

CÁLCULO DEL TIEMPO ÓPTIMO DE MEDICIÓN DE VELOCIDAD PARA LA REALIZACIÓN DE AFOROS MEDIANTE UN ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE

R. Clasing Fuentes¹ y E. Muñoz Ortiz^{2,3}

RESUMEN:

La realización de un aforo puede ser muy extensa debido a los procesos que involucra, por lo que optimizar sus diferentes etapas resulta necesario. Considerando que el tiempo de medición de velocidad es una de las principales variables que permitiría reducir los tiempos de realización de un aforo, el presente estudio busca determinar el tiempo óptimo de medición de velocidad en cada punto y con ello reducir el tiempo global de realización de un aforo. Para ello, en base a un análisis de incertidumbre sobre 8 aforos realizados en ríos vadeables ubicados en Chile centro-sur y siguiendo el método Área-Velocidad (USGS, 2010) se determinó el tiempo óptimo de medición de la velocidad. Se calcularon las bandas de incertidumbre asociadas a la medición de la velocidad media desde 1 a 70 segundos y luego en base a criterios de variación del ancho de las bandas y de la pendiente de estas se determinó el tiempo óptimo. Se consideró como tiempo óptimo de medición de velocidad aquel tiempo en que se observa estabilidad de ambos criterios (ancho de banda y pendientes). Se consideró que seguir midiendo posterior al tiempo de convergencia de ambos criterios, no contribuye a una solución más precisa, ni con menor incertidumbre. De los resultados se concluye que el tiempo óptimo de medición es de 17 segundos, por lo que se recomienda una medición puntual de velocidad durante 20 segundos.

PALABRAS CLAVE: Aforo; análisis de incertidumbre; GLUE.

ABSTRACT:

The realization of a flow measurement could be very extensive due the processes involved, so optimizing in its different stages becomes necessary. Considering that the velocity measurement time is one of the main variables that would allow to reduce the times of a flow measurement realization, the present study seeks to determine the optimal time of velocity measurement in each point, with this, reduce the overall time of a flow measurement realization. In this line based on an analysis of uncertainty on 8 flow measurement made in wading rivers located in south-central Chile and following the Area-Speed method (USGS, 2010), the optimum speed measurement time was determined. The uncertainty bands associated with the average velocity measurement were calculated from 1 to 70 seconds and then based on criteria of variation of bandwidth and slope of the bands, the optimum time was determined. It was considered as an optimum time of velocity measurement the time that stability of both criteria (bandwidth and slopes) is observed. It was considered that to continue measuring after the time of convergence of both criteria, not contribute to a more precise solution, or with less uncertainty. From the results it is concluded that the optimum measurement time is 17 seconds, so a punctual velocity measurement is recommended for 20 seconds long.

KEYWORDS: Flow measurement; uncertainty analysis; GLUE.

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, rclasing@ing.ucsc.cl

² Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, emunozo@ucsc.cl

³ Centro de Investigación en Biodiversidad y Ambientes Sustentables (CIBAS), Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE

1. INTRODUCCIÓN

Los estudios hidrológicos se apoyan hoy en día en un conjunto de datos hidrométricos y meteorológicos que han de tomarse directamente en terreno, midiéndolos con la precisión adecuada a los fines perseguidos y realizando mediciones continuas durante una serie de años (DGA, 1991). Parte de estos datos corresponde al registro de caudales, que resulta indispensable, ya que una buena gestión de los recursos hídricos requiere una medición precisa de éstos (USBR, 2001).

La magnitud del caudal es determinada directamente a través de aforos. Entre los diversos métodos de aforo, el más utilizado tanto en ríos vadeables como no vadeables es el método Área-Velocidad, puesto que es un método preciso y sencillo de ejecutar en terreno (Fernández et al. 2016). El caudal se calcula como el producto del área y la velocidad. La medición se realiza subdividiendo la sección transversal del flujo en segmentos (conocidas como subsecciones, verticales o áreas parciales), y mediante la medición de la profundidad, ancho y velocidad dentro de cada vertical. El caudal total es la suma de los productos de las áreas parciales de la sección transversal y sus respectivas velocidades medias (USGS, 2010).

Según recomendaciones de USGS (1983), el espaciamiento de las verticales debe proporcionar entre 25 a 30 subsecciones. Las verticales deben estar espaciadas de modo que ninguna subsección tenga más del 10% del caudal total. La medida ideal es aquella en la que una subsección tenga a lo más 5% del caudal total, pero rara vez se logra con 25 subsecciones (USGS, 1983).

Las observaciones de velocidad en cada vertical deben ser al menos 40 segundos de medición, y en el caso de correntómetros mecánicos esta debe mantenerse entre 40 y 70 segundos (USGS, 2010). Los puntos de medición de velocidad para cada vertical varían dependiendo de las profundidades (Tabla 1), considerando para mediciones por vadeo los siguientes métodos i) Método de un punto: se debe realizar una medición de velocidad a 0.6 H, con H como profundidad, medido desde la superficie del agua hacia el fondo. La velocidad medida representa en este caso la velocidad media de la columna de agua, y que se asume representativa de la subsección, ii) Método dos puntos: se realizan observaciones en la vertical a 0.2 y 0.8 H y se determina la velocidad media en la vertical calculando la media aritmética. Este caso aplica para profundidades mayores de 0.46 m y según USGS (2010) para correntómetros como Pygmy o ADV (Acoustic Doppler Velocimeter). Adicionalmente, si la velocidad a 0.8 H es mayor que la velocidad a 0.2 H, o si la velocidad a 0.2 H es el doble de la velocidad a 0.8 H; se consideran velocidades anormalmente distribuidas, y se recomienda utilizar el método de los tres puntos (USGS, 2010). iii) Método tres puntos: este método aplica cuando la velocidad está seriamente afectada por la fricción o por la turbulencia producida por el arroyo o una obstrucción en la corriente. La velocidad media de la subsección se calcula según la ecuación indicada en la Tabla 1 y se deben medir las velocidades a 0.2, 0.6 y 0.8 H (registrados desde la superficie del agua). Este método sólo se aplica cuando las profundidades de río o canal son superiores a 0.46 m (USGS, 2010).

