

ANÁLISIS DEL CONCEPTO DE CAUDAL DOMINANTE EN RÍOS ALUVIALES Y EVALUACIÓN DE METODOLOGÍAS DE CÁLCULO

Hector Daniel Farias

Instituto de Recursos Hídricos (IRHi-FCEyT-UNSE)
Av. Belgrano (S) 1912, (G4200ABT) Santiago del Estero, Argentina.
E-mail: hfarias@bigfoot.com - Web: <http://irh-fce.unse.edu.ar/>

RESUMEN

Se presenta una revisión del concepto de caudal dominante para el análisis de procesos morfológicos en ríos aluviales y se analizan las metodologías existentes para su estimación. Los procedimientos se clasifican en tres grupos: geométricos, estadísticos y morfológicos, estableciéndose las relaciones generales en las que se sustentan cada uno de ellos. Teniendo en cuenta las bases conceptuales de cada método, se recomienda la aplicación de los denominados métodos morfológicos cada vez que se disponga de la información necesaria para ello. Dentro de estos últimos, se encontró que el método de Schaffernak presenta ciertas dificultades de aplicación por su alta sensibilidad a la cantidad de intervalos en que se segmenta la serie de caudales, mientras que el método de Komura (una vez obtenido un buen ajuste de la función potencial que expresa el caudal sólido en función del caudal líquido, $Q_s = a \cdot Q^b$) es más sencillo de implementar y se puede aplicar de manera objetiva.

ABSTRACT

A review of the dominant discharge concept as applied to the study of morphological processes in alluvial rivers is presented in this paper. The available methodologies for the estimation of the dominant discharge are analyzed. The procedures are classified in three groups, viz.: geometrical, statistical and morphological. The general relationships in which they are sustained are established. Taking into account the conceptual basis of each method, the application of morphological ones is recommended for practical situations in which the necessary data are available. By means of a practical application, it was found that Schaffernak method shows certain problems because its high sensitivity to the number of intervals in which is segmented the water discharge series. The Komura method is more simple and objective, provided a good fit of the power function between sediment load and water discharge is obtained.

INTRODUCCIÓN

El concepto de caudal dominante resulta de fundamental importancia en estudios fluvio-morfológicos y de ingeniería fluvial, tales como el diseño de cauces en régimen y proyectos de restauración fluvial. En esencia, este valor del flujo hidrológico establece un patrón morfológico de referencia que ayuda a inferir las condiciones bajo las cuales el río bajo análisis exhibe una condición de equilibrio y de esa manera estimar los posibles cambios morfológicos que podría desarrollar para acercarse a esa situación de estabilidad.

En las últimas décadas se ha desarrollado una tendencia mundial hacia el entendimiento de los procesos naturales que gobiernan las condiciones morfológicas y de hábitat en ríos, de modo tal de procurar restaurar las mismas en ambientes naturales antrópicamente perturbados. Para ello, es necesario estimar tanto las secciones naturales como las configuraciones planimétricas asociadas a esas condiciones naturales y en ese sentido cobra relevancia el concepto de caudal dominante, o también denominado gasto generativo o formativo del cauce.

El objetivo de este trabajo es el de revisar el concepto de caudal dominante y evaluar

críticamente las metodologías disponibles para su estimación, a la vez de proponer recomendaciones que ayuden a estimar razonablemente este parámetro de importancia en hidráulica de ríos.

CONCEPTO DE CAUDAL DOMINANTE

Se considera que el concepto de caudal dominante fue inicialmente introducido en el campo de la Hidráulica Fluvial con la finalidad de extender al caso de ríos naturales algunos aspectos desarrollados inicialmente para canales artificiales en el contexto de la "Teoría del Régimen". Se atribuye su introducción inicial en el campo de la ingeniería de ríos moderna a Inglis en 1950 (Marlette y Walker, 1968; Komura, 1969), aunque en forma casi simultánea Schaffernak (1950, citado Garde y Ranga Raju, 1985) había incorporado el término "descarga generativa del cauce".

Existen varias definiciones de caudal dominante, algunas de las cuales han sido analizadas por Knighton (1998) y recientemente por Goodwin (2004). La mayoría de las definiciones asocian el caudal a rasgos morfológicos característicos del cauce. Por ejemplo, Ackers y Charlton (Knighton 1998) definieron la descarga dominante como el flujo permanente que produciría la misma longitud de onda de meandros que la secuencia hidrológica natural de caudales. Wolman y Miller (Knighton 1998) asocian el caudal dominante a aquella descarga líquida que desarrolla el mayor trabajo mecánico, entendiéndose como tal al asociado al transporte de sedimentos. Esta definición da lugar a la siguiente: el caudal dominante es el que transportará la mayor cantidad de sedimentos más gruesos que 63 micrones con respecto al tiempo (USBR 1958, citado por Garde y Ranga Raju, 1985).

