente se incorpora la variación espacial del parámetro de rugosidad, con el fin de analizar el comportamiento del método en un escenario más complejo y representativo de condiciones reales.

### 3.2. APLICACIÓN DE MÉTODO IPCDA USANDO RESULTADOS DE MODELOS HEC-RAS DE TRAMO INFERIOR DE RÍO BIOBIO

La Figura 6 muestran la velocidad superficial y la cota de superficie libre, que se aplican para la formulación del modelo. En la Figura 7 se pueden apreciar cambios importantes para los parámetros observados en función de la variación de la sección. Al aplicar la metodología sobre tramos que incluyen cambios severos en los comportamientos de las variables se generan errores de cálculo. Remarcamos que el criterio de selección de los tramos obedece a la necesidad de control de los gradientes, ya no se desean cambios bruscos en los comportamientos de las variables.

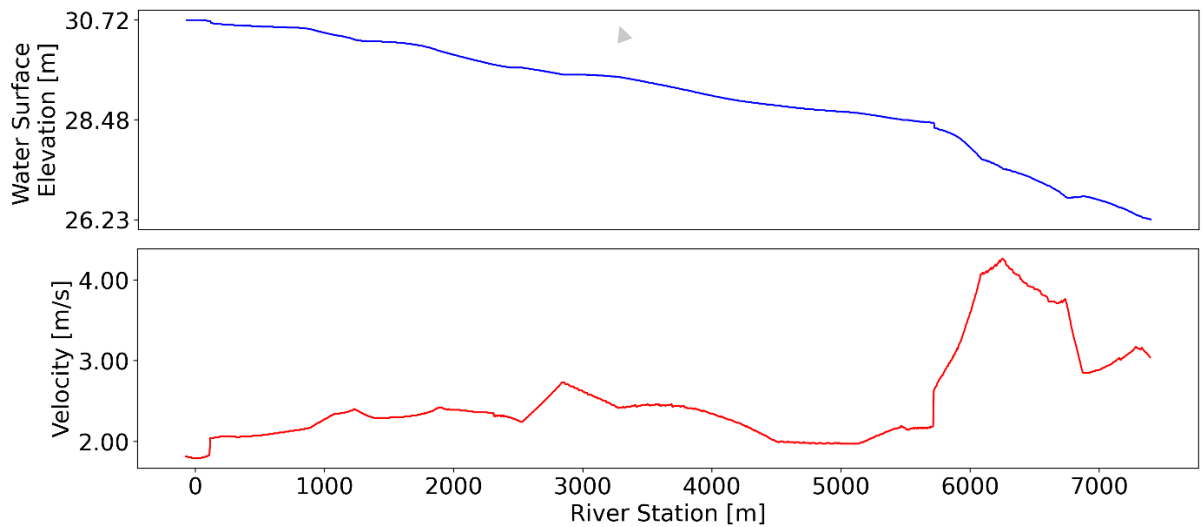


Figura 6. Información a lo largo del río Biobío en la sección modelada usando un caudal de  $14,500 \text{ m}^3/\text{s}$ . En el bloque superior se muestra la cota de la superficie libre  $WSE$  y en el inferior, la velocidad media de la sección,  $U$ . Todas estas variables podrían ser observadas o estimadas usando drones o equipos similares.

Específicamente, al integrar la Ecuación 1b en la celda de control  $[x_{i-1}, x_i]$  y factorizar por  $WSE$  se obtiene una expresión del tipo  $I_a$ . Luego, en la medida de  $I_a$  sea relativamente pequeño con respecto a 1, se estaría reafirmando que los términos dominantes en el balance de momentum corresponden ser el  $\Delta WSE$  y el término de fricción.

