

# INCERTIDUMBRE EN LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES DE PERÍODOS DE ESTIAJE.

Leticia Vicario<sup>1</sup>, Carlos M. García<sup>1</sup>, Laura Colladon<sup>2</sup>, Andrés Ravelo<sup>3,4</sup>,  
Andrés Rodríguez<sup>1,4</sup>.

<sup>1</sup>Instituto Superior de Recursos Hídricos, U.N.C.

Av. Filloy s/n. Ciudad Universitaria. Córdoba. C.P.: 5000. T.E.: +54 351 4333194. E-mail: lvicario@isrh.unc.edu.ar

<sup>2</sup>Centro de Investigación de la Región Semiárida, INA.

<sup>3</sup>Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales, FCA, UNC.

<sup>4</sup>CONICET.

## RESUMEN

La determinación precisa de los caudales de períodos de estiaje en ríos es necesaria para proyectos hidráulicos e hidrológicos relacionados al manejo de corredores fluviales. La estimación de caudales (Q) en las secciones de control de un sistema fluvial, se obtiene, generalmente, de un modelo que vincula valores observados de altura limnimétrica y caudal (h-Q). En este trabajo se analizan las principales causas de incertidumbre en la estimación de los caudales observados durante períodos de estiaje y se desarrolla una metodología para estimar la incertidumbre relativa en la estimación de dichos caudales a partir de la incertidumbre porcentual asociada a la determinación de las alturas limnimétricas (h) para una sección de control de un sistema fluvial. El análisis y el procedimiento desarrollado se aplican al caso particular del río San Antonio de la provincia de Córdoba, Argentina. Sobre la base del análisis realizado, se elaboraron recomendaciones para mejorar la estimación de los caudales en períodos de estiaje.

## ABSTRACT

The precise estimation of flow discharges during dry season periods is required for hydrologic and hydraulic projects related to the river management. Discharges (Q) flowing in a cross sections of a river is usually estimated using a model relating observed water depth and flow discharge (h-Q). The main uncertainty contributions to the estimates of flow discharge during dry season periods are analyzed here. In addition, a methodology is developed for quantifying the relative uncertainty in the estimates of flow discharges from the relative uncertainty in the determination of water depths (h) for a cross section of a river. The cited analysis and methodology are applied to the case of the San Antonio River, in the Córdoba province, Argentina. Finally, recommendations are presented to improve the estimation of the flow discharges during dry season periods.

## INTRODUCCIÓN

Los caudales de estiaje son los caudales que presentan una corriente de agua durante un período seco prolongado. La determinación precisa de estos caudales es necesaria para los proyectos relacionados al manejo de corredores fluviales como por ejemplo, estudios de restauración de ríos y re-naturalización de cauces (Mendiondo et al., 2000; Rodríguez et al., 2004), determinación de caudales ecológicos (Doyle et al., 2005), requerimientos de hábitat, formulación de balances hídricos (Taravella, 2002) y al análisis y mitigación de sequías (Fleig, 2004).

En general, la información de caudales (Q) en las secciones de control de un río, se obtiene de manera indirecta a partir de mediciones de la altura limnimétrica (h) y del uso de las curvas altura-caudal (h-Q). Estas curvas se generan en cada sección, a partir de valores de h y Q obtenidos de una serie de aforos realizados bajo distintas condiciones de flujo.

En este trabajo se identifican las principales causas de incertidumbre en la estimación de los caudales durante los períodos de estiaje para ríos que presentan una notable variación de caudales en distintos períodos del año. Esta característica es propia de los principales ríos de

la provincia de Córdoba, Argentina, tales como el río Suquía y sus tributarios, entre ellos el Río San Antonio (Agencia Córdoba D.A.C.yT.-Dirección de Ambiente, 2003).