Tabla 1: Velocidad media a distintas profundidades para medición por vadeo (USGS, 1983).

| Número de mediciones | Profundidad (m) | Puntos medidos desde la superficie del agua | Cálculo de la velocidad media |
|----------------------|-----------------|---|----------------------------------|
| 1 | 0.09-0.46 | 0.6 | $V_{0.6}$ |
| 2 | más de 0.46 | 0.2 y 0.8 | $0.5(V_{0.2}+V_{0.8})$ |
| 3 | más de 0.46 | 0.2, 0.6 y 0.8 | $0.25(V_{0.2}+2V_{0.6}+V_{0.8})$ |

Dependiendo de la normativa para la realización de aforos y de los tiempos de medición por puntos, la realización de un aforo puede llegar a ser muy extensa. Para simplificar esta tarea sin perder precisión y calidad de los resultados, se han desarrollado equipos electrónicos que simplifican el proceso de adquisición de datos y aumentan la precisión de éstos, pero los tiempos de medición y gastos de recursos en terreno aún presentan holguras. Debido a esto, optimizar las diferentes etapas de la realización de un aforo apunta a disminuir los recursos empleados, y también el riesgo asociado a la medición. Hasta ahora se han automatizado los procesos de adquisición o

procesamiento de datos (Saldías, 2016) y se ha estudiado la incertidumbre de caudales comparando métodos y tiempos, basado en la norma ISO 748 (Helmbrecht et al., 2004, Fernández et al., 2016), pero no se han reducido justificadamente los tiempos de medición puntual de velocidad para la realización de un aforo. Adicionalmente se ha cuantificado, caracterizado y evaluado la incertidumbre de caudales en estaciones de medición, utilizando tal información para proporcionar una medida de referencia de caudales en Inglaterra y Gales (Coxon et al., 2015). Las técnicas para cuantificar la incertidumbre en los datos de caudal se están convirtiendo en un área cada vez más importante de la investigación en hidrología (McMillan et al., 2012), ya que la fiabilidad de los valores depende de la incertidumbre en los datos y del método de cálculo (Westerberg y McMillan, 2015) para la posterior gestión de recursos hídricos, ya que una atención inadecuada a esos aspectos a la hora de adoptar decisiones podría dar lugar a resultados insatisfactorios (UNESCO, 1996).

Beven y Binley (1992) desarrollaron una metodología para la estimación de la incertidumbre asociada a un modelo hidrológico, su uso se demuestra mediante una aplicación al conjunto de datos de escorrentía de cuencas experimentales de Gwy del Instituto de Hidrología en Plynlimon, Midwales, que fue utilizado anteriormente por Calver (1988) y Binley et al. (1991). Este modelo denominado Estimación de Probabilidad e Incertidumbre Generalizada (GLUE) representa una extensión del análisis de sensibilidad generalizada publicada por Hornberger y Spear (1981) y Spear et al. (1994). Esta considera que muchos conjuntos diferentes de parámetros de un modelo se eligen al azar, teniendo la posibilidad de realizar varias simulaciones que puedan representar la realidad. El objetivo de la metodología de GLUE es producir un conjunto de valores que reflejan adecuadamente la incertidumbre derivada del proceso de modelado y que reproduzcan el comportamiento observado dentro del rango de resultados (Paredes, 2013). GLUE ha sido utilizada en la calibración y análisis de la capacidad predictiva de modelos de transporte de solutos en un río (Camacho y Cantor, 2006), en el análisis de la incertidumbre de parámetros en el modelado hidrológico y de sedimentos (Shen et al., 2012), en el estudio del comportamiento de modelos hidrológicos (Vargas-Luna, 2011), entre otros. Por ello, en el presente estudio se utilizó la metodología GLUE para calcular la incertidumbre asociada al cálculo de aforos para diferentes tiempos de medición puntual de la velocidad y a partir de ello determinar el tiempo óptimo de medición de ésta.

Para el cálculo de aforos se requieren las características geométricas de la sección de río y medir la velocidad en diferentes profundidades. La velocidad que luego se utiliza para el cálculo corresponde a la media aritmética de la serie temporal de las velocidades medidas en cada punto. Para calcular la incertidumbre siguiendo la metodología GLUE se asume que cada medición instantánea de velocidad corresponde a un valor aleatorio representativo del punto de registro. Posteriormente para calcular el caudal total del aforo se utiliza el método de Área-Velocidad. Al simular este proceso a diferentes tiempos de medición, se obtienen resultados de caudal distintos. Para obtener la incertidumbre que refleje adecuadamente el aforo se realiza el proceso reiteradas veces, generando tendencias de resultados y bandas de incertidumbre.

El presente estudio tiene por objetivo determinar el tiempo óptimo de medición puntual de velocidad para la realización de un aforo, de manera de reducir el tiempo total de este. Para ello, aplicando la metodología GLUE a aforos realizados en terreno según las indicaciones de USGS (2010) se analiza la incertidumbre comparando anchos, pendientes y variaciones de las bandas de incertidumbre y se definen criterios para determinar el tiempo óptimo de medición de velocidad.

