

## EROSIÓN GENERAL EN RÍOS CON LECHOS ARENOSOS

Hector Daniel Farias, María T. Pilán, Francisco J. Pece, Luis A. Olmos

Instituto de Recursos Hídricos (IRHi-FCEyT-UNSE), Av. Belgrano (S) 1912, Santiago del Estero, Argentina

E-mail: hfarias@bigfoot.com - Web: <http://irh-fce.unse.edu.ar/>

### Introducción

La estimación de las profundidades de erosión general en cauces naturales es un tema de gran importancia en ingeniería fluvial, especialmente útil para la toma de decisiones en el diseño de obras de cruce a través del cauce, tales como puentes, tuberías, túneles subfluviales, etc.. Los procedimientos clásicos se basan en variadas hipótesis, entre las cuales la más importante es la que sostiene la igualdad entre la velocidad media del flujo en la sección transversal de cauce considerada y la hipotética velocidad límite o de equilibrio para el movimiento de las partículas que forman parte del lecho fluvial. En este estudio se realizó una revisión de algunos métodos usados en diversos países y se delinearon las bases teóricas para la formulación de un enfoque generalizado para el cálculo de las profundidades de erosión general en cauces arenosos. Por su parte, se presenta una discusión del concepto de velocidad de equilibrio, teniendo en cuenta los criterios modernos basados en aspectos relativos al transporte de sedimentos, resistencia al flujo y comportamiento de las propiedades energéticas del flujo en el cauce cuando este alcanza una condición de estabilidad dinámica o régimen (transporte generalizado de sedimentos). A partir de la formulación generalizada, se presenta una metodología para estimar la socavación general en cauces arenosos, la cual se aplica a una serie de ejemplos prácticos.

### Aspectos Teóricos

Se denomina erosión general al descenso que experimenta el lecho de un río cuando se produce un aumento en el caudal líquido que escurre por el mismo. La causa de su ocurrencia se explica por la mayor capacidad de transporte de material sólido que adquiere la corriente al incrementarse el caudal y por consiguiente la "intensidad del flujo" expresada a través de la tensión de corte sobre el lecho (que es capaz de poner a las partículas en movimiento) y la velocidad media del agua (que mantiene a las mismas en transporte). Este proceso se desarrolla en una escala de tiempo de corto plazo (asociada a una creciente) y su magnitud depende de las características hidrológicas de la cuenca (tamaño y función de respuesta). Si el descenso del lecho fluvial se produce en una escala temporal de largo plazo (años o décadas) el proceso morfológico se denomina "degradación" y como ejemplo puede mencionarse al que ocurre aguas abajo de una presa de embalse, como consecuencia de la retención de sedimentos en el vaso.

Los métodos para la estimación de la erosión general pueden aplicarse tanto a nivel de la sección transversal global, o bien segmentando la misma en una serie de franjas verticales aplicar el procedimiento de cálculo en forma desagregada.

Desde el punto de vista conceptual, una de las hipótesis fundamentales en que se basan varios métodos reside en la igualdad entre la velocidad media del flujo en una franja vertical ( $V_f$ ) y la velocidad de equilibrio  $U_e$  para mantener un transporte sólido generalizado en el lecho, es decir, con un aporte de material desde aguas arriba que compense el volumen removido por la corriente. Por lo tanto, para aplicar la identidad  $V_f=U_e$ , es necesario

encontrar expresiones generales tanto para  $V_f$  como para  $U_e$ . La literatura presenta dos trabajos recientes en los que se revisan las ventajas y limitaciones de las metodologías de uso más extendido (Bettes, 2002; Lauchlan y May, 2002). Las conclusiones de estos estudios indican que la generalidad de los métodos tradicionales resultan deficitarios, ya que incorporan muchos parámetros de estimación subjetiva y además no tienen en cuenta muchos aspectos de la dinámica fluvial, de modo tal que cuando se aplican a situaciones reales producen resultados muy disímiles entre ellos y además sus predicciones no son confiables.

