

EROSIÓN GENERAL EN RÍOS ALUVIALES

H. Daniel Farias, M. Teresita Pilán, Luis A. Olmos y Francisco J. Pece

Instituto de Recursos Hídricos, FCEyT-UNSE
Av. Belgrano (S) 1912, (G4200ABT) Santiago del Estero, Argentina
H.D.Farias@members.asce.org

Resumen: Muchas situaciones en ingeniería fluvial requieren la predicción de la profundidad de erosión general o natural producida por un incremento del caudal líquido, por ejemplo, durante crecidas naturales o controladas. Por ello, y fundamentalmente en el caso de ríos con lechos arenosos este es un tópico de gran importancia en el diseño de cruces fluviales, tales como puentes, conductos, túneles, etc. Para la estimación cuantitativa de la erosión general existen varios métodos empíricos basados en diversas hipótesis, y en los conceptos de velocidad crítica y de equilibrio. En la práctica, los métodos para evaluar la erosión general se aplican a partir de una sección inicial previa a la crecida o considerando la distribución lateral de caudales unitarios y el tamaño característico del sedimento.

En este artículo se presenta un criterio teórico que conduce a la forma genérica de la relación funcional para predecir la erosión natural. El mismo está basado en un principio de optimización de la tasa de disipación de energía del flujo en la instancia de máxima erosión. La hipótesis considerada sostiene que el estado límite se corresponde con un mínimo en la tasa de disipación de energía del flujo, equivalente a la máxima eficiencia en el transporte de sedimentos, y a través de una elaboración teórica se encuentra la relación general entre profundidad de equilibrio, caudal unitario y tamaño del sedimento. Esta situación corresponde al estado en que el cauce alcanza una condición de cuasi-estabilidad dinámica o transporte generalizado de sedimentos en el instante de erosión máxima, que es la condición más importante desde el punto de vista práctico.

A partir de esta formulación generalizada, se presenta una metodología para estimar la erosión general en cauces arenosos, con aplicaciones a una serie de ejemplos prácticos. Los resultados obtenidos muestran indicios de un muy buen comportamiento de la formulación presentada como predictor razonablemente confiable para grandes ríos de llanura, abriéndose una perspectiva interesante para su uso como herramienta práctica en casos de diseño.

INTRODUCCIÓN

La determinación de las profundidades de erosión general (o erosión natural o de crecidas) que sufre un cauce natural ante la ocurrencia de una crecida es un tema de gran importancia en ingeniería de ríos. El cálculo aproximado de la forma y dimensiones que adquiere la sección transversal erosionada resulta de utilidad como elemento de ayuda para la toma de decisiones en lo referente al diseño de obras de cruce a través del cauce, tales como puentes, tuberías, túneles subfluviales, etc.. Existen múltiples y variadas metodologías para calcular la erosión general, aunque la gran mayoría de las mismas resulta de naturaleza puramente empírica, es decir, sin el sustento teórico que permita justificar los planteos fundamentales.

Una de las posibilidades para el cálculo de la erosión general es la aplicación de modelos numéricos para cómputos morfológicos. En general, estos modelos se basan en la solución numérica de las ecuaciones generales del movimiento de agua con transporte de sedimentos

(es decir, las ecuaciones de continuidad líquida, cantidad de movimiento y de continuidad sedimentológica de Exner). Los mismos se aplican a un tramo de cauce que incluya la sección en cuestión y los algoritmos internos resuelven el sistema para el hidrograma de diseño con condiciones iniciales y de contorno dadas. Existen varios modelos matemáticos para cálculos morfológicos, tales como HEC2SR, HEC-6, MOBED y FLUVIAL, entre otros. Los fundamentos teóricos y aspectos computacionales de estos modelos han sido revisados exhaustivamente en varios libros de la especialidad (e.g., Chang, 1988). Sin embargo, para la aplicación, calibración y explotación de estos modelos es necesario disponer de una cantidad de información importante e inversiones significativas en software, hardware, entrenamiento de personal y soporte técnico. Todos estos requerimientos muchas veces son difíciles de satisfacer, y por ello resulta de interés el empleo de los métodos semi-empíricos expeditivos para la estimación de la erosión general.

Los procedimientos clásicos se basan en varias hipótesis, entre las cuales la más importante es la que sustenta 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. Entonces, para establecer las ecuaciones de cálculo es necesario por un lado aplicar una relación de resistencia al flujo para evaluar la velocidad media y por otro una relación para la velocidad límite en el instante de máxima erosión.

Si se acepta la hipótesis fundamental de igualdad entre las velocidades media y límite, se pueden elaborar los cálculos de erosión siguiendo dos vías alternativas (Farias *et al.*, 2003), a saber:

- Por un lado, se puede considerar la geometría de la sección transversal del río para una condición hidráulica previa a la ocurrencia de la crecida, de la cual se determinan las profundidades totales de máxima erosión como funciones potenciales de las iniciales
- Alternativamente, disponiendo de la sección segmentada en franjas verticales y conociendo la distribución transversal de caudales unitarios para un caudal dado (preferiblemente alto), se determinan las profundidades máximas en función de los caudales por unidad de ancho y del tamaño de las partículas de sedimento.