En el análisis de este concepto, Yalin y Da Silva (2001) sostienen que como $Q=f_Q(t)$ (serie cronológicas de caudales líquidos) emerge como un resultado de los registros de mediciones llevadas a cabo a lo largo de un período de tiempo dado (o período de observación T_o), la serie puede interpretarse como una muestra de una función aleatoria cuasi-periódica que se extiende en el intervalo $0 < t < T_o$.

Algunos autores (e.g., Nixon (1959), Wolman & Leopold (1957), ambos citados por Yalin y Da Silva 2001) sostienen que el caudal asociado al umbral de desborde (bankfull) Q_b corresponde a la ordenada de la función $f_Q(t)$ que produce $Q > Q_b$ para la duración $\Delta t = 0.006T_o$. Sin embargo, este método no resulta preciso para estimar Q_D .

Yalin y Da Silva sostienen los siguientes puntos en relación al concepto de caudal dominante:

- No existe evidencia de que un caudal (que en la práctica sería casi instantáneo) sea capaz de generar el mismo cauce si el mismo fluyera a una tasa constante (sobre un cauce de geometría inicial dada) a lo largo de T_o .
- Desde un punto de vista matemático, la relación $\Delta t/T_o$ debería ser variable y dependiente de la naturaleza estocástica de la función aleatoria $Q=f_Q(t)$, lo cual explicaría parcialmente la fuerte dispersión alrededor de $\Delta t/T_o=0.006$ observada en los gráficos de Nixon y Wolman & Leopold.

- Desde el punto de vista de la Hidráulica Fluvial, debería esperarse que Q_D dependa de la naturaleza del sedimento que conforma los contornos del cauce en el tramo fluvial de interés. Es decir, la velocidad de deformación del contorno que conduce a la formación de un cauce dinámicamente estable o en régimen está determinada por la tasa de transporte de sedimentos q_s , y no por el caudal líquido unitario $q \approx Q/B$ (donde B es el ancho del cauce a nivel de desborde). Por lo tanto, la determinación de Q_D a partir únicamente de datos de caudales líquidos [función $Q=f_Q(t)$ o serie cronológica de caudales] no sería aplicable o al menos no se puede justificar desde el punto de vista físico.

A partir de estas definiciones, en el contexto del presente trabajo, se considerará al caudal dominante (Q_D) como aquel caudal teórico que fluyendo en régimen permanente y uniforme, es capaz de producir el mismo efecto morfológico sobre el cauce (en términos del modelado de la sección transversal y patrón de alineamiento en planta) que la secuencia natural de flujos hidrológicamente variables a lo largo de la historia geomorfológica del río. Expresando matemáticamente este concepto, se obtiene:

$$Q_D = \frac{\int_{t_1}^{t_2} Q(t) \cdot Q_s(t) \cdot dt}{\int_{t_1}^{t_2} Q(t) \cdot dt} \quad (1)$$

donde Q indica el caudal líquido, Q_s caudal sólido (carga total de material del lecho) y el lapso de tiempo ($t_2 - t_1$) debe ser lo suficientemente largo como para garantizar que durante el mismo hayan acontecido una cantidad de eventos (en términos de transporte sólido) suficientemente representativos de la hidrología de la cuenca.

La ecuación anterior puede obtenerse a partir de la integración de la ecuación de continuidad sedimentológica sobre el intervalo (t_2-t_1), tal como ha sido presentado por Jansen et al. (1979), aunque con modificaciones respecto al caso anterior, ya que esos autores consideran en definitiva el nivel del flujo asociado al caudal dominante.

METODOLOGÍAS DE CÁLCULO

Ante la diversidad de definiciones de Q_D , también existen diversas metodologías de cálculo, que en el marco de la presente investigación han sido tipificadas en tres grandes grupos:

Métodos Geométricos

Son aquellos que únicamente consideran la geometría del cauce y sobre las cuales subyace la hipótesis:

$$Q_D = Q_B \quad (2)$$

Es decir, los mismos asumen que el caudal dominante iguala al caudal de desborde Q_B , y por lo tanto están asociados a la definición de "bankfull", nivel de inundación o umbral de desborde (Figs. 1 y 2).

En ellos, se identifica ese nivel o cota (por algún procedimiento más o menos objetivo, e.g., Radecki-Pawlik, 1999) y a través de una relación 'altura-caudal' [h-Q] se estima $Q=Q_D$.