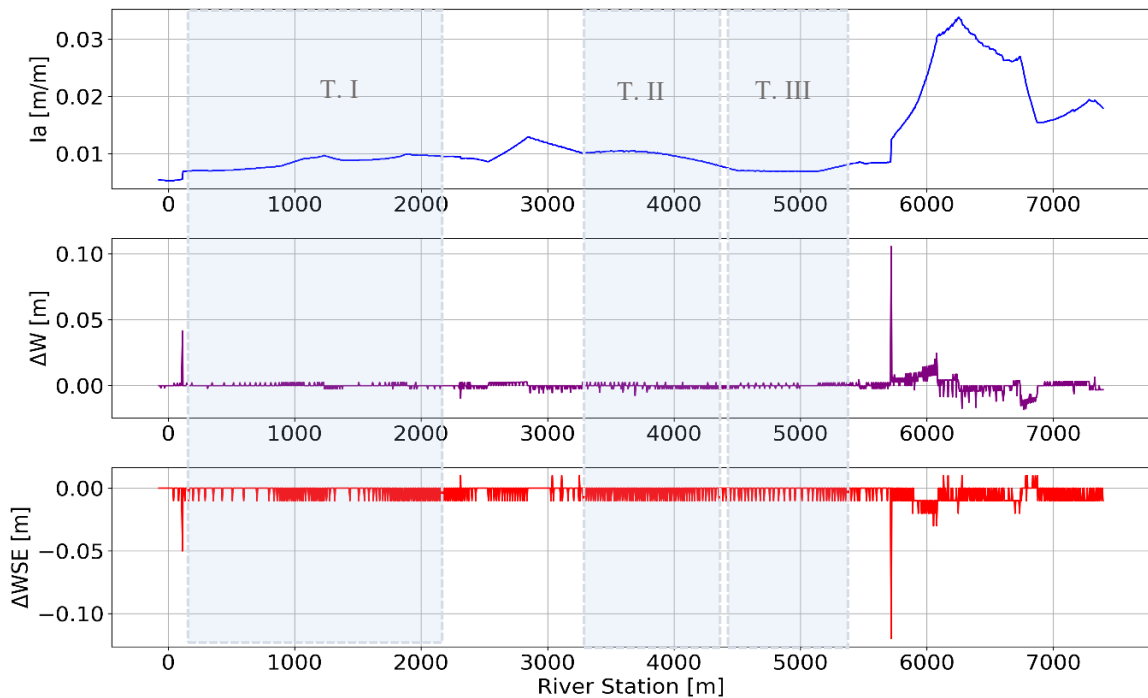


Figura 7. Análisis de las variables presentadas en Fig5. El gráfico superior muestra la variable  $I_a = U^2/(2g WSE)$  y los dos siguientes gráficos muestran la diferencia entre secciones sucesivas para las variables  $W$  ( $U^2/2g$ ) y  $WSE$  respectivamente.

Para evaluar la sensibilidad del método frente a la variación espacial de la rugosidad del cauce, se plantean dos enfoques que se diferencian en relación con el tratamiento del coeficiente de

Manning. Para el primer enfoque se ha considerado utilizar el valor promedio del coeficiente de rugosidad para cada tramo evaluado, donde  $n_{prom} = 0.0224$ , el cual se utiliza como parámetro de entrada para la evaluación del método. Luego para el segundo enfoque se incorpora la rugosidad variable entregada por el modelo HEC-RAS para cada sección transversal del tramo. Estos valores se integran en el procedimiento dentro del método IPCDA, permitiendo una representación más realista de la distribución espacial para la rugosidad del cauce. Ambas aproximaciones se realizan considerando un cauce rectangular con un ángulo lateral del  $\theta = \frac{\pi}{2}$ , lo cual nos permite una comparación mas directa del desempeño frente a la simplificación del parámetro de rugosidad.

Para evaluar el desempeño del método en condiciones más realistas, se aplicó el IPCDA al modelo hidráulico unidimensional (HEC-RAS) del río Biobío. El análisis se realizó considerando dos configuraciones del coeficiente de rugosidad de Manning: una constante a lo largo del tramo y otra variable en el espacio, de acuerdo con los valores obtenidos modelo base. Los resultados se presentan para tres tramos representativos (T1, T2 y T3) definidos según las características hidráulicas locales y la estabilidad de la superficie libre.

En las Figuras 8 (fila 1 y fila 2) se muestran los errores relativos del caudal estimado, comparando ambas configuraciones de rugosidad.