El objetivo fundamental del estudio que aquí se presenta es el de procurar elaborar una demostración de la forma general que adopta la relación funcional para expresar las profundidades de la sección erosionada, a partir de la consideración de principios energéticos aplicables a la situación en la que la corriente fluvial adquiere su estado de equilibrio dinámico. De esta manera resultará factible establecer que las metodologías semi-empíricas de que se dispone actualmente son en realidad casos particulares de una relación funcional generalizada para la erosión general en cauces naturales. Finalmente, se presenta una evaluación de los métodos considerados mediante una contrastación de sus predicciones teóricas con datos reales obtenidos en grandes ríos de llanura.

ASPECTOS TEÓRICOS FUNDAMENTALES

A fin de clarificar algunos conceptos que aparecen en cierto modo confusos en la bibliografía

sobre procesos de erosión y sedimentación, en el marco de la presente investigación se ha convenido en denominar “erosión general al descenso que experimenta en forma natural el lecho de un río cuando se produce un aumento en el caudal líquido que escurre por el mismo. La causa de la ocurrencia de este proceso puede explicarse en virtud de la mayor capacidad de transporte de material sólido que adquiere la corriente al incrementarse el caudal y por consiguiente también se incrementa 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). Como este proceso ocurre independientemente de la presencia de una estructura u obstrucción en el cauce, también se puede denominar “erosión natural”.

Resulta conveniente aclarar que este proceso de erosión 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 procedimientos difundidos (especialmente en Latinoamérica, aunque también citados en libros recientes sobre erosión en puentes, como el de Melville y Coleman, 2000) 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 y 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_r) y la velocidad de equilibrio (U_e) para mantener un transporte sólido generalizado en el lecho. Es decir, se asume que el proceso se desarrolla con un aporte de material desde aguas arriba que compense el volumen removido por la corriente. Por lo tanto, para aplicar la identidad $V_r = U_e$, es necesario encontrar expresiones generales tanto para V_r 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 (Bettess, 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.

Revisión de Metodologías Existentes

Se dispone de un importante número de 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. En un trabajo reciente (Farias *et al.*, 2003) se han analizado muchas de ellas y se han presentado discusiones sobre algunas singularidades de las metodologías actualmente disponibles, además de identificar las situaciones para las cuales fueron deducidas y sus rangos de aplicación en la práctica.

Luego de analizar al menos unas seis metodologías de cálculo y considerando también la compilación presentada por Lauchlan y May (2002), se encontró que gran parte de los métodos disponibles puede reducirse a ecuaciones particulares de la relación genérica siguiente:

$$h_s = c_0 \cdot q^{c_1} / d^{c_2} \quad (1)$$

donde h_s es la profundidad media en una franja vertical del cauce una vez producida la erosión máxima, q es el caudal por unidad de ancho en esa franja y d es el tamaño mediano de las partículas de sedimento del lecho en la sección ($d = d_{50}$). Las constantes c_0 , c_1 y c_2 adquieren diferentes valores según sea el método considerado. Por ejemplo, la ecuación de Lischtván & Lebediev (muy usada en Latinoamérica) para el rango de las arenas (y usando unidades SI) se reduce a:

$$h_s = 0,333 \cdot q^{0,710} \cdot d^{-0,199} \quad (2)$$

En la Tabla 1 se presentan los valores de esas constantes para varias ecuaciones de uso extendido, algunas de las cuales han sido expresamente manipuladas algebraicamente para ser reducidas al formato genérico que facilite la comparación entre ellas.

Las expresiones de la profundidad de la faja erosionada (h_s) en función del caudal unitario, desde el punto de vista práctico resultan útiles cuando se puede conocer de alguna manera la distribución lateral de velocidades en la sección transversal. Este dato puede provenir de mediciones a través de aforos líquidos realizados en la sección de interés (Schneider *et al.*, 2001) o

mediante estimaciones resultantes de la aplicación de modelos numéricos, por ejemplo modelos bidimensionales (2D) integrados en la vertical. Existen algunos modelos que proveen algoritmos para estimar la distribución lateral de velocidades, como por ejemplo HEC-RAS. Sin embargo, resulta necesario conocer en detalle los métodos con los que los modelos realizan esos cálculos internamente para poder decidir adecuadamente su uso. En este sentido, recientemente Weber (2003) ha realizado un análisis exhaustivo de las metodologías disponibles, enfatizando las ventajas y limitaciones de cada una de ellas.

Fórmula	c_0	c_1	c_2
Lischtván-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

Tabla 1. Parámetros de la ecuación de erosión general

Aunque aparentemente no se observan variaciones significativas en estos parámetros, notablemente en el caso del exponente de q (que varía entre 0.67 y 0.87, un rango relativamente estrecho si se tiene en cuenta la variedad de formulaciones) la aplicación de estas fórmulas a un río dado (es decir, con un sedimento establecido) produce resultados muy diferentes unas con respecto a otras. Este aspecto ha sido también demostrado por Lauchlan y May (2002) en la aplicación a varios ríos naturales en el Reino Unido.

Con la finalidad de comparar el comportamiento de las fórmulas, en la Figura 1 se han planteado seis ecuaciones para el rango típico de las arenas medias ($d = 0.3$ mm).