2. **ÁREA DE ESTUDIO**

El área de estudio definida corresponde a ocho secciones de ríos ubicados en Chile centro-sur. Estas secciones presentan diferentes características de ancho, profundidad y velocidad, entre otros. La Figura 1 muestra la ubicación de los aforos, mientras que la Figura 2 resume las características geométricas y de velocidad de las secciones aforadas. Las secciones aforadas cubren un rango de 3.6 a 47.8 m de ancho, 0.24 a 1.17 m de profundidades máximas y velocidades medias desde 0.012 a 0.88 m/s.

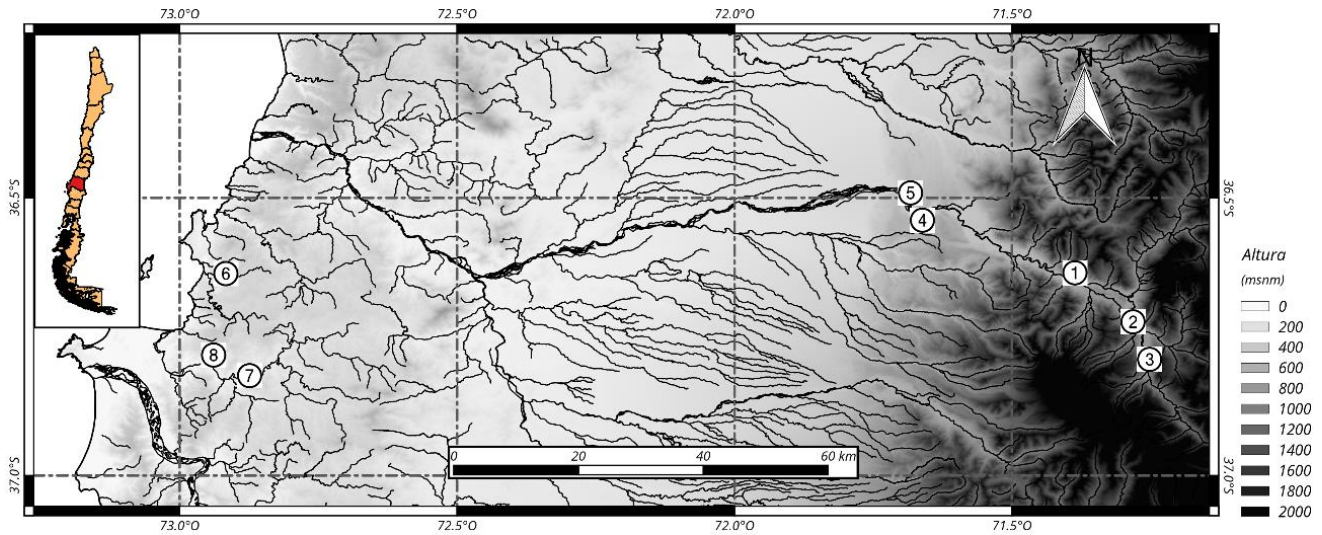


Figura 1: Área de estudio y ubicación de los aforos realizados.