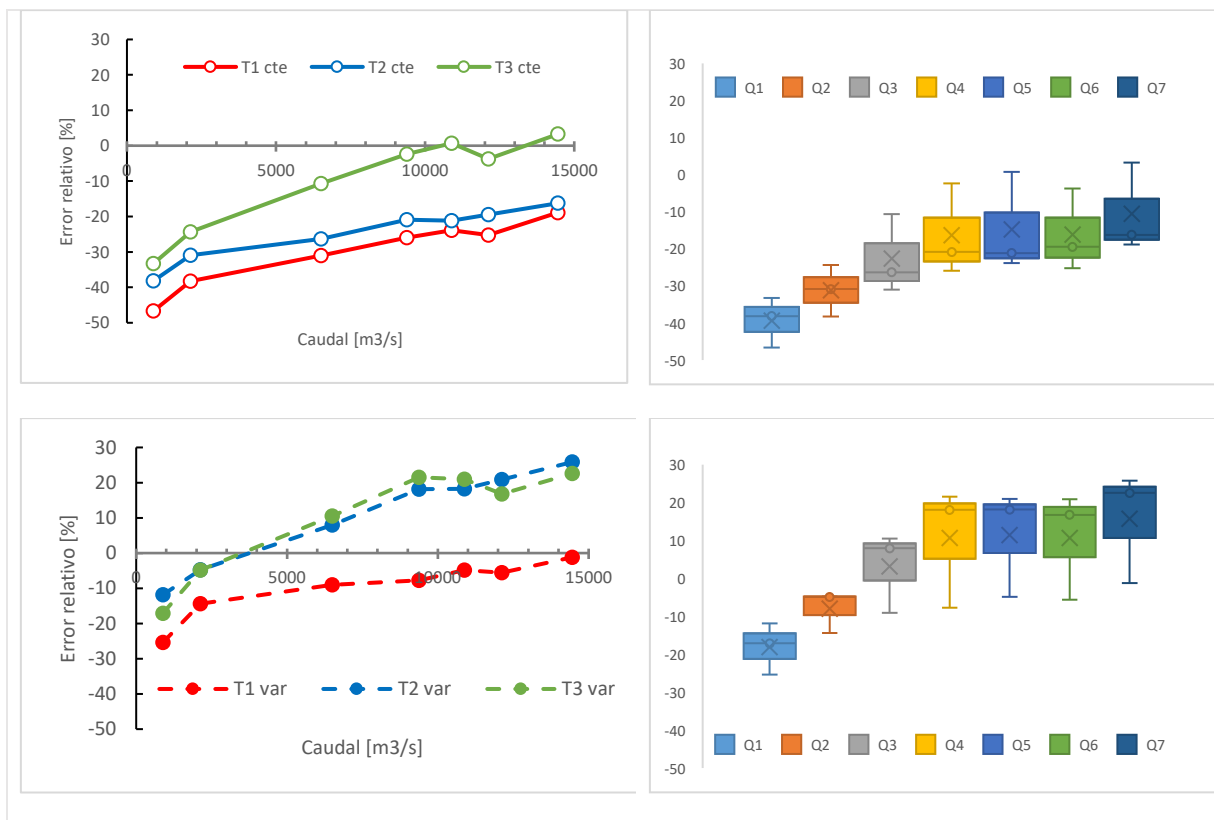


Figura 8. Fila 1. Gráfica comparativa de los errores considerando  $n$  constante. Fila 2. Gráfica comparativa de los errores considerando  $n$  variable.

Los resultados muestran que, con rugosidad constante, el IPCDA tiende a subestimar sistemáticamente el caudal en los tres tramos analizados, con errores típicos entre  $-47\%$  y  $-16\%$ , disminuyendo levemente al aumentar el caudal. En cambio, al incorporar la variación espacial de  $n$ , el método presenta un cambio de tendencia, pasando de subestimar a caudales bajo los  $6500\text{ m}^3/\text{s}$  y a sobreestimar en caudales mayores a este, alcanzando errores de hasta  $+26\%$ . Este patrón sugiere que el modelo responde de forma sensible a la distribución local de la rugosidad, la cual puede amplificar o compensar las inestabilidades hidráulicas del tramo.

En la Figura 8 (columna derecha) cada boxplot agrupa los tres tramos para un mismo  $Q$ . Se observa que con  $n$  constante la distribución del error es consistentemente negativa: las medianas se mantienen por debajo de  $0\%$ , lo que indica la subestimación entre tramos para cada caudal. En contraste, con  $n$  variable las medianas se desplazan desde los valores negativos a los positivos a medida que aumenta  $Q$ . Esto revela que la variación espacial de la rugosidad reduce el sesgo en algunos casos, por ejemplo, el Tramo 1 se acerca a  $0\%$  en caudales altos mayores a  $9400\text{ m}^3/\text{s}$ , pero aumenta la dispersión entre tramos para un mismo  $Q$ . En síntesis, para un mismo caudal, los errores no deberían ser muy dispersos si se cumple la continuidad.

En conjunto, los resultados indican que no existe una correlación lineal única entre el error y el caudal, y que el desempeño del método depende fuertemente de la interacción local entre rugosidad efectiva, geometría del cauce y gradiente de energía.

#### 4. CONCLUSIONES

Luego de haber aplicado el método inverso de asimilación de datos IPCDA (predictor–corrector) bajo distintas configuraciones de rugosidad, batimetría y caudal, con la finalidad de validar la estimación de caudales utilizando modelo 1, se abordaron dos etapas: (i) un análisis de sensibilidad en un canal trapezoidal homogéneo y (ii) la aplicación en un tramo del río Biobío modelado en HEC-RAS.