Analizando los gráficos precedentes, puede observarse en la Figura 1 que las formulaciones de Laursen y de Maza-García, producen sobreestimaciones significativas respecto a las otras fórmulas. Este aspecto se reitera para todo el rango de las arenas, por lo cual las siguientes comparaciones incluyen a las relaciones de Lischtván-Lebediev, Blench, Maza-Echavarría y Kellerhals. La Figura 2 muestra la comparación entre las cuatro fórmulas mencionadas previamente para el rango de profundidades (de la sección erosionada) hasta 20 m, lo cual incluye prácticamente a todos los casos prácticos de grandes ríos de llanura. En la Figura 3 se presenta el mismo análisis para el rango de profundidades de hasta 10 m.

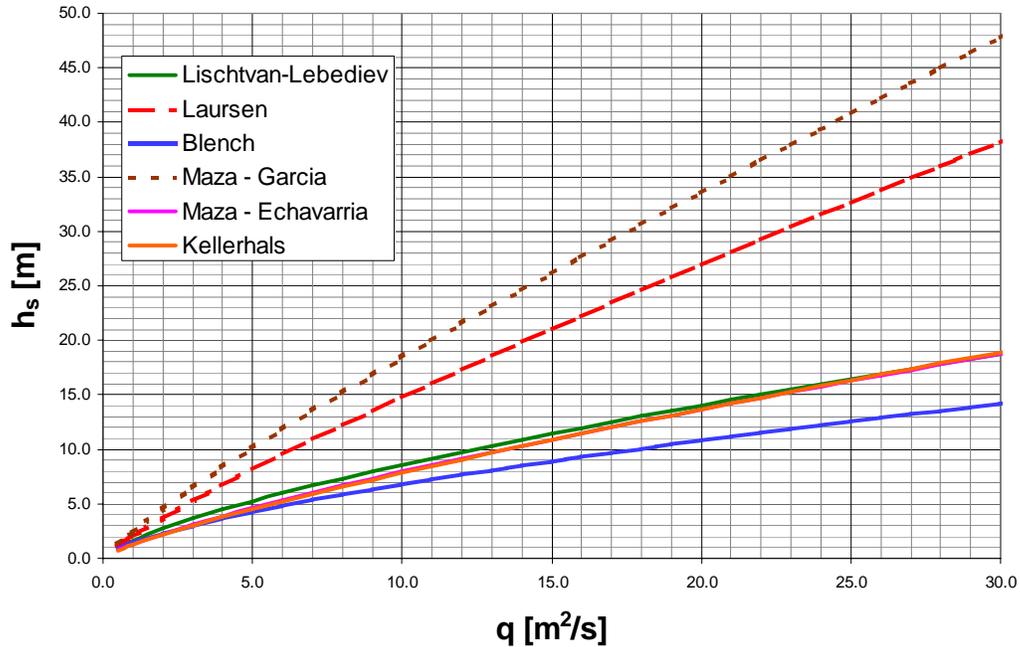


Figura 1. Comparación de las distintas fórmulas para calcular h_s para $d = 0.3$ mm

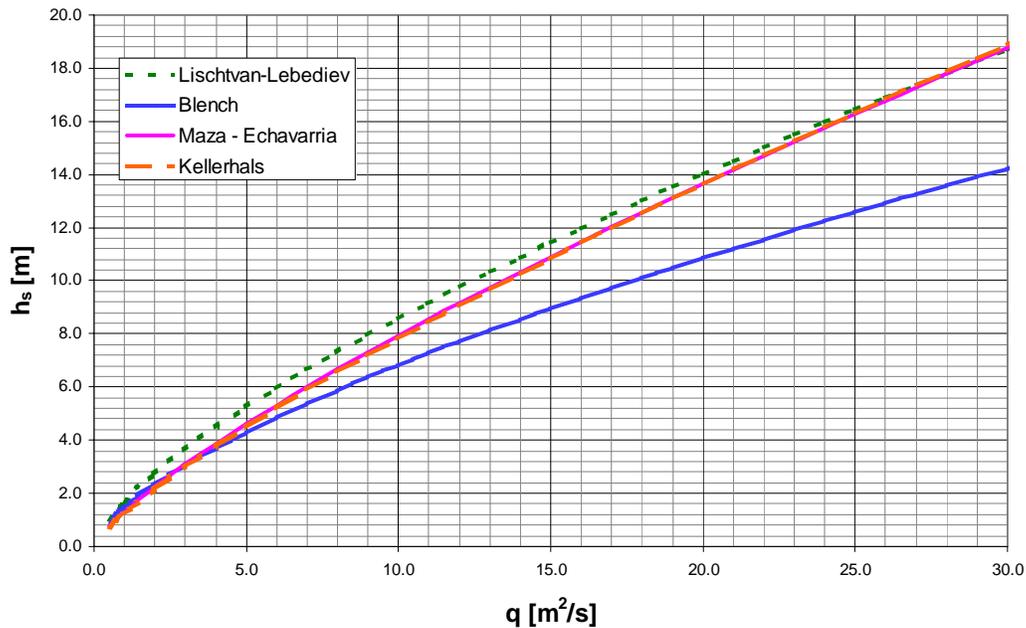


Figura 2. Comparación de cuatro fórmulas para calcular h_s para $d = 0.3$ mm, en el rango de h_s hasta 20 m

En las Figuras 4 y 5 se muestran las comparaciones de las gráficas que resultan de hacer variar el tamaño del sedimento. Es decir, la Figura 4 se aplica al caso de sedimentos arenosos finos ($d = 0.1$ mm) mientras que la Figura 5 es válida para arenas gruesas ($d = 1.0$ mm). 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 Lischtvan-Lebediev, Maza-Echavarría y Kellerhals, aunque esta última fue inicialmente calibrada con datos de ríos con lechos de grava.