### Análisis de Relaciones Existentes

Existen muchas relaciones para estimar la erosión general en un río aluvial ante un aumento del caudal, que se pueden aplicar tanto a la sección global como a la sección segmentada. Considerando los rangos típicos de algunas variables en el caso de cauces fluviales con lechos arenosos, se pueden simplificar varias de las formulaciones existentes a una relación funcional genérica de la forma (Farias y Pilán, 2002):

$h_s = c_0 q^{c_1} / d^{c_2}$ , donde  $h_s$  es la profundidad luego de producida la erosión,  $q$  es el caudal unitario y  $d$  es el tamaño del sedimento, siendo  $c_1$ ,  $c_2$  y  $c_3$  constantes numéricas. En la Tabla 1 se presentan los valores de esas constantes para varias ecuaciones de uso extendido.

Tabla 1.- Parámetros de la ecuación de erosión general

Formula	$c_0$	$c_1$	$c_2$
Lischvan-Lebediev	0.333	0.710	0.199
Laursen	0.205	0.860	0.284
Blench	0.380	0.667	0.167
Maza A. - García F.	0.209	0.870	0.305
Maza A. - Echavarría A.	0.365	0.784	0.157
Kellerhals	0.470	0.800	0.120

Aunque aparentemente no se observan variaciones significativas en estos parámetros, apreciablemente en el exponente de  $q$  (que varía entre 0.67 y 0.87) la aplicación de estas fórmulas a un río dado (es decir, con un sedimento establecido) producen resultados muy diferentes unas con respecto a otras, aspecto que ha sido también demostrado por Lauchlan y May (2002) en la aplicación a varios ríos naturales en el Reino Unido.

En general, para ríos arenosos las fórmulas de Maza-García y de Laursen sobre-estiman de manera muy apreciable la erosión general, mientras que la de Blench tiende a subestimarla. Los resultados más aceptables se obtienen con las fórmulas de Lischvan-Lebediev, Maza-Echavarría y Kellerhals, aunque esta última fue inicialmente calibrada con datos de ríos con lechos de grava.

### Velocidades Crítica y de Equilibrio

La velocidad crítica ( $V_c$ ) puede definirse como la velocidad media del flujo necesaria para poner en movimiento las partículas de sedimentos en la sección de interés (caso en que no existe aporte de material sólido desde el segmento de aguas arriba del cauce). La

velocidad de equilibrio ( $U_e$ ) se refiere al caso de transporte generalizado, siendo la velocidad necesaria para mantener un equilibrio entre la masa de sedimento erodada de la sección y el suministro de sólidos desde aguas arriba. Desde el punto de vista práctico, la aplicación de uno u otro caso está asociada al tipo de curso fluvial de que se trate. En el contexto del presente análisis, se sostiene que la consideración de  $V_c$  tiene un sentido físico en el caso de ríos cuyos lechos están compuestos por material granular grueso (gravas y tamaños mayores), mientras que en el caso de ríos arenosos sería necesario definir adecuadamente el valor de  $U_e$ . En la Tabla 2 se presentan algunas fórmulas extraídas de la literatura, reducidas al formato general  $V_c = b_0 d^{b_1} h^{b_2}$ .

Tabla 2.- Fórmulas para la velocidad crítica

Formula	$b_0$	$b_1$	$b_2$
Shamov	6.000	0.333	0.167
DoT-FHWA-HEC18	6.190	0.333	0.167
Maza A. - Echavarría A.	3.620	0.200	0.275
Levi (aprox. pot)	8.290	0.357	0.156
van Rijn (aprox. pot.)	0.340	0.004	0.100
Lischtvan-Lebediev	4.700	0.280	0.410
Shields-Manning	6.093	0.283	0.167

**Resistencia al Flujo**

Las relaciones de resistencia de uso más extendido en el caso de cauces arenosos han sido reducidas a un formato genérico:  $V_r = a_0 d^{a_1} h^{a_2} S^{a_3}$ . Los valores de las constantes numéricas para varias fórmulas se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3.- Formulas de resistencia al flujo

Formula	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$
Manning-Strickler	21.100	-0.167	0.667	0.500
Pavlovsky-Lacey	17.810	-0.133	0.736	0.515
Sugio	7.900	0.000	0.540	0.270
Chitale	7.340	0.000	0.646	0.293
Maza-Cruickshank	495.850	0.340	0.637	0.456
Brownlie	13.290	-0.029	0.529	0.389
Peterson-Peterson	7.546	0.017	0.437	0.276
Karim-Kennedy	18.190	-0.103	0.603	0.497
Camacho-Yen	97.930	0.216	0.636	0.401
Farias-Pilan	4.780	0.026	0.499	0.213