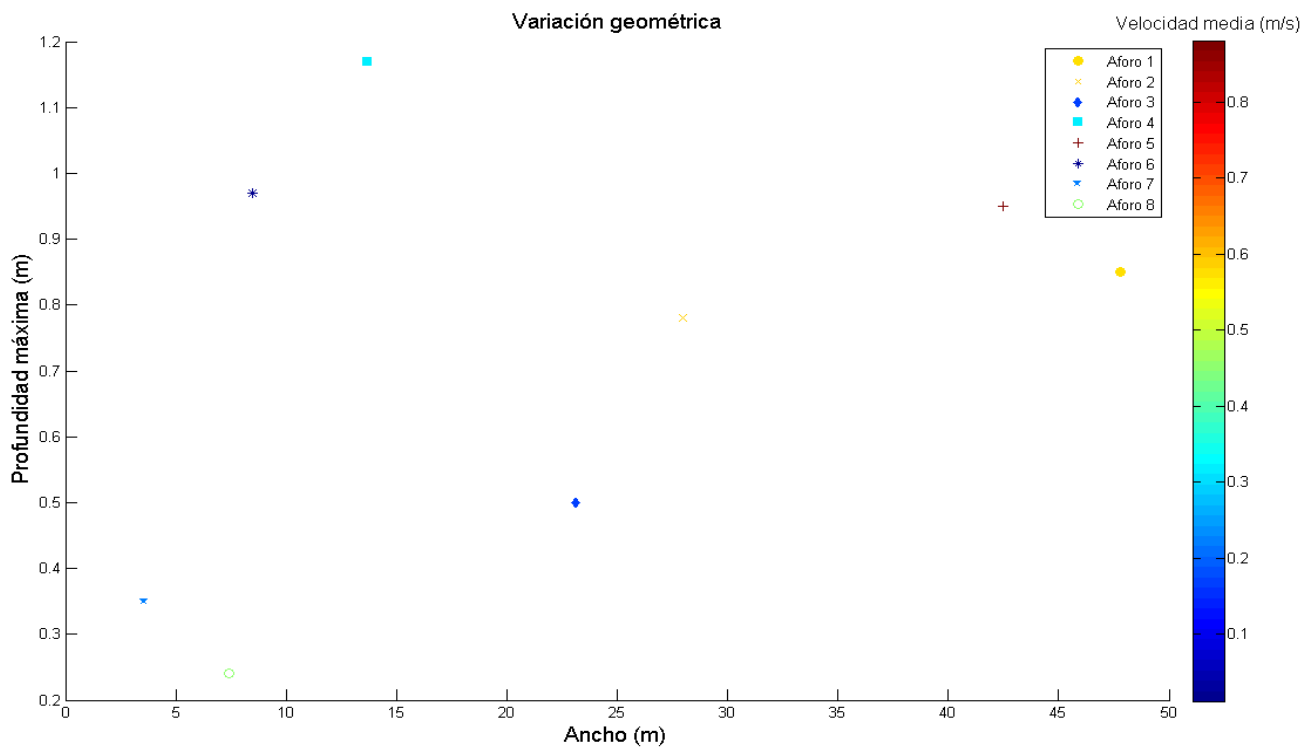


Figura 2: Caracterización geométrica y de flujo de las secciones aforadas.

3. METODOLOGÍA

Para determinar el caudal total de una sección transversal de río se utilizó el método Área-Velocidad como base para este estudio. En este método el caudal de una subsección es el producto entre el área y la velocidad media de esta. Por su parte, el caudal total es la suma de los caudales de todas las subsecciones. Cabe mencionar que el presente estudio tiene por objetivo determinar el tiempo óptimo de medición de velocidad media para un aforo considerando el método de medición por puntos (USGS, 1983), es un método establecido y ampliamente utilizado. El presente estudio no busca analizar la incertidumbre o precisión del método de aforo USGS (1983).

La metodología GLUE rechaza la idea de una sola solución óptima y adopta el concepto de equifinalidad de modelos, parámetros y variables (Beven y Binley, 1992). La equifinalidad se origina en el conocimiento imperfecto del sistema considerado, por lo tanto, diferentes conjuntos de modelos, parámetros y/o variables tienen una probabilidad de certidumbre para representar correctamente un sistema. La metodología GLUE tiene como objetivo encontrar posibles conjuntos de modelos, parámetros y/o variables que de manera equivalente representen un proceso natural observado y por lo tanto, al existir diferentes representaciones equivalentes de un sistema se tiene la incertidumbre de dicha representación.

Considerando que el tiempo de medición de velocidad media es una de las principales variables que permitiría reducir los tiempos de realización de un aforo, el presente estudio se enfoca en determinar el tiempo óptimo de medición en cada punto y con ello reducir el tiempo global de realización de un aforo. Para ello la metodología del presente estudio considera la velocidad de cada punto de aforo como un conjunto de valores independientes que forman una muestra aleatoria de la velocidad.

En el procedimiento se calcularon las velocidades medias de cada punto de aforo para diferentes tiempos de medición, desde uno hasta 70 segundos. Por ejemplo, se extrajo 1 valor aleatorio de la muestra de velocidades, para cuando el tiempo de medición era 1 segundo, del mismo modo para un tiempo de medición de 2 segundos, se utilizaron 2 valores aleatorios para calcular la velocidad media, hasta completar 70 segundos de medición de velocidad media en el punto de aforo. Posteriormente se calcularon las velocidades medias temporales para cada vertical según los criterios de la USGS (1983) descritos en la Tabla 1 y utilizando el método Área-Velocidad el caudal total de cada aforo. La extracción de valores de velocidad al azar se realizó con una distribución de probabilidades uniforme, permitiendo que las selecciones puedan repetirse.

Para crear la superficie o región de incertidumbre se utilizó el método de Montecarlo, el cual consiste en realizar “n” experimentos con variables y/o parámetros elegidos al azar. Con ello se obtienen un conjunto de resultados posibles o correctos, los que componen las bandas de incertidumbre. En el presente estudio se realizaron 50 mil simulaciones de caudal a diferentes tiempos de medición de velocidad para cada sección de aforo. En el análisis de éstas se descartaron los extremos de aquellos resultados posibles (5% superior e inferior) siguiendo las recomendaciones establecidas en Beven y Binley (1992).

La obtención de registros de terreno se realizó según las recomendaciones establecidas en USGS (2010). Como criterio de selección de las secciones de aforo se definieron ríos vadeables con profundidades inferiores a 1.6 m. Se realizaron 8 aforos considerando 26 verticales por sección de aforo. Se registró la geometría de cada sección y de cada vertical asociada. Luego se registró la velocidad instantánea por cada segundo de medición durante un tiempo total de 120 segundos. De esta manera se obtuvo una muestra con 120 registros aleatorios de velocidades instantáneas para cada punto de medición de velocidad. Con ello se estima que el tamaño de la muestra fue amplia, representativa y suficiente para conseguir los valores aleatorios del proceso GLUE.

La Figura 3 muestra un esquema de los resultados obtenidos para el Aforo 1. La Figura 3.a muestra una simulación del caudal con diferentes tiempos para el cálculo de la velocidad media por subsección, la Figura 3.b muestra 50 mil simulaciones del mismo caudal para diferentes tiempos de medición y la Figura 3.c muestra las bandas de incertidumbre del aforo y la media representada por la línea negra continua de éstas.

Para el registro de velocidades en terreno se utilizó un correntómetro electromagnético Valeport 801. Este equipo tiene una precisión de $\pm 0.5\%$. Los medidores electromagnéticos son adecuados para realizar medidas de velocidad puntual. Estos instrumentos tienen la ventaja de no tener partes móviles y de ese modo se elimina la incertidumbre debida a fricción y resistencia (ISO 748, 2007).