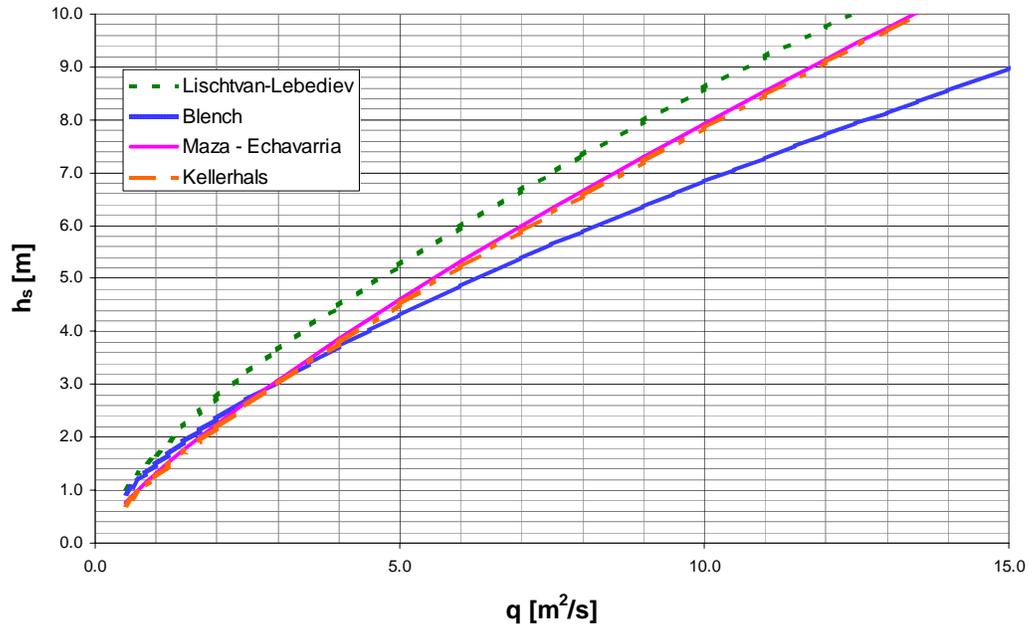


Figura 3. Comparación de fórmulas para calcular h_s para $d = 0.3$ mm, en el rango de h_s hasta 10 m

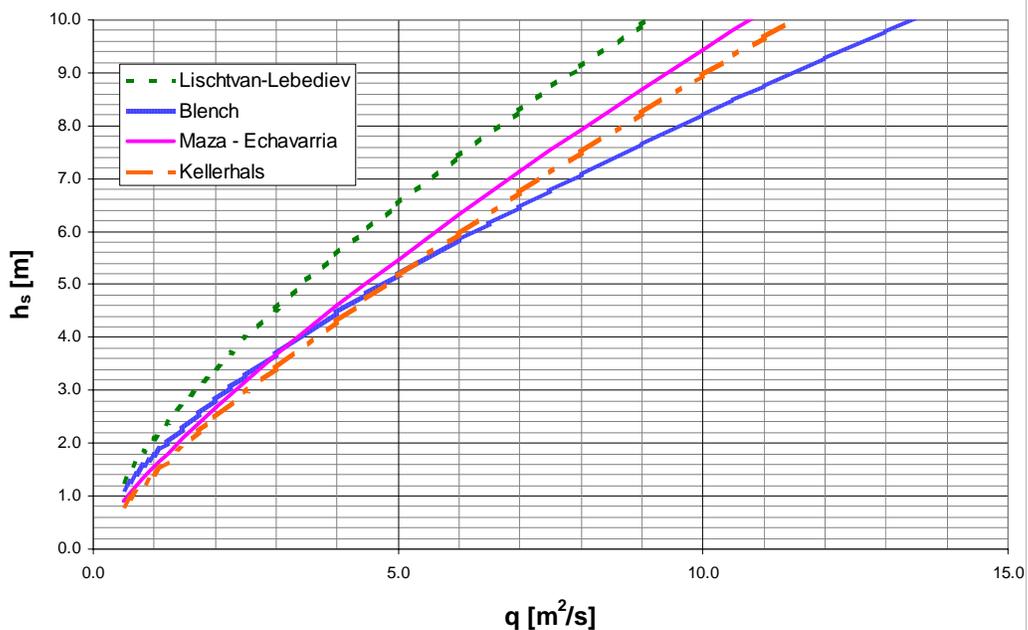


Figura 4. Comparación de fórmulas para h_s (arena fina: $d = 0.1$ mm), en el rango de h_s hasta 10 m

Formulaciones para las Velocidades Crítica y de Equilibrio

La denominada velocidad crítica (V_c), en el sentido en que se usa en la presente investigación, 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). Por su parte, 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.