## METODOLOGÍA

Las fuentes de incertidumbre en la estimación de caudales a partir de las relaciones h-Q, se pueden agrupar en:

- I. ***Incetidumbre en la determinación de la altura limnimétrica (h).*** Esta incertidumbre es originada por el posicionamiento incorrecto del nivel de referencia de la escala analógica o digital, o por la precisión adoptada en el sistema de medición para la determinación de h.
- II. ***Incetidumbre en el modelo h-Q utilizado,*** debido a los errores matemáticos y estadísticos propios del modelo y a la variación de la relación h-Q en el tiempo.

***La incetidumbre en la determinación de la altura limnimétrica (I)*** afecta a los valores de los caudales estimados en forma indirecta, a partir de una relación altura - caudal. El modelo geomorfológico h-Q propuesto por Caamaño Nelli (1999), es utilizado a continuación para evaluar estos efectos. Este modelo geomorfológico esta basado en el concepto presentado por Leopold et al. (1964) quien sugiere, a partir del estudio de datos de diferentes ríos, que las curvas de descarga de diferentes estaciones son tan semejantes en su forma que podrían ser generalizadas en una forma adimensional.

El esquema denominado “perfil equivalente” (Caamaño Nelli, 1986) homologa las ramas de una parábola de eje vertical a ambas márgenes del cauce, donde:

$$(x - x_0)^2 = 2\delta(y - y_0) \quad (1)$$

$x_0$  e  $y_0$  son las distancias respectivas del punto más profundo del perfil a los ejes de cotas y progresivas del levantamiento topográfico. El tirante  $h$ , será la diferencia entre la ordenada de la superficie libre ( $y$ ) y el fondo ( $y_0$ ) y el ancho ( $B$ ) será el doble de la distancia de cada rama al eje de simetría para la ordenada  $y$ .

$$h = y - y_0 \quad (2),$$

$$B = 2(x - x_0) \quad (3)$$

Por simplicidad se puede adoptar un nuevo parámetro:  $C_1 = (\delta\delta)^{1/2}$  por lo que la ecuación [3] resulta

$$B = C_1 h^{1/2} \quad (4)$$

En este modelo se supone por extensión un exponente variable  $p$ , donde la expresión general es:

$$B = C_1 h^p \quad (5)$$

El parámetro  $p$  varía de 0 a 1, siendo  $p = 0$  para una sección rectangular y  $p = 1$  para una sección triangular. Basado en una muestra de más de 400 secciones transversales en ríos naturales de la República Argentina, Caamaño Nelli (1999) determinó que más del 80% de las secciones analizadas presentaron un  $p=0,5$  (sección parabólica) como el valor más probable.

A partir de la ecuación (5), Caamaño Nelli (1999) propuso el siguiente modelo geomorfológico h-Q

$$Q = C h^{(p+1)\frac{5}{3}} \quad (6)$$

donde  $C$  es una constante que reúne las características de escurrimiento en dicha sección. El parámetro  $p$  describe la forma de la sección transversal de acuerdo a la expresión (5).

A partir del modelo geomorfológico  $h-Q$  incluido en la ecuación (6), los valores porcentuales de incertidumbre en la determinación de  $Q$  (denominado  $\delta Q/Q$ ) son estimados utilizando el análisis propuesto por Moffat (1988) para evaluar incertidumbres en resultados experimentales:

$$\frac{\partial Q}{Q} = \frac{5}{3}(p+1)\frac{\partial h}{h} \quad (7)$$

donde  $\delta h/h$  es la incertidumbre porcentual en la determinación experimental de  $h$ . En este trabajo se usa la siguiente expresión para representar la variable  $Q$  y su incertidumbre:

$$Q = Q_{medido} \pm \partial Q \quad (8)$$

**Las incertidumbres debido al modelo h-Q utilizado (II)**, se pueden clasificar como:

a) Las incertidumbres propias del modelo elegido debido al modelo teórico utilizado (Schmidt, 2002) y al tratamiento y al ajuste estadístico del conjunto de datos que conforman la curva h-Q. Por otra parte, la extrapolación de la curva h-Q incide en la precisión de los valores extremos de caudales estimados (máximos y mínimos), independientemente de que la curva presente un elevado coeficiente de regresión en el ajuste del conjunto de los valores observados (Clarke y Brusa, 2001).