Para analizar el efecto de la precisión del instrumento en el cálculo de las bandas de incertidumbre se consideró un factor de error que varía de manera aleatoria dentro de la precisión del instrumento (factor entre 0.995 y 1.005 que corresponde a $\pm 0.5\%$ de error instrumental). Cada valor de velocidad utilizado en el cálculo de las bandas de incertidumbre se multiplicó por un factor de error escogido aleatoriamente, con distribución uniforme, dentro del rango de precisión. Luego, con el objetivo de analizar la influencia del error instrumental sobre las bandas de

incertidumbre, se comparó la variación porcentual de las bandas de incertidumbre superior e inferior para el Aforo 1. Los resultados se muestran en la Figura 4.

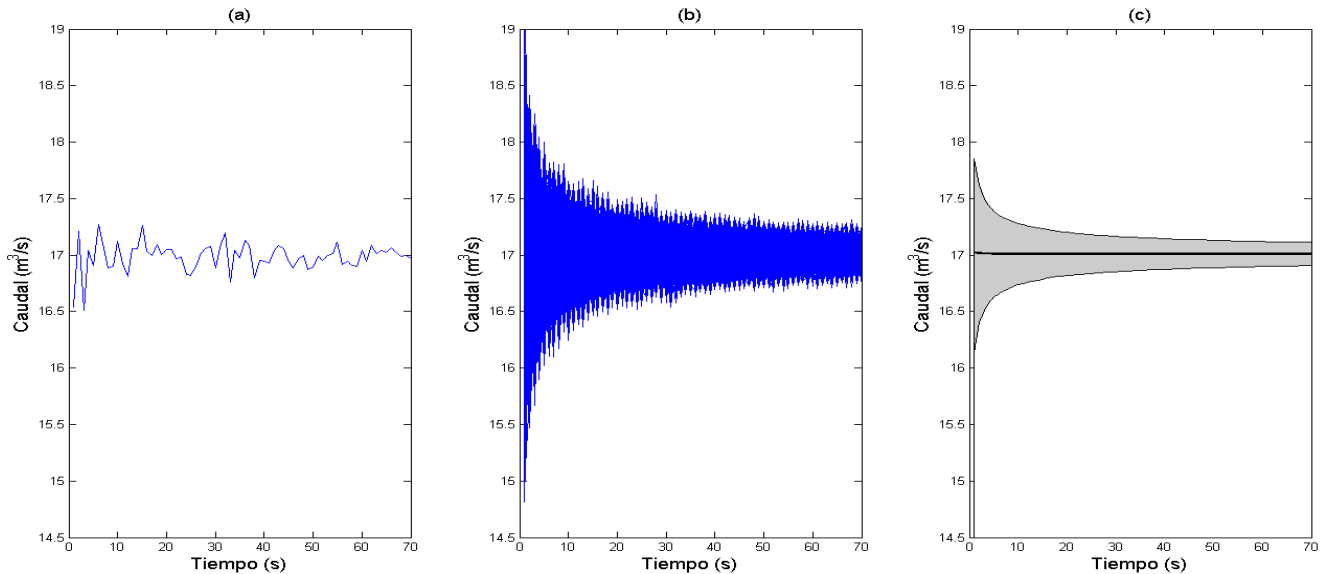


Figura 3: a) Una simulación de cálculo de caudal para distintos tiempos de medición, b) 50 mil simulaciones de caudal para distintos tiempos de medición, c) bandas de incertidumbre de un aforo descartando el 5% superior e inferior de las simulaciones, con la línea negra como la media de éstas.

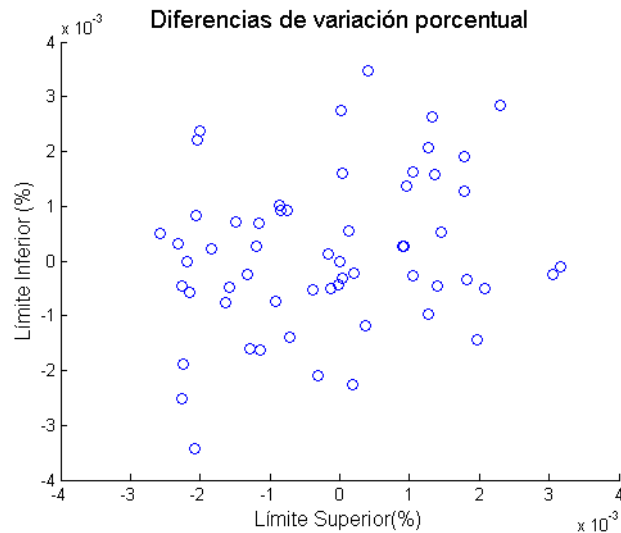


Figura 4: Comparación de variación porcentual de las bandas de incertidumbre superior e inferior, producto de incluir el error instrumental.

La Figura 4 muestra que la dispersión no presenta tendencias y sus diferencias están por debajo de 0.004%, con ello se demuestra que la precisión del equipo es despreciable en el cálculo de incertidumbre y por lo tanto no influye en la estimación del tiempo óptimo.

Para determinar el tiempo óptimo de medición de velocidad por punto de aforo se utilizaron dos criterios, uno basado en la variación del ancho de la banda de incertidumbre y otro basado en las pendientes de los límites superior e inferior de la banda de incertidumbre para cada aforo. Se consideró el ancho de la banda como la diferencia entre los límites superior e inferior de esta. Este ancho define el rango de los resultados de caudal total en m^3/s para los distintos tiempos de medición. Para determinar la variación del ancho de la banda de incertidumbre

se calculó la diferencia porcentual cada un segundo (Ecuación 1), donde H_i es el valor del ancho de la banda en un determinado tiempo i .

$$\text{Diferencia porcentual} = \frac{H_{i-1} - H_i}{H_{i-1}} \cdot 100 \quad (1)$$

Como criterio se utilizó que diferencias porcentuales menores a 5% en la variación del ancho de la banda no son significativas, por lo tanto, al observar variaciones inferiores se consideró como un criterio de estabilización de las bandas de incertidumbre y como criterio de definición del tiempo óptimo de medición de velocidad.