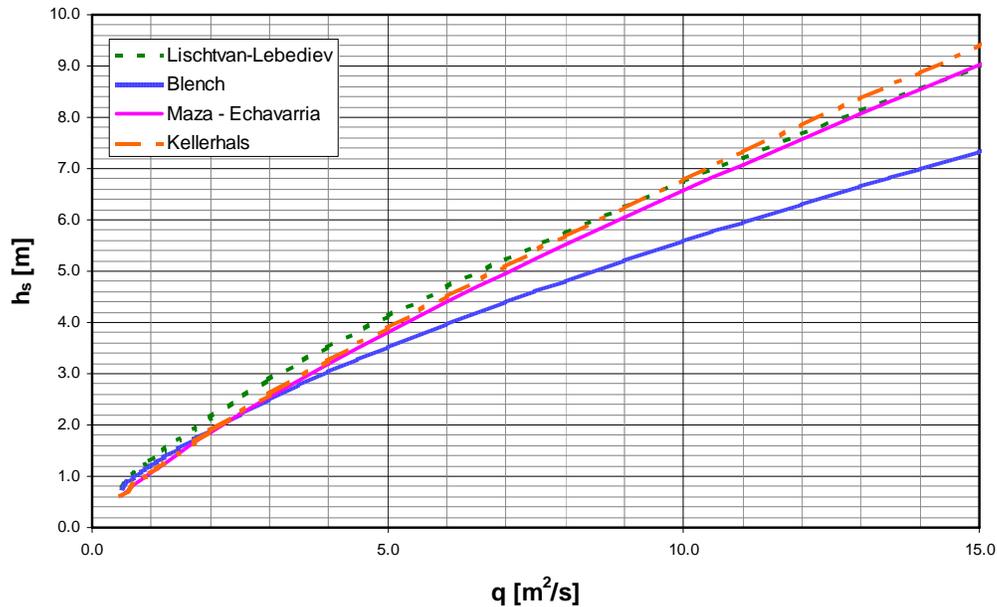


Figura 5. Comparación de fórmulas para h_s (arena gruesa: $d = 1.0$ mm), en el rango de h_s hasta 10 m

En la literatura se pueden encontrar varias formulaciones para expresar V_c y U_e . 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 .

Fórmula	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
Lischvan-Lebediev	4.700	0.280	0.410
Shields-Manning	6.093	0.283	0.167

Tabla 2. Fórmulas para la velocidad crítica

En la Tabla 2 se presentan algunas fórmulas extraídas de la literatura, reducidas al formato general siguiente:

$$V_c = b_0 d^{b_1} h^{b_2} \quad (3)$$

En ella, los valores del coeficiente b_0 como de los exponentes b_1 y b_2 han sido obtenidos en algunos casos mediante una manipulación algebraica de las expresiones originales publicadas por los diferentes autores, adoptando valores medios típicos para algunas cantidades, como

$9,81m/s^2$ para la aceleración de la gravedad g , o 1.65 para la densidad relativa del sedimento sumergido Δ . Para el caso de fórmulas que no estaban expresadas en formato matemático potencial (e.g., ecuaciones logarítmicas) se ha realizado una aproximación al formato potencial el cual es válido para el rango de tamaño de partículas de sedimentos de arenas, es decir: $0,063mm < d < 2mm$, aproximadamente.

En la Figura 6 se presenta una comparación de las distintas fórmulas para la velocidad crítica, encontrándose que la deducida a partir del criterio de Lischvan-Lebediev (que en realidad es una formulación para la velocidad de equilibrio) es la que predice valores mayores de V_c (en realidad, U_e) para profundidades mayores de aproximadamente 2 m. Debe tenerse en cuenta que en la hipótesis $V_r = U_e$ en la que se fundamentan los métodos de erosión general, las predicciones de valores altos de V_c (o U_e) se manifiestan en menores valores de h_s (profundidad en una vertical luego de producida la erosión general).

En relación a la comparación de las distintas formulaciones, luego del análisis de la bibliografía que se realizó en este estudio, puede afirmarse que la única ecuación calibrada (aparentemente con datos de ríos de llanura) para la predicción de la velocidad de equilibrio U_e es la de Lischvan-Lebediev. Es decir, los valores con los que se calibraron sus coeficientes y exponentes estarían asociados a una condición de transporte generalizado de sedimentos en el lecho,