En términos matemáticos, un criterio objetivo se basa en analizar la función de la razón de aspecto $B/H=\Phi_\Gamma(H_{max})$, donde B es el ancho superficial y H_{max} es la profundidad máxima del cauce correspondiente a cada nivel H (Fig. 3), de modo que si la función altura caudal es $Q=f_h(h)$, entonces el nivel de desborde se corresponde con un mínimo de esa función, es decir:

$$Q_D \approx (Q=f_h(h))_{|B/H=\Phi_\Gamma(H_{max}) \rightarrow \text{mínimo}} \quad (3)$$

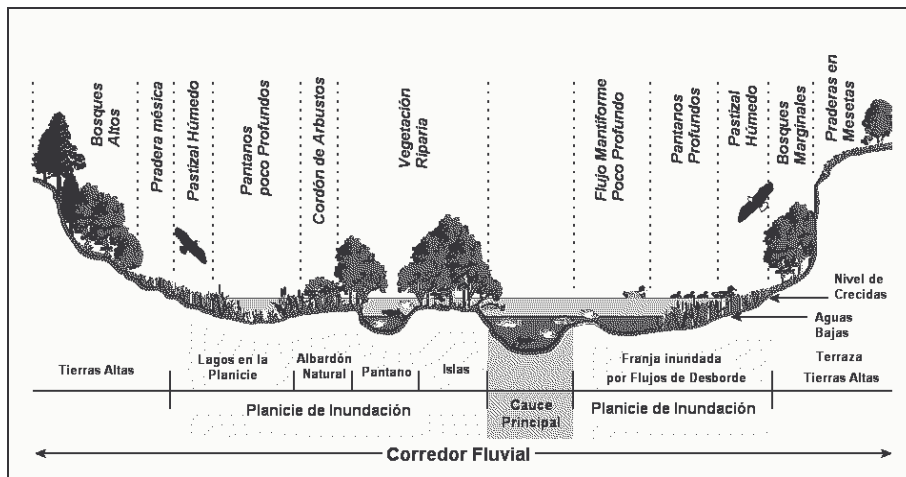


Fig.1.- Esquema genérico de la sección transversal de un corredor fluvial y sus componentes ambientales

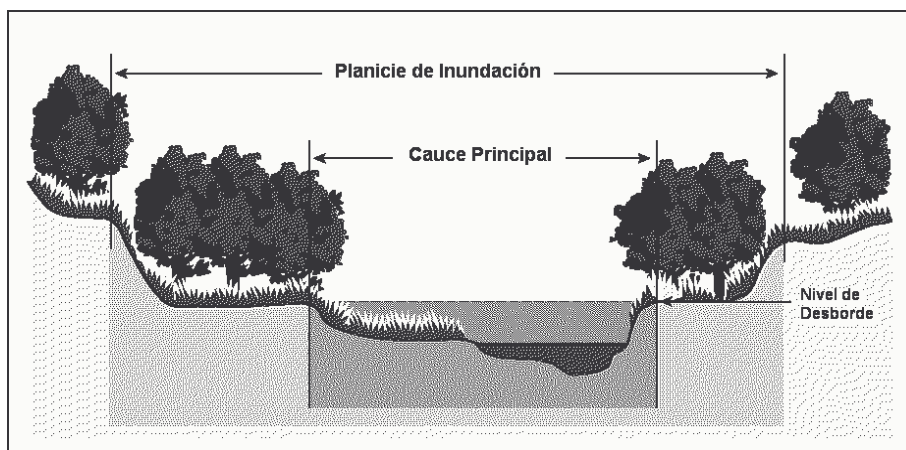


Fig.2.- Esquema de la sección transversal de un río aluvial en el que se indica el nivel de desborde o "bankfull".

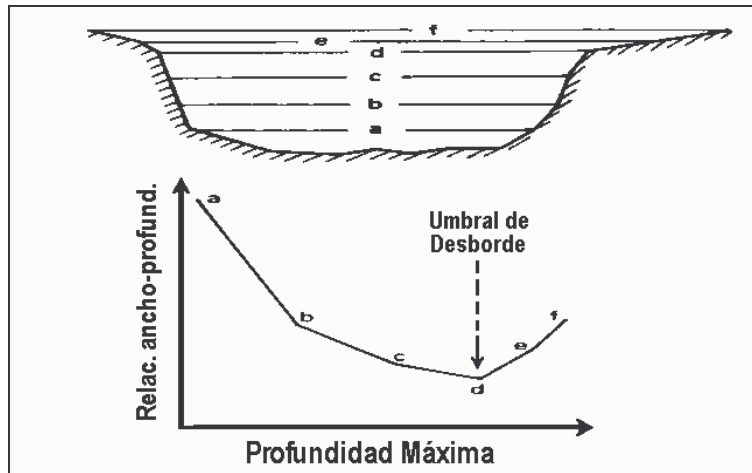


Fig. 3.- Criterio geométrico para estimar el nivel de desborde o "bankfull" (Knighton 1984).

Métodos Estadísticos

Son aquellos basados en la definición de la frecuencia asociada al gasto dominante, es decir: $Q_D = Q(T_R = T_{R0})$, donde a T_{R0} generalmente se le asigna una recurrencia empírica estimada a partir de observaciones de campo (habitualmente variable entre 1.5 y 2.4 años) (Knighton 1988; Richards 1982).