Por otra parte, se calcularon las pendientes de los límites superiores e inferiores de cada banda de incertidumbre cada un segundo y se consideró que con pendientes menores a 1% la variación de estas se asume despreciable. La mantención ininterrumpida de ambos criterios durante el tiempo de medición demuestra la estabilidad en el ancho y en los límites de la banda. Por lo tanto, al tiempo en que comienza la estabilidad de ambos criterios, se consideró como el tiempo óptimo de medición, ya que las variaciones se asumen despreciables y, en consecuencia, sobre dicho tiempo de medición seguir midiendo no contribuye ni a una solución más precisa, ni con menor incertidumbre.

Finalmente se compararon los resultados de aforos realizados en terreno, sus bandas, sus límites y sus anchos de bandas, y se aplicaron los criterios definidos para la elección del tiempo óptimo. Adicionalmente se analizó y cuantificó el cambio de la incertidumbre entre distintos tiempos de medición.

4. RESULTADOS

Se obtuvieron las bandas de incertidumbre, el ancho de cada banda y las pendientes de los límites superior e inferior de estas para los 8 aforos realizados. La Figura 5 muestra, a modo de ejemplo, los resultados del aforo 4. Adicionalmente la Figura 5 incluye el criterio de variación porcentual menor a 5% para el ancho de banda y el criterio de pendientes menores a 1% de los límites superior e inferior de la banda.

La Figura 5 muestra que a partir de los 13 segundos se estabiliza una variación porcentual menor a 5%. En relación al criterio de variación de las pendientes de los límites de una banda superior e inferior, se observa que a partir de los 6 segundos ambas pendientes varían menos de 1%. Por lo tanto, para el Aforo 4 el tiempo óptimo de medición según ambos criterios es de 13 segundos.

La Figura 6 muestra los resultados obtenidos para los 8 aforos, en donde se indica el tiempo en que se establecen los criterios de pendiente menor a 1% y variación porcentual del ancho de banda menor a 5%. A modo de comparación, se consideró añadir un segundo criterio de estabilidad para el ancho de la banda, calculando el tiempo en donde la variación porcentual es menor a 2.5%.

Dado que a mayor tiempo de medición la incertidumbre se reduce, se calculó el beneficio porcentual de medir a diferentes tiempos. Para ello se comparó la disminución del ancho de la banda de incertidumbre desde los 17 a los 34 segundos y de la misma manera desde los 17 a los 70 segundos, ya que es el tiempo límite de medición según la normativa actual y donde la incertidumbre es menor. La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos.

La Tabla 2 muestra que en promedio las bandas de incertidumbre se reducen solo 0.61 y 1.05% al aumentar el tiempo de medición de la velocidad desde 17 a 34 y 70 segundos respectivamente. Del mismo modo como máximo se observa que la incertidumbre se reduce 1.32 y 2.27% al medir 34 y 70 segundos respectivamente. Dado que la variación de la incertidumbre en relación al tiempo de medición es considerablemente baja, se sostuvo el criterio de una variación porcentual menor a 5% que representa la estabilidad de la curva de anchos de bandas acompañado del criterio de pendientes menores a 1%. Por lo tanto, según dichos criterios, el tiempo de medición donde las curvas se estabilizan y el aporte en la calidad de los resultados deja de ser significativo comienza desde los 17 segundos y se reconoce como el tiempo óptimo de medición de velocidad puntual de un aforo.