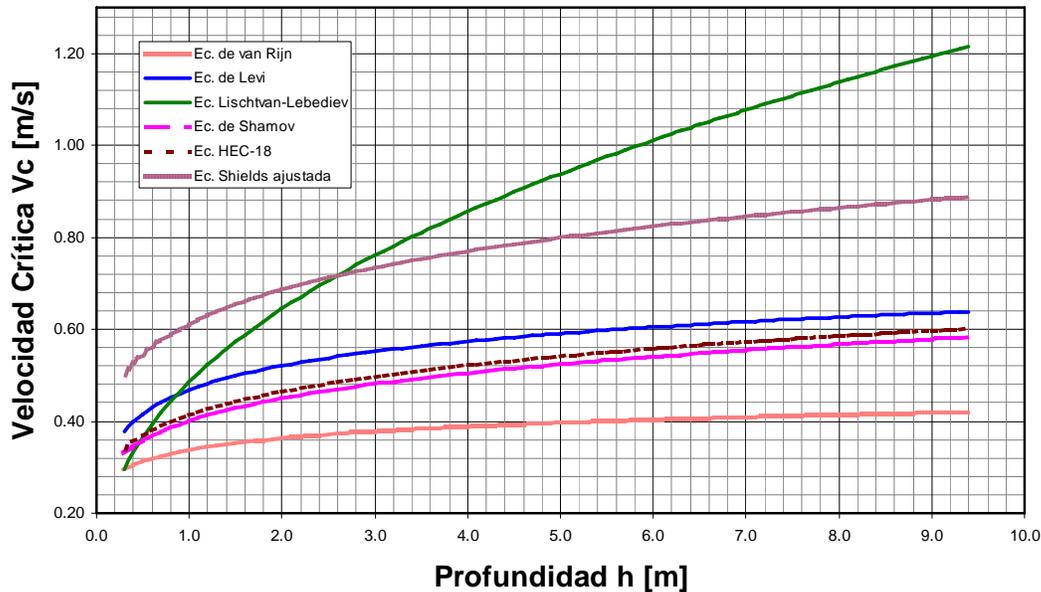


Figura 6. Comparación de las distintas fórmulas para evaluar V_c para $d = 0.3$ mm

mientras que todas las formulaciones restantes están basadas en una condición de movimiento incipiente de las partículas del lecho (en el instante de máxima erosión), lo cual obviamente en el caso de ríos de llanura conduce a estimaciones extremadamente conservadoras de las erosiones generales. Esta aseveración no ha podido demostrarse a partir de las referencias bibliográficas, pero se sostiene en el marco de esta investigación con el fin de aclarar las ambigüedades que surgen del estudio de la literatura sobre el tema. Una publicación reciente de Maza Alvarez (2004) presenta una serie de conceptos adicionales sobre estas cuestiones.

Formulaciones para la Resistencia al Flujo

La predicción de las características friccionales de cauces aluviales es un tema que ha merecido una importante consideración a lo largo del desarrollo de la hidráulica fluvial (ver Chang, 1988; Przedwojski *et al.*, 1995; Melville y Coleman, 2000). En una investigación anterior (Farias y Pilán, 2000) se ha demostrado que muchas de las relaciones de resistencia al escurrimiento de uso más extendido en el caso de cauces arenosos (en el rango de tamaños de partículas de 0.1 mm a 1.0 mm) pueden reducirse a un formato genérico en la forma de un producto de potencias tal como el siguiente:

$$V_r = a_0 d^{a_1} h^{a_2} S^{a_3} \quad (4)$$

donde los valores de los coeficientes y exponentes a_i ($i = 0, 1, 2, 3$) dependen de cada una de las ecuaciones publicadas en la literatura que se considere.

En ese trabajo (Farias y Pilán, 2000) se analizaron alrededor de una decena de ecuaciones publicadas en la literatura para evaluar la velocidad media en canales arenosos, tipificando a cada una ellas en el formato simplificado dado por la ecuación anterior. Se encontró que para la mayor parte de las funciones consideradas los exponentes de la profundidad y de la pendiente varían dentro de rangos limitados, y el exponente que mayor incertidumbre presenta es el del tamaño del sedimento, aunque sus valores son relativamente pequeños (alrededor de 0.1), y posiblemente esa sea la causa fundamental de aquella variabilidad.

Los valores de las constantes numéricas para varias fórmulas se presentan en la Tabla 3.

Si se consideran las relaciones para V_r que aparecen en la Tabla 3, y las formulaciones para U_e (o para V_c) que se listan en la Tabla 2, se deduce que mediante una combinación entre las mismas se podrían generar más de treinta criterios alternativos para estimar la erosión general con base en la igualdad $V_r = U_e$.

A continuación se presentan las bases para establecer un criterio generalizado de erosión general, apoyado en la hipótesis $V_r = U_e$ y considerando los formatos generales de las relaciones funcionales tanto para V_r como para U_e .

Fórmula	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

Tabla 3. Formulas de resistencia al flujo

Formulación generalizada para la erosión general en función de la profundidad inicial

Las relaciones para Ue (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 (a partir de las Tablas 2 y 3) que se considere apropiado, a partir la profundidad inicial h_i . La relación obtenida es la siguiente:

$$h_{s1} = [(\alpha_M/b_0)d^{-b_1}h_i^{a_2+1}]^{\frac{1}{b_2+1}} \quad (5)$$

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 mts. a 25 mts. Las aplicaciones se presentan en el párrafo siguiente. Luego de inspeccionar el formato de las ecuaciones involucradas, puede advertirse que la profundidad de socavación resulta en definitiva una función de los datos básicos (es decir, caudal de diseño, tamaño del sedimento, sección inicial del cauce, etc.) y de las constantes a_i y b_j (Tablas 2 y 3) que dependen del par de ecuaciones adoptadas para la velocidad media del flujo y la velocidad de equilibrio. Más aún, para un río dado, la profundidad en una vertical de una sección erosionada resulta una función potencial del tirante inicial. Las siguientes ecuaciones dan cuenta de ello:

$$h_{si} = k_0 h_i^{kl}$$

donde $k_0 = m_0 d^{m_1}$, $k_1 = (a_2 + 1)/(b_2 + 1)$, $m_0 = [\alpha_M/b_0]^{1/(b_2+1)}$, $m_1 = -b_1/(b_2 + 1)$.