Métodos Morfológicos

Son los que consideran fundamental el aspecto referido al transporte sólido y en este caso se iguala el caudal dominante al caudal efectivo (Fig. 4), es decir, aquella descarga capaz de transportar el máximo gasto sólido. En este grupo se incluyen los métodos de Schaffernak y Komura. Estas son las metodologías más racionales para estimar el caudal dominante, aunque poseen una componente empírica asociada por un lado a la función de transporte sólido usada y por otro a la ley de frecuencias que ajusta los valores de caudales líquidos. En virtud de ello, los valores estimados de Q_D son sensibles a la función de transporte y las singularidades de la ley de frecuencia (incluyendo la cantidad de intervalos de clase en que se segmenta la serie cronológica de caudales líquidos para su análisis).

Recientemente, Goodwin (2004) ha presentado un procedimiento analítico para la implementación de estas metodologías basada en funciones típicas de transporte y en leyes teóricas de probabilidades, encontrándose que en forma genérica puede expresarse a Q_D como una función:

$$Q_D = f_{QD}(b, \eta_i, \lambda_j) \quad (4)$$

donde:

b : es el exponente de la función empírica $Q_S = a \cdot Q^b$,

η_i : son los descriptores estadísticos característicos -posición, dispersión, asimetría- de la distribución de probabilidades (por ejemplo, la media μ_Q o la desviación estándar σ_Q)

λ_j : son parámetros típicos de la distribución empleada (e.g., Gamma, log-Pearson, etc.).

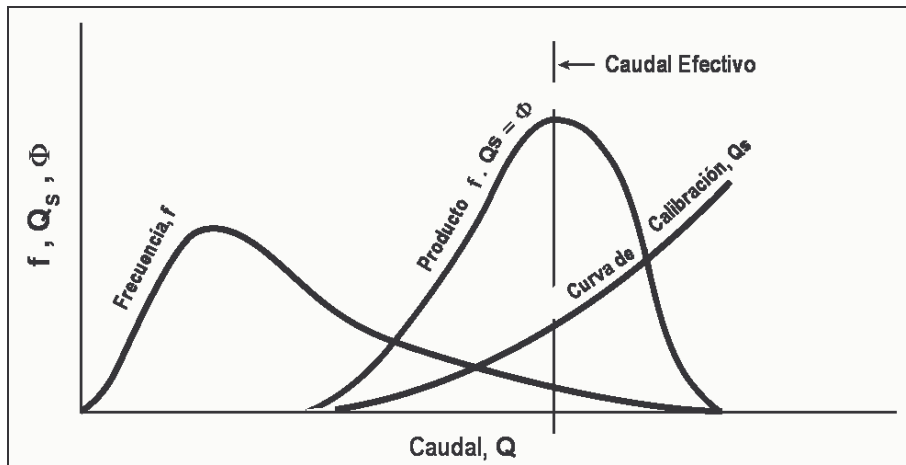


Fig. 4.- Concepto de caudal efectivo.

APLICACIÓN

La evaluación de los diferentes procedimientos se llevó a cabo mediante la aplicación de los mismos a un tramo de un río aluvial en el que se dispone de datos hidrométricos históricos y sobre el que se están llevando estudios morfológicos para definir el grado de estabilidad del cauce y su posible respuesta dinámica ante acciones antrópicas. Se trata del Río Dulce en Santiago del Estero, y el tramo de estudio se presenta en la Figura 5.



Figura 5.- Planimetría del tramo del Río Dulce entre el Dique Los Quiroga y la Ciudad de Santiago del Estero

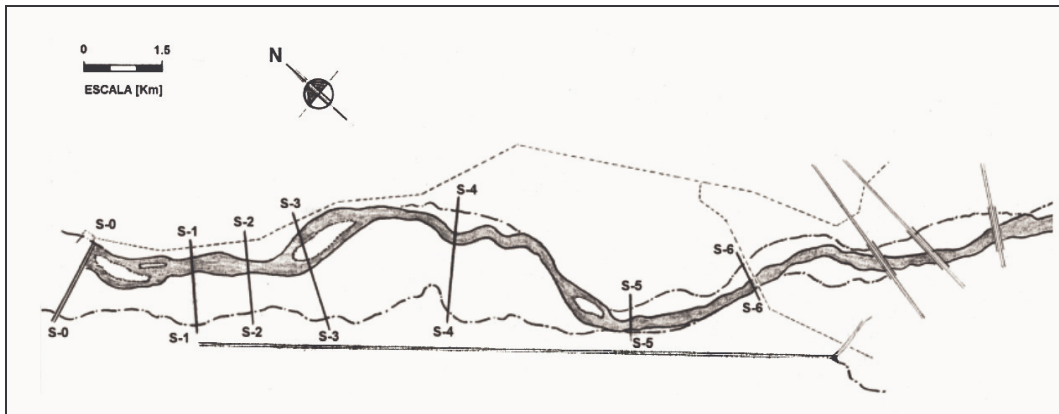


Figura 6.- Morfología planimétrica del Río Dulce entre Los Quiroga y Santiago del Estero. Se indican las localizaciones de las secciones transversales relevadas en un estudio hidrodinámico anterior (Farias, 1987).