b) La relación h-Q puede presentar variaciones en el tiempo debido al cambio en la forma de la sección. Las principales causas de este cambio son la dinámica geomorfológica de la zona en la que se emplaza la sección y/o la rotura de la estructura del muro de aforo en el caso de que el mismo exista. Otra causa de la modificación de la relación h-Q en el tiempo es el cambio en la orientación relativa de las líneas de corriente, ya que los parámetros de la curva están definidos por dicha orientación y por las contracciones de la sección. Durante el período de estiaje, las formas de fondo generan un flujo meandroso en la zona cercana a la sección de control, afectando notablemente los caudales estimados en este período.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tal como se muestra en la ecuación (7), la incertidumbre relativa en el valor del caudal estimado ( $\delta Q/Q$ ) es independiente del factor de escala “C” (ver ecuación 6), por lo tanto es necesario tener las mismas precauciones en la estimación de los caudales que fluyen en secciones transversales de ríos con la misma forma y distinta escala.

La Figura 1 representa, según la ecuación (5), la relación entre el ancho superficial B y la altura limnimétrica ( $h$ ), para distintos valores del parámetro  $p$  para un factor de escala  $C_1$  constante e igual a 10.

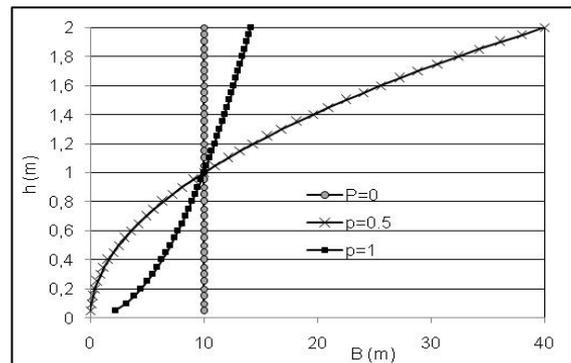


Figura 1.- Relación de la altura limnimétrica ( $h$ ) y el ancho superficial ( $B$ ), para  $C_1=10$  (constante) y distintos valores de  $p$ .

La ecuación (7) muestra que para  $p=0,5$  (valor más probable de  $p$ ) e incertidumbres porcentuales en la determinación de  $h$  del 5% y del 10%, los valores porcentuales de incertidumbre en  $Q$  son 12.5% y 25%, respectivamente. En la Figura 2 se presentan los valores porcentuales de incertidumbre en la determinación del caudal, para diferentes valores del parámetros  $p$  ( $p=0$ , sección rectangular;  $p=0,5$ , sección parabólica, y  $p=1$ , sección triangular). La Figura 2 muestra que la incertidumbre relativa en la estimación del caudal es mayor a medida que el parámetro  $p$  aumenta (menores valores para la sección rectangular,  $p=0$ ).

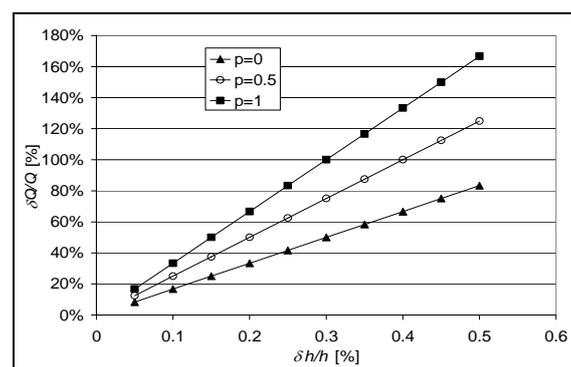
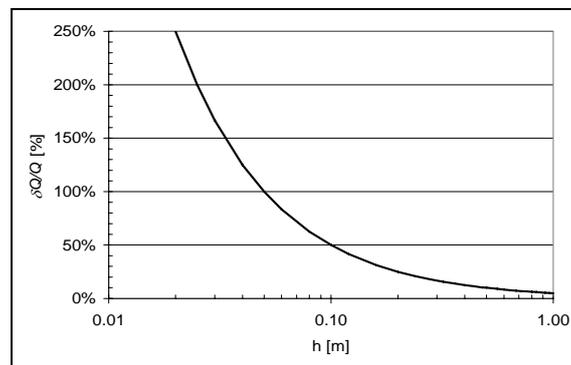