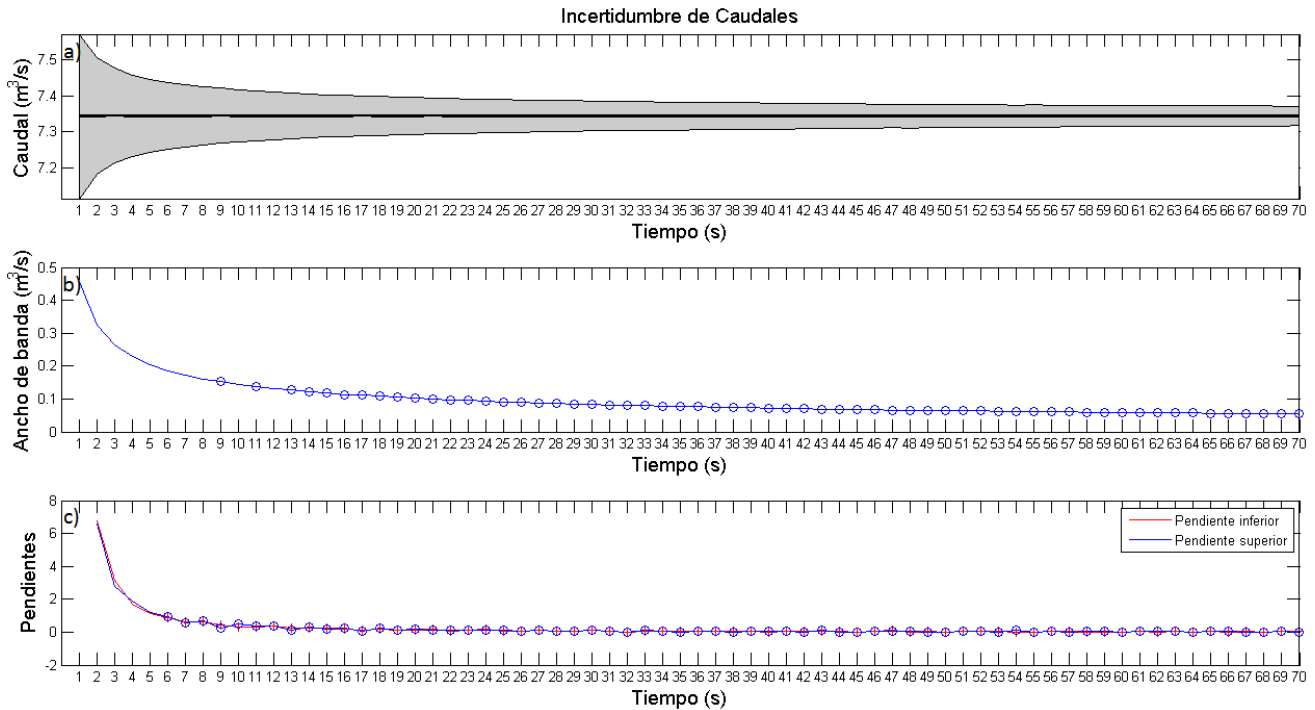


Figura 5: Representación de resultados para un aforo, a) bandas de incertidumbre, b) ancho de bandas con indicadores de criterio de variación porcentual menor a 5%, c) pendientes superior e inferior con indicadores de criterio de pendientes menores a 1%.

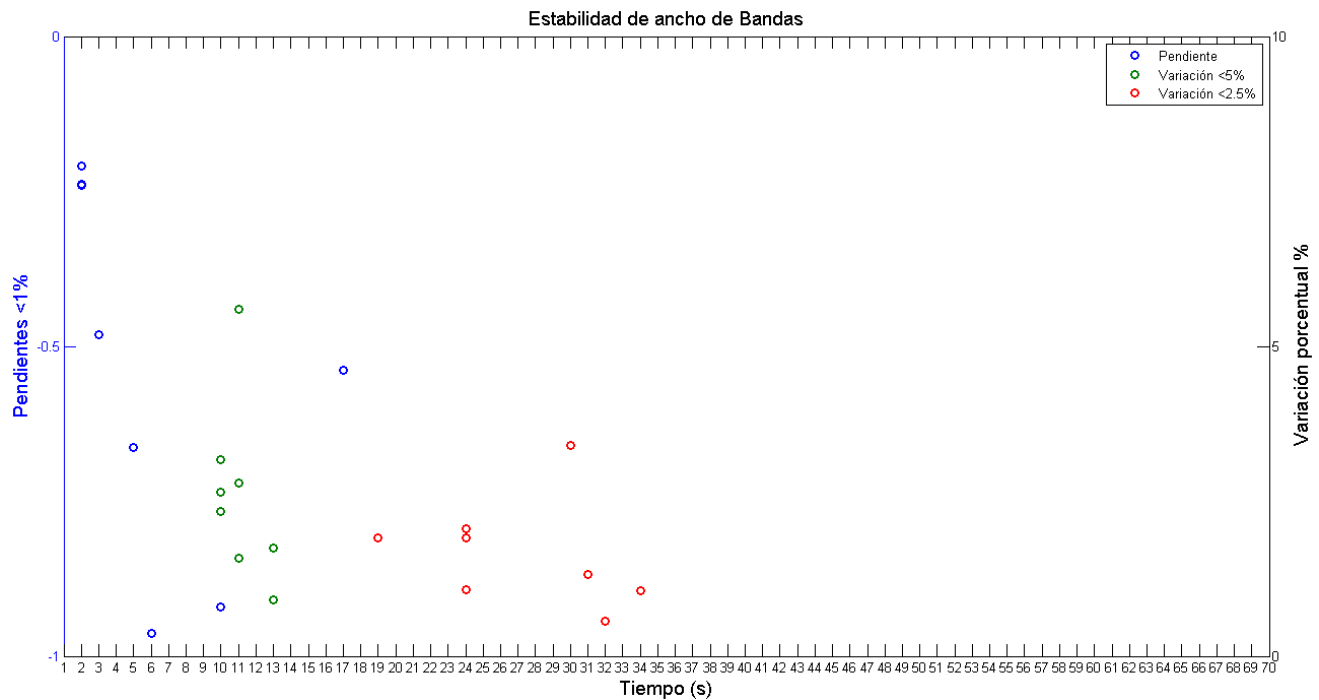


Figura 6: Tiempo en que se estabilizan los diferentes criterios.



Tabla 2: Diferencia porcentual del ancho de banda de incertidumbre para distintos tiempos.

| Aforo | Variación (%) de 17 segundos | |
|-------|------------------------------|---------------|
| | a 34 segundos | a 70 segundos |
| 1 | -0.79 | -1.24 |
| 2 | -0.46 | -0.78 |
| 3 | -0.52 | -0.91 |
| 4 | -0.60 | -1.03 |
| 5 | -0.37 | -0.64 |
| 6 | -1.32 | -2.27 |
| 7 | -0.67 | -1.15 |
| 8 | -0.24 | -0.40 |
| Media | -0.61 | -1.05 |

En base a los resultados obtenidos, se puede recomendar un tiempo de medición de velocidad de 20 segundos, para ríos vadeables de características en el rango presentado en este estudio y siguiendo el método de aforo establecido por USGS (1983). Al comparar la incertidumbre de un aforo al medir entre 20 y 70 segundos, el cual es el tiempo máximo de medición de velocidad media de un punto de aforo que exige la normativa USGS (1983), se obtiene una reducción de la incertidumbre de 0.89% en promedio para las ocho secciones aforadas y 1.95% como máximo (Aforo 6).