Es decir, la profundidad de la franja erosionada resulta una función potencial de la profundidad inicial antes de la erosión.

De este modo, para poder aplicar esta metodología (de la cual la de Lischtvan & Lebediev es un caso particular), resulta necesario conocer a priori la geometría de la sección transversal para

una condición hidráulica dada, y luego aplicar a cada franja vertical en forma recurrente la ecuación que expresa la profundidad erosionada en función de la profundidad inicial.

En trabajos recientes (Farias *et al.*, 2003a, 2003b) se han presentado ejemplos sobre la aplicación práctica de esta metodología.

LA EROSIÓN GENERAL Y LOS PRINCIPIOS VARIACIONALES

Considerando las bases teóricas fundamentales que se han presentado previamente, y con la finalidad de encontrar una justificación racional de la forma de las ecuaciones para predecir la erosión general en ríos con lechos arenosos, se consideran algunas hipótesis referidas al comportamiento de los ríos aluviales durante la ocurrencia de crecidas. Las mismas se sintetizan a continuación.

Si el cauce se encuentra en una condición hidrológica dada, el mismo está desarrollando continuamente una serie de ajustes en su geometría tendientes a la adquisición de una situación final de equilibrio dinámico o régimen, lo que lo llevará a adoptar una configuración compatible con el caudal circulante, las características del material sedimentario que forma sus contornos y el transporte de sedimentos que le son suministrados por la cuenca hidrográfica.

Ahora bien, si se produce un incremento de caudal, inmediatamente el cauce procurará establecer una nueva configuración compatible con ese caudal y por ende desarrollará una serie de procesos morfológicos variando su ancho, profundidad y pendiente.

La escala de tiempo asociada a las crecidas hidrológicas habitualmente no es lo suficientemente larga como para alcanzar la condición de régimen, pero si se considera como tal (sobre todo en grandes ríos de llanura, con crecidas de varios meses de duración) se está del lado de la

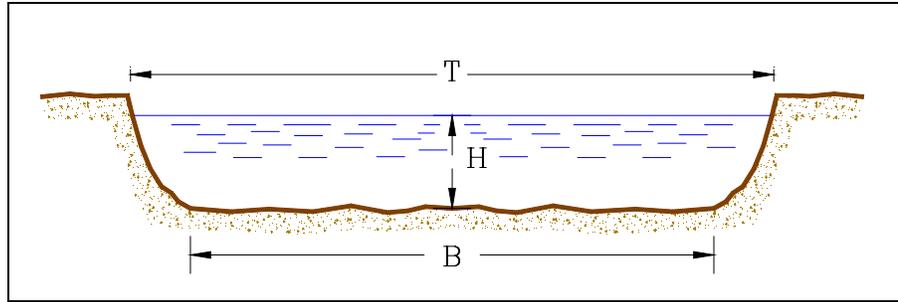


Figura 7. Geometría de la sección transversal de un cauce aluvial

seguridad, porque seguramente la sección no llegará a profundizarse lo suficiente para alcanzar la condición de equilibrio, y en la fase descendente del hidrograma el lecho comenzará nuevamente a depositarse para la búsqueda de una nueva condición de equilibrio. Por su parte, los ríos aluviales habitualmente presentan márgenes compuestas por limo y arcilla, y las escalas de tiempo asociadas a las variaciones en el ancho están más vinculadas al caudal dominante que a los caudales de crecida. Por lo tanto, los ajustes en la profundidad se presentan en tiempos significativamente menores a los ajustes en las dimensiones laterales.

En base a esta hipótesis de comportamiento, es posible asumir que la situación de equilibrio se corresponde con un estado extremo de mínima tasa de disipación de energía, en correspondencia con la máxima eficiencia en el transporte sólido.

Aplicando los principios variacionales previamente enunciados, se ha demostrado (Chang, 1988; Farias, 1998) que en la situación de equilibrio dinámico, la profundidad H (Figura 7) se puede expresar por una relación potencial del tipo régimen (May *et al.*, 2002) tal como la siguiente:

$$H = k_0 \cdot d^{k_1} \cdot Q^{k_2} \quad (6)$$

donde k_0 , k_1 y k_2 son constantes numéricas.

Por su parte, la relación ancho-profundidad en cauces aluviales en equilibrio dinámico se puede expresar a través de una relación del tipo Glushkov (Farias, 1998), la cual se ha demostrado a través de consideraciones de similitud y también a partir de hipótesis de comportamiento extremo en cuanto a los mecanismos de disipación energética del río. La misma se escribe de la siguiente manera:

$$B^m = K_G \cdot H \quad (7)$$

en la que B es el ancho estable (en ríos aluviales B tiende a confundirse con T , Figura 7), mien-

tras que k_0 , k_1 , k_2 , K_G y m son constantes que se pueden establecer mediante una combinación de una ecuación para la fricción aluvial, otra para el transporte sólido y la expresión matemática de minimización de la tasa de disipación de energía, es decir: $dH_T/dt \rightarrow$ mínimo (donde H_T es la energía total y t es el tiempo; Chang, 1988).

Considerando que el ajuste en el ancho se produce en una escala de tiempo de un orden de magnitud mayor a la del ajuste en la profundidad como consecuencia del proceso de erosión general, puede suponerse (del lado conservador) que en el instante de máxima erosión el tirante alcanza la profundidad de régimen: $h_s = H$.