Figura 2.- Incertidumbres porcentuales en el caudal estimado.

En la Figura 3 se grafica la variación de la incertidumbre porcentual del caudal estimado en secciones de control del Río San Antonio, Provincia de Córdoba; para un rango de valores de altura limnimétrica de 0 a 1m, y con una incertidumbre en la medición de  $h$  de  $\pm 2$ cm definido por el sistema de medición de  $h$  utilizado en ese río. Cada valor de  $h$  tiene asociado una incertidumbre relativa determinada por la precisión del sistema de medición utilizado ( $\pm 2$ cm) y la magnitud del nivel medido. Las curvas incluidas en esta figura aplican a cualquier

sección de control de un sistema fluvial que presente la misma precisión en la medición de la altura limnimétrica, debido a que el parámetro  $p=0,5$  es asumido a priori como el más probable en los cursos de agua naturales (Caamaño Nelli, 1999).



**Figura 3.-** Incertidumbre porcentual en el caudal estimado en secciones de control del Río San Antonio para distintos valores de  $h$  (m),  $p=0,5$  y una precisión de  $\pm 2$ cm.

Se observa en esta figura que para valores de  $h$  mayores a 0,50 m, el valor porcentual de incertidumbre de  $Q$  será menor al 10%. Los caudales que se obtengan de alturas limnimétricas menores a 0,20 m y 0,10m en la sección de control, presentarán errores iguales o mayores al 25% y 50% respectivamente. Los registros de niveles del período 2003-2004 en la cuenca del río San Antonio (INA-CIRSA, 2003/2004) muestran que en tres secciones de control (1804: El Cajón, 1004: Icho Cruz y 604: Barrio El Canal), las alturas limnimétricas habituales fueron menores a 0,20m en el período comprendido entre Mayo y Octubre de ambos años.

En lo que se refiere a la incertidumbre debido al modelo  $h$ - $Q$  utilizado, en primera instancia los valores calculados de caudal en períodos de estiaje pertenecen generalmente al extremo inferior de la curva  $h$ - $Q$ . Las condiciones de flujo presentes durante los períodos de estiaje en el río San Antonio generan un elevado porcentaje de incertidumbre en la estimación de los caudales. El menor valor de altura limnimétrica aforado en la estación de Barrio El Canal (1969-1987) fue de 0,12m, es decir que para estimar los caudales para  $h$  menores a 0,10m es necesario realizar una extrapolación. Además, un relevamiento del estado de las estructuras de control ubicadas en la cuenca del Río San Antonio (Taravella, 2002) mostró que la mayoría de ellas presenta un deterioro notable (Figura 4) que afecta la correcta estimación de los caudales de estiaje. Estos efectos son despreciables en la determinación de caudales en períodos de crecidas, objetivo de esta red telemétrica.

Finalmente, la sección de Barrio El Canal posee un lecho arenoso, esto provoca que en períodos de estiaje el curso de agua adquiera una forma indeterminada y se separe en varios cursos menores, dentro del cauce. Esta variación con el tiempo de la orientación de las líneas de corriente implica una modificación de los parámetros de la curva  $h$ - $Q$  en la sección de control.



**Figura 4.-** Muro de aforo de Barrio El Canal, en el Río San Antonio (cuenca del dique San Roque. Fotografía del Ing. Cattalini). (Colladón y Caamaño Nelli, 2006).