**Formulación generalizada**

Las relaciones para  $U_e$  (o  $V_c$ ) y  $V_r$  han sido combinadas para producir un criterio generalizado que permite estimar la erosión general en ríos arenosos escogiendo el par de fórmulas que se considere apropiado. Considerando las relaciones genéricas  $V_r = a_0 d^{a_1} h^{a_2} S^{a_3}$  y  $U_e = b_0 d^{b_1} h^{b_2}$ , y concentrando algunos de los parámetros, se puede escribir:  $\alpha_M = a_0 d^{a_1} S^{a_3}$ , con lo que la velocidad media puede expresarse como:  $V_{r(i)} = \alpha_M h_i^{a_2}$ . Asimismo, por continuidad, se tiene:  $\alpha_M = Q / [T \cdot h_m^{(a_2+1)}]$ . Finalmente:

$$h_{s_i} = \left[ (\alpha_M / b_0) d^{-b_1} h_i^{(a_2+1)} \right]^{1/b_2+1}$$

Esta expresión se aplica a cada franja vertical en que se segmenta el cauce para estimar de esta manera la erosión general. Este método se ha aplicado a grandes ríos de llanura, encontrándose resultados satisfactorios para predecir la erosión general en el rango de profundidades de 2 m a 25 mts.

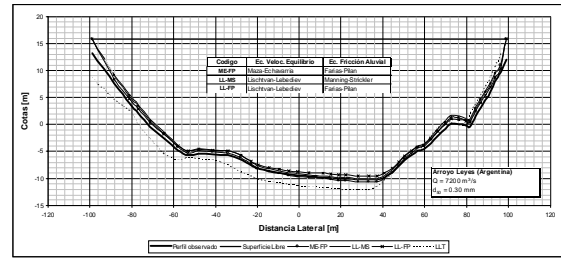


Figura 1.- Aplicación del método generalizado al Arroyo Leyes

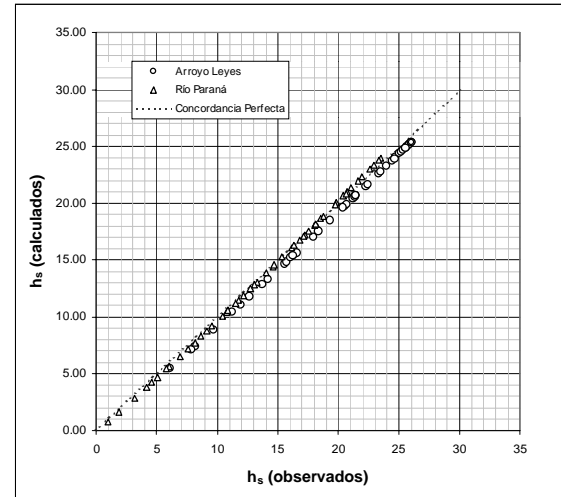


Figura 2.- Comportamiento predictivo del método generalizado en dos grandes ríos de llanura (Leyes y Paraná).

**Conclusiones**

Se ha presentado una revisión del concepto de erosión general en cauces naturales y los métodos para su estimación. Asimismo, luego de analizar los conceptos de velocidad crítica y de equilibrio, se propone una formulación generalizada para calcular la erosión general en ríos con lechos arenosos, que permite seleccionar las ecuaciones de fricción aluvial y velocidad de equilibrio que se consideren adecuadas, en función de los rangos de aplicabilidad de cada una de ellas al caso particular que se esté tratando. Su aplicación a grandes ríos de llanura muestra resultados aceptables.

**Referencias Bibliográficas**

Bettess, R. (2002). "A review of predictive methods for general scour". *First International Conference on Scour of Foundations, ICSF-1*. Texas A&M University, College Station, Texas, USA.

Farias, H.D. & Pilán, M.T. (2002). "Cálculo de las Profundidades de Socavación General en Cauces Aluviales. Aspectos Teóricos y Aplicaciones". *XX Congreso Latinoam. de Hidráulica*, La Habana, Cuba.

Farraday, R.V. & Charlton, F.G. (1983). *Hydraulic Factors in Bridge Design*. Hydraulics Research Stations Ltd., Wallingford, Oxfordshire, U.K.

Lauchlan, C. & May, R. (2002). "Comparison of general scour prediction equations for river crossings". *First International Conference on Scour of Foundations, ICSF-1*. Texas A&M University, College Station, Texas, USA, pp. 184-197.