En esa situación, y teniendo en cuenta que $Q = q \cdot B$ y el factor de Glushkov se expresa como $K_G = K_{G0} \cdot d^r$ (donde r es un exponente empírico; Farias, 1998), combinando estas relaciones, y luego de un acomodamiento conveniente de las variables, se obtiene la ecuación:

$$h_s = \left(k_0^{\frac{m}{m-k_2}} K_{G0}^{\frac{k_2}{m-k_2}} \right) \cdot d^{\frac{k_1 m + k_2 r}{m-k_2}} \cdot q^{\frac{k_2 m}{m-k_2}} \quad (8)$$

Como puede observarse, la ecuación anterior es del mismo tipo que la relación general (ecuación 1):

$$h_s = c_0 \cdot q^{c_1} / d^{c_2}$$

Es decir, los valores de c_0 , c_1 y c_2 se pueden obtener a partir de los factores y exponentes del tamaño del sedimento y del caudal en la ecuación de la profundidad de régimen, y del factor y exponente de la fórmula de Glushkov para el ancho estable.

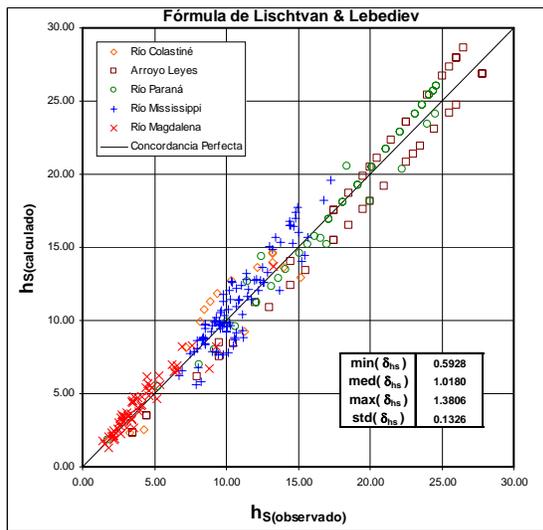
Analizando las diversas posibilidades de combinaciones que se pueden presentar en función de los valores típicos de estas cantidades para el caso de ríos de llanura (Farias, 1998), se encontró que los parámetros de la ecuación generalizada varían entre los siguientes rangos:

$0,31 < c_0 < 0,42$, con un valor promedio del orden de 0.35
 $0,62 < c_1 < 0,78$, con un valor medio de 0.7
 $0,10 < c_2 < 0,30$, con un valor medio cercano a 0.2

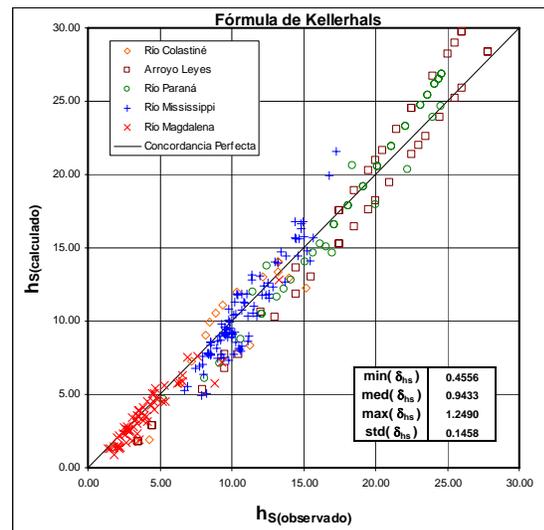
Es decir, si se adoptan los valores medios de estas cantidades (un análisis detallado de la sensibilidad de los mismos a distintas combinaciones de funciones de fricción y transporte excede los objetivos del artículo que aquí se presenta) se encuentra que la relación teórica para la erosión general resulta:

$$h_s = 0,35q^{0,7}/d^{-0,2} \quad (9)$$

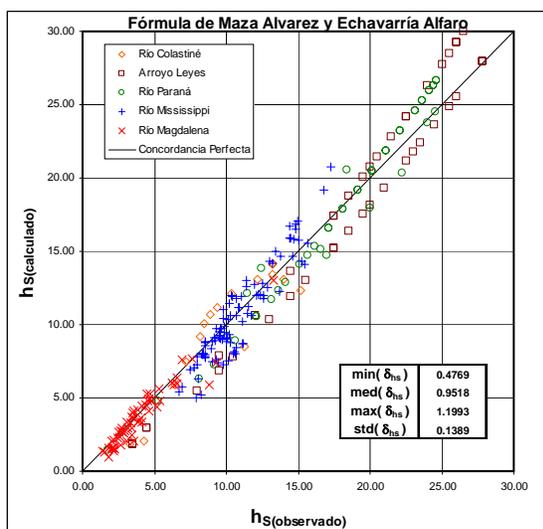
Esta es una ecuación de una extraordinaria sencillez, y la misma ha sido encontrada a través de consideraciones energéticas basadas en hipótesis de comportamiento que resultan razonables para el caso de grandes ríos de llanura, en los que las crecidas se presentan de una manera tal y con tiempos de base en sus hidrogramas lo suficientemente extensos como para sustentar las hipótesis sobre las cuales se ha realizado la