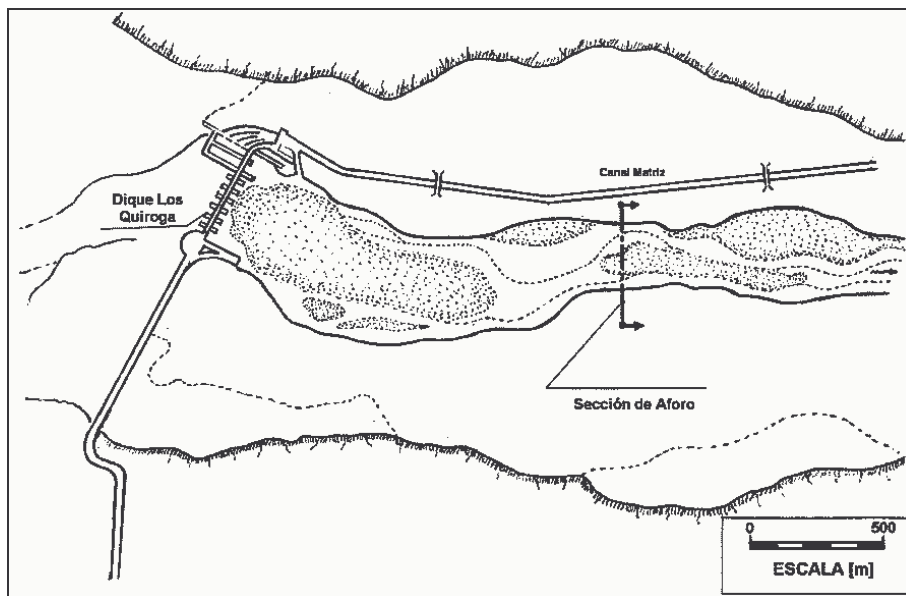


Figura 7.- Detalle planimétrico de la zona relevada aguas abajo del Dique Los Quiroga.

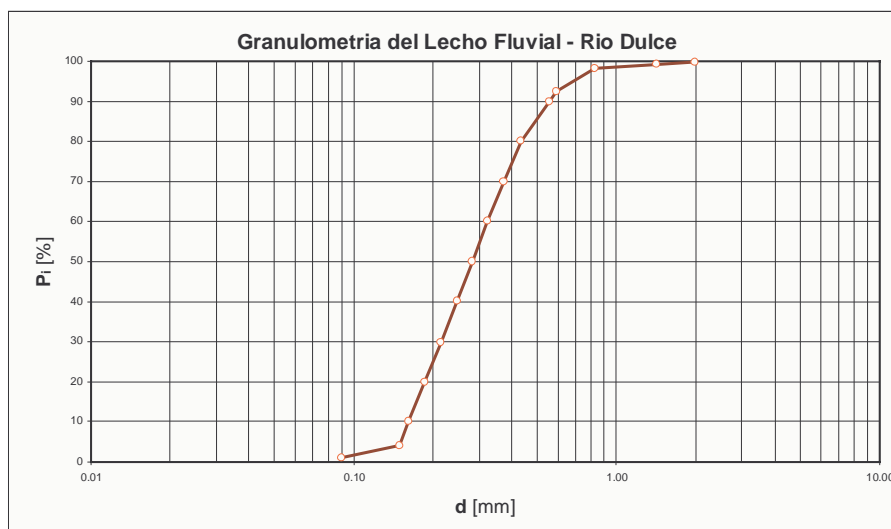


Fig. 8.- Granulometría del sedimento fluvial del Río Dulce entre el Dique Los Quiroga y la ciudad de Santiago del Estero. En la Figura 6 se presenta un detalle planimétrico del tramo estudiado, que comprende desde el

Dique Nivelador de Los Quiroga hasta la localidad de Los Flores, en la zona sur de la ciudad Capital de Santiago del Estero, totalizando unos 25 Km aproximadamente. En la misma se indican las secciones transversales relevadas en ocasión de un estudio anterior, y que fueron empleadas para llevar a cabo una modelación hidrodinámica del tramo usando HEC-RAS, lo que permitió obtener información accesoria para el presente estudio.

La Figura 7 indica un detalle del segmento ubicado inmediatamente aguas abajo del Dique Nivelador de Los Quiroga. En la misma se señala la ubicación de la sección en la que se realizaron aforos líquidos y la que marca las condiciones de borde de aguas arriba para la modelación. Los caudales usados en las series son los erogados por la presa de Río Hondo, a los que se les ha descontado el correspondiente a las derivaciones hacia el Canal Matriz del Proyecto de Riego Río Dulce (Fig. 7).

En la Figura 8 se presenta la curva granulométrica del sedimento fluvial del río Dulce, que fue utilizada en las estimaciones de transporte sólido realizadas con el modelo HEC-RAS v. 3.1.