## CONCLUSIONES

Con el modelo presentado en este trabajo [Ecuación (7)], es posible estimar la incertidumbre relativa en la estimación de los caudales en una sección de control, a partir de la precisión en las mediciones de las alturas limnimétricas en dicha sección. El análisis de un caso particular en el Río San Antonio, Provincia de Córdoba, muestra que no es posible determinar caudales que presenten una altura limnimétrica menor a 0,20m, con una incertidumbre porcentual menor al 25% y para una altura menor a 0,12m es necesario realizar una extrapolación de la curva h-Q, definida para la sección de aforo de Barrio El Canal. Los parámetros de la curva h-Q en dicha sección, no contemplan las diferentes formas que adopta el flujo en los períodos de estiaje, modificando la orientación relativa de las líneas de corriente para la cual fueron calculados.

A partir de este trabajo, se recomienda una estrategia de medición que permita variar la precisión en la medición de las alturas limnimétricas en por lo menos dos períodos al año (seco y lluvioso). Además, se recomienda el regular mantenimiento de las secciones de control, tanto de los muros aforadores como del cauce en las zonas cercanas a las mismas.

## REFERENCIAS

- Agencia Córdoba D.A.C.yT. - Dirección de Ambiente.** (2003). *Regiones naturales de la provincia de Córdoba*. Gobierno de la provincia de Córdoba. 2003. P. 30-33.
- Caamaño Nelli, G.** (1986). “Geometría Hidrológica: La Relación genérica entre Altura y Caudal en Secciones Naturales”. *CIHRSA, Villa Carlos Paz*.
- Caamaño Nelli, G.** (1999). *Hidrología Avanzada*. Maestría en Ciencias de la Ingeniería, F.C.E.F. y N., U.N.C. Córdoba, Argentina.
- Clarke, R.; Brusa, L.** (2001). “The precision of low flows estimated from rating curves: a case study from Brazi”. *IAHS Publication 272, Wallingford, Inglaterra, p. 1-7, 2001. pp. 269-275*.

**Doyle, M.; Stanley, E.; Strayer, D.; Jacobson, R.; Schmidt, J.** (2005). “Effective discharge analysis of ecological processes in streams.” *Water Resources Research*, Vol. 41, w11411. 2005.

**Fleig, A.** (2004). *Hydrological Drought –A comparative study using daily discharge series from around the World*. Diplomarbeit Institut für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br. 170 págs.

**I.N.A.-C.I.R.S.A.** (2003-2004): *Boletines mensuales de datos hidrológicos. Cuenca del Río San Antonio Sistema telemétrico CIRSA*. Villa Carlos Paz. Argentina.

**Leopold, L. B.; Wolman M.G. y Miller J.P.** (1964). “Fluvial processes in geomorphology”. *W. H. Freeman and Company. San Francisco*.

**Mendiondo, E.; Clarke, R.; Tönsmann, F.** (2000). “River restoration, discharge uncertainties and floods”. *F. Tönsmann & M. Koch “River Flood Defence”, Herkules Vg, Kassel, Germany, v.2, p.141-152*.

**Moffat, R.J.** (1988). “Describing the Uncertainties in Experimental Results”. *Experimental Thermal and Fluid Science* 1988; 1:3-17.

**Rodríguez, J. F.; García, M. H.; López, F. M.; y García C.M.** (2004) “Three dimensional hydrodynamics of pool-riffle sequences for urban stream restoration.” *River Flow 2004, Second International Conference on Fluvial Hydraulics, IAHR, Naples, Italy*.

**Schmidt, A.** (2002). *Analysis of stage-discharge relations for open-channel flows and their associated uncertainty*. PhD thesis. University of Illinois at Urbana-Champaign. Urbana, Illinois.

**Taravella, R.A.** (2002). *Identificación y cuantificación de los componentes del Balance Hídrico en el Embalse San Roque*. Tesis de Grado. F.C.E.F.y N. Universidad Nacional de Córdoba. 274 p.