Considerando los criterios de pendientes menores a 1% y de variación porcentual del ancho de la banda menor a 5% el tiempo de estabilidad se concentra entre los 10 y 13 segundos, con un aforo que cumple este criterio a los 17 segundos. Por otra parte, el cumplimiento de la estabilidad considerando una variación porcentual en el ancho de la banda menor a 2.5% para todos los aforos se encuentra a los 34 segundos.

5. CONCLUSIONES

En base a un análisis de incertidumbre de ocho aforos realizados en ríos vadeables con diferentes características en Chile centro sur, se obtuvo que el tiempo óptimo de medición puntual de la velocidad es de 17 segundos.

Se recomienda realizar mediciones de velocidad puntual en aforos en un tiempo de 20 segundos. Se calculó la ventaja de medir entre 20 y 70 segundos, que es el tiempo máximo de medición de velocidad media de un punto de aforo que exige la normativa USGS (1983) y se obtuvo que la mejora de la incertidumbre en promedio es de 0.89%.

6. REFERENCIAS

- Beven, K. and Binley, A.** (1992). "The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction". *Hydrological Processes* 6(3), 279-298.
- Binley, A. M., Beven, K. J., Calver, A., and Watts, L. G.** (1991). "Changing responses in hydrology: assessing the uncertainty in physically based model prediction", *Water Resources Research*, Vol. 27, No. 6, 1253-1261.
- Calver, A.** (1988). "Calibration, sensitivity and validation of a physically-based rainfall-runoff model", *Journal of Hydrology*, Vol. 103, No. 1-2, pp. 103-115.
- Camacho, L. y Cantor, M.** (2006). "Calibración y análisis de la capacidad predictiva de modelos de transporte de solutos en un río de montaña colombiano". *Avances en recursos hidráulicos*, Vol. 14, pp. 39-52.
- Coxon, G., Freer, J., Westerberg, I. K., Wagener, T., Woods, R. and Smith, P. J.** (2015). "A novel framework for discharge uncertainty quantification applied to 500 UK gauging stations". *Water Resources Research*, Vol. 51, No. 7, pp. 5531-5546.
- DGA Dirección General de Aguas** (1991). *Manual Básico para instrucción de hidromensores*, Ministerio de Obras Públicas, Chile.
- Fernández, G., Fernández, H. y Meissl, A.** (2016). "Determinación de incertidumbre de medición de caudal líquido en cauces". *XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Lima, Perú.
- Helmbrecht, J., López, J. y Villegas, J.** (2004). "Cálculo de incertidumbres en la medida de caudales en ríos y canales: herramientas y aplicaciones prácticas innovadoras". <http://www.ingenieriadelaagua.com/2004/jia/jia2011/pdf/p588.pdf>
- Hornberger, G. M. y Spear, R.** (1981). "An approach to the preliminary analysis of environmental systems". *Journal of Environmental Management*, Vol. 12, pp. 7-18.
- ISO 748-2007 International Organization for Standardization** (2007). *Hidrometría. Medida del caudal de líquidos en canales abiertos utilizando medidores de caudal o flotadores (UNE-EN ISO 748:2007)*. Madrid, España.
- McMillan, H., Krueger, T. and Freer, J.** (2012). "Benchmarking observational uncertainties for hydrology: Rainfall, river discharge and water quality". *Hydrological Processes*, Vol. 26, No. 26, pp. 4078-4111.
- Paredes, P.** (2013). *Sobre el rol de la incertidumbre hidrológica en la modelación de inundaciones a gran escala: Río Usumacinta, Tabasco*. Tesis de maestría. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Saldías L.** (2016). *Automatización de aforos y reportes de terreno en ingeniería hidráulica*. Tesis de título. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción, Chile.
- Shen, Z. Y., Chen, L. and Chen, T.** (2012). "Analysis of parameter uncertainty in hydrological and sediment modeling using GLUE method: a case study of SWAT model applied to Three Gorges Reservoir Region, China". *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 16, No. 1, pp. 121-132.
- Spear, R. C., Grieb, T. M. and Shang, N.** (1994). "Parameter uncertainty and interaction in complex environmental models". *Water Resources Research*. Vol. 30, No. 11, pp. 3159-3169.
- UNESCO Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura** (1996). *Hidrología y desarrollo de los recursos hídricos en un medio ambiente vulnerable*. Programa Hidrológico Internacional, París, Francia.
- USBR U.S. Bureau of Reclamation** (2001). *Water Measurement Manual*, U.S. Department of the interior, Washington, United States.

USGS U.S. Geological Survey (1983). *Measurement and Computation of Streamflow: Volume 1. Measurement of Stage and Discharge*, U.S. Geological Survey, Washington, United States.

USGS U.S. Geological Survey (2010). *Discharge Measurements at Gaging Stations*, Chapter 8 of Book 3, Section A, U.S. Geological Survey, Washington, United States.

Vargas-Luna, A. y Monroy, J. (2011). “Estudio del comportamiento de modelos hidrológicos bajo un análisis de sensibilidad e incertidumbre”. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente* Vol. 10, pp. 65-77.

Westerberg, I. K. and McMillan, H. K. (2015). “Uncertainty in hydrological signatures”. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 19, No. 9, pp. 3951-3968.