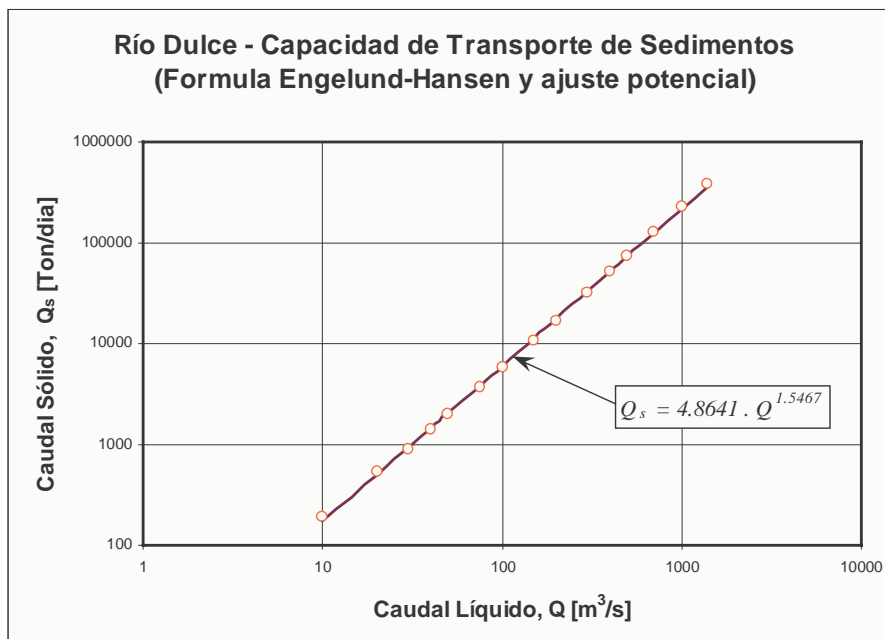


Fig. 9.- Curva de descarga sólida del tramo del Río Dulce (modelo HEC-RAS y ec. de Engelund y Hansen).

Uno de los resultados obtenidos a partir de la aplicación de HEC-RAS para estimar la capacidad de transporte total de sedimentos del tramo se presenta en la Fig. 9, en la cual se muestra la función de caudal sólido versus caudal líquido resultante de la aplicación de la fórmula de Engelund y Hansen, y ajustada a una función potencial.

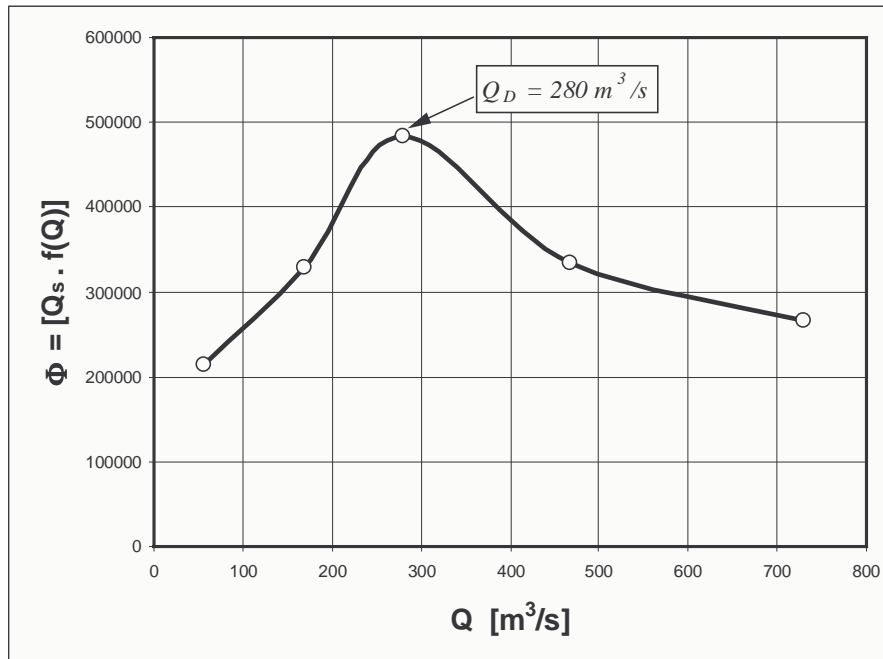


Fig. 10.- Caudal dominante calculado por el método de Schaffernack para el Río Dulce

En una primera instancia, y con la única finalidad de disponer de valores aproximados de referencia, se aplicaron los métodos geométrico y estadístico. Para el primero se consideró una sección transversal media representativa del tramo mientras que para el procedimiento estadístico se obtuvo una curva empírica de frecuencias a partir de los datos de caudales.