Para el primer análisis, del canal trapezoidal, donde se realizó una variación de  $\pm 15\%$  para el coeficiente de Manning respecto del valor de referencia, se obtuvieron errores del orden de  $\pm 25\%$  en el caudal estimado por IPCDA. El efecto del ángulo lateral fue acotado en el rango evaluado, aunque podría amplificarse en eventos extremos. Al tratarse de un caso homogéneo, estos resultados motivan considerar explícitamente la variación espacial de  $n$  en escenarios reales.

Para el segundo análisis, donde el método se aplicó a un modelo 1D del río Biobío, se observa que, al considerar  $n$  constante, IPCDA subestimó sistemáticamente el caudal en los tres tramos ( $-47\%$  a  $-16\%$ ), con una pequeña mejora para caudales mayores a  $9400\text{ m}^3/\text{s}$ . Con  $n$  variable, apareció una transición desde subestimación en caudales menores a  $6500\text{ m}^3/\text{s}$ , mientras que para caudales mayores a este se nota una sobreestimación: en el Tramo 1 el error se acercó a  $1\%$  para  $14\,500\text{ m}^3/\text{s}$  mientras que en Tramos 2–3 se observaron sobreestimaciones de hasta  $26\%$ .

Para este segundo experimento, dados los resultados no se logra apreciar una relación simple error–caudal válido para todos los tramos; el desempeño depende de la interacción local entre rugosidad efectiva y geometría. La precisión del método requiere caracterizar adecuadamente la magnitud y distribución espacial de  $n$ , segmentar tramos y seleccionar ventanas de cálculo coherentes. En su formulación actual, IPCDA es aplicable a flujos gradualmente variados con  $Fr < 1$ .

Para futuros estudios se recomienda: (i) incorporar la sensibilidad del ángulo lateral en geometrías irregulares y (ii) profundizar la validación con datos reales obtenidos por dron. Estos pasos encaminan la validación del método para poder estimar caudales mediante observación remota, aportando a una gestión hídrica más segura y eficiente.

## REFERENCIAS

1. Atanov, G., Evseeva, E. G., & Meselhe, E. A. (1999). Estimation of roughness profile in trapezoidal open channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125.
2. Atanov, G., & Voronin, S. (1981). *A variational problem in the hydrodynamics of open channels*.
3. Chertok, D. L., & Lardner, R. W. (1996). *Variational data assimilation for a nonlinear hydraulic model*.
4. Chow, V. Te. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill.
5. Ding, Y., Jia, Y., Asce, M., Wang, S. S. Y., & Asce, F. (2004). *Identification of Manning's Roughness Coefficients in Shallow Water Flows*. <https://doi.org/10.1061/ASCE0733-94292004130:6501>
6. Garambois, P. A., Larnier, K., Monnier, J., Finaud-Guyot, P., Verley, J., Montazem, A. S., & Calmant, S. (2020). Variational estimation of effective channel and ungauged anabranching river discharge from multi-satellite water heights of different spatial sparsity. *Journal of Hydrology*, 581. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124409>
7. Garambois, P. A., & Monnier, J. (2015). Inference of effective river properties from remotely sensed observations of water surface. *Advances in Water Resources*, 79, 103–120. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.02.007>
8. Hostache, R., Lai, X., Monnier, J., & Puech, C. (2010). Assimilation of spatially distributed water levels into a shallow-water flood model. Part II: Use of a remote sensing image of Mosel River. *Journal of Hydrology*, 390(3–4), 257–268. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.003>
9. Lai, X., & Monnier, J. (2009). Assimilation of spatially distributed water levels into a shallow-water flood model. Part I: Mathematical method and test case. *Journal of Hydrology*, 377(1–2), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.07.058>
10. Larnier, K., Monnier, J., Garambois, P. A., & Verley, J. (2021). River discharge and bathymetry estimation from SWOT altimetry measurements. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 29(6), 759–789. <https://doi.org/10.1080/17415977.2020.1803858>
11. Meneses, R., Poblete, D., & Peredo, M. (n.d.). *Inverse Predictor-Corrector Data Assimilation (IPCDA): A One-dimensional Numerical Methodology for Discharge and Bathymetry Estimation from Surface Flow Measurements*.
12. Pujol, L., Garambois, P. A., & Monnier, J. (2022). Multi-dimensional hydrological-hydraulic model with variational data assimilation for river networks and floodplains. *Geoscientific Model Development*, 15(15), 6085–6113. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-6085-2022>.