Los métodos morfológicos analizados fueron los de Schaffernak y Komura. Para ambos se trabajó con una serie de caudales líquidos diarios de 60 años de longitud y la función $Q_s=f_{Q_s}(Q)$ se ajustó con las ecuaciones de transporte disponibles en el programa HEC-RAS, ya que de esta manera se facilitan los cálculos usando directamente las secciones naturales del tramo y las granulometrías del material de lecho. Para el caso del método de Schaffernak se realizó un análisis de sensibilidad en función de la cantidad de intervalos de clase, encontrándose que $N=20$ producía valores razonables, y de esta manera se estimó $Q_D=280 m^3/s$ (Fig. 10). Este valor está asociado a una recurrencia menor de un año. Por su parte, se implementó una variante del método de Komura, trabajando con un hidrograma anual promedio y se realizó un análisis de sensibilidad en función del exponente b de la función de transporte $Q_s=a \cdot Q^b$.

Para el caso analizado (Río Dulce en Santiago del Estero) se encontró que para una variación de b entre 1.2 y 2.0 (valores típicos para el conjunto de funciones de transporte habitualmente usadas en ríos aluviales) el valor de caudal dominante calculado experimentó una variación del orden del 30% encontrándose que $Q_D \sim b^{0.6}$ aproximadamente.

En estas condiciones, los valores encontrados se sitúan aproximadamente en forma coincidente con los indicados por Goodwin en sus funciones analíticas para estimar el caudal dominante. En efecto, Goodwin (2004) encontró que para el caso en que la serie cronológica de caudales observados se ajuste a una distribución normal, resulta $Q_D \sim b^{0.5}$, mientras que para el caso de una distribución log-normal de dos parámetros $Q_D \sim e^b$. Para otras distribuciones de probabilidad las funciones son más complicadas, pero dependen esencialmente de b y de los

estadísticos de la serie (en rigor, de los momentos de orden 1, 2 y 3, es decir, media, varianza y asimetría ya sea de los valores de Q o de $\log(Q)$).

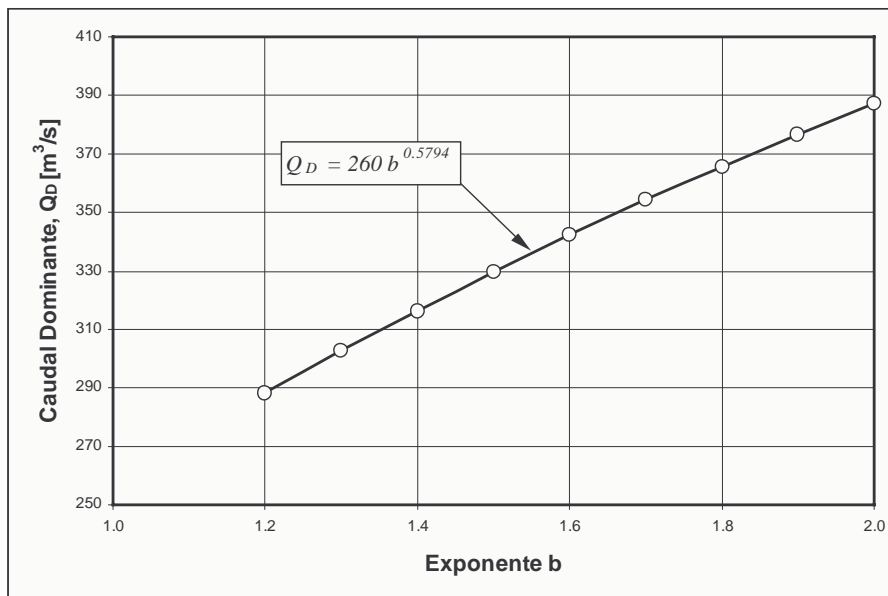


Fig. 11.- Variación del caudal dominante calculado por el método de Komura con el exponente b de la función: $Q_D = a \cdot Q^b$.

CONCLUSIONES

Se ha revisado el concepto de caudal dominante en ríos aluviales y se han clasificado las metodologías existentes en geométricas, estadísticas y morfológicas, siendo estas últimas las recomendadas para su aplicación a casos prácticos.

Se aplicaron las metodologías para estimar el caudal dominante en un tramo de un río aluvial (Río Dulce en Santiago del Estero) en el que se disponía de información hidrométrica histórica, datos sedimentológicos y un relevamiento topográfico del tramo que posibilitó su modelación hidráulica con el paquete HEC-RAS. Una de las ventajas del modelo reside en la posibilidad de seleccionar un conjunto de ecuaciones de transporte que permite reunir elementos para poder ajustar una función sintética caudal líquido-gasto sólido, y de esta manera facilitar la aplicación de los métodos morfológicos para estimar el caudal efectivo.

En ese sentido, se encontró que el método de Schaffernak presenta ciertas dificultades de aplicación por su alta sensibilidad a la cantidad de intervalos en que se segmenta la serie de caudales, mientras que el método de Komura (una vez obtenido un buen ajuste de la función $Q_S = a \cdot Q^b$) es más sencillo de implementar y produce resultados objetivos una vez que se acepta una función de calibración para el gasto sólido.

Agradecimiento. Las investigaciones presentadas en el presente trabajo fueron financiadas por el Consejo de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad nacional de Santiago del Estero (CICYT-UNSE) [Proyecto 23-C042], la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) [Proyecto

FONCYT PICTR2002-00175] y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

LISTA DE SÍMBOLOS

A :	Área de la sección transversal del flujo
a_i :	Constantes ($i = 1, 2, 3, \dots$)
B :	Ancho del cauce (a nivel del lecho)
b :	Exponente de la función empírica $Q_s = a \cdot Q^b$
c_j :	Constantes ($j = 1, 2, 3, \dots$)
C_s :	Concentración total de sedimentos
d :	Tamaño mediano de las partículas de sedimento ($d = d_{50}$)
d_* :	Parámetro adimensional de partícula ($= [(g \cdot \Delta / v^2)^{1/3} \cdot d]$)
f :	Frecuencia
g :	Aceleración de la gravedad
H :	Profundidad media del flujo en una sección estable
h :	Profundidad local del flujo
k_i :	Constantes ($i = 1, 2, 3, \dots$)
P :	Perímetro mojado
q :	Caudal líquido unitario
Q :	Caudal líquido
Q_D :	Caudal dominante
Q_B :	Caudal líquido a nivel del umbral de desborde (bankfull)
Q_s :	Caudal sólido
R :	Radio hidráulico
S :	Pendiente del lecho
t :	Tiempo
T_o :	Tiempo de referencia
U_* :	Velocidad de cizallamiento
V :	Velocidad media del flujo
V_c :	Velocidad media del flujo crítica para el inicio de arrastre de sedimentos
Δ :	Densidad relativa del sedimento sumergido [$= (\rho_s - \rho) / \rho$]
Φ :	Factor de frecuencia de gastos sólidos
v :	Viscosidad cinemática
λ_j :	Parámetros típicos de la distribución de frecuencias (e.g., Gamma, log-Pearson, etc.).
μ :	Viscosidad dinámica
ρ :	Densidad del fluido
ρ_s :	Densidad del sedimento
η_i :	Descriptores estadísticos característicos -posición, dispersión, asimetría-

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Biedenharn, D.S. and R. R. Copeland** (2000). "Effective Discharge Calculation". *Hydraulic Engineering Technical Note ERDC/CHL HETN-II-4*, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS, USA.
- Copeland, R.R., D. S. Biedenharn, and J. C. Fischenich** (2000). "Channel-Forming Discharge". *Hydraulic Engineering Technical Note ERDC/CHL HETN-II-5*, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS, USA.
- Farias, H. D.** (1987). "Evaluación de Procesos Morfológicos Inducidos por Obras en Ríos Aluviales". *Primeras Jornadas Nacionales de Zonas Áridas y Semi-áridas*, 20-24 oct. 1987, Santiago del Estero, Argentina.
- Garde, R.J. & Ranga-Raju, K.G.R.** (1985). *Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems*. (2nd edition) Wiley Eastern Ltd., 618 pages [ISBN 0-85226-306-6].
- Goodwin, P.** (2004). "Analytical Solutions for Estimating Effective Discharge". *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 130, No. 8, August 2004, pp. 729–738.
- Jansen, P.P., van Bendegom, L., van den Verg, J., de Vries, M. & Zanen, F.** (1979). *Principles of River Engineering: The Non-Tidal Alluvial River*. Pitman Publishing Ltd., London, U.K.
- Knighton, D.** (1998). *Fluvial Forms and Processes: A new perspective*. Oxford University Press, New York, 400 p.
- Komura, S.** (1969). "Computation of Dominant Discharge". Proceedings of IAHR Congress, Kyoto, Japan, pp. 265-268.
- Marlette, R.R. & Walker, R.H.** (1968). "Dominant Discharges at Platte-Missouri Confluence". *Journal of Waterways and Harbors Division*, ASCE, Vol. 94, No. WW1, pp. 23-32.
- Michaud, C.** (1942). *Regadíos en Santiago del Estero*. Publicación Oficial, Gobierno de la Provincia de Santiago del Estero, Argentina.
- Radecki-Pawlik, A.** (1999). "Bench Index Method as a way of Bankfull Discharge Determination in the Polish Carpathian". *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, Environmental Development*, Volume 2, Issue 2.
- Richards, K.S.** (1982). *Rivers: Form and Processes in Alluvial Channels*. Ed. Methuen, London, U.K., 358 p.
- Soldano, F. A.** (1947). *Régimen y Aprovechamiento de la Red Fluvial Argentina*. Ed. Címera, Buenos Aires, Argentina.
- Yalin, M.S., Ferreira da Silva, A.M.** (2001). *Fluvial Processes*. IAHR Monograph, IAHR, Delft, The Netherlands, 197 p. [ISBN 90-805649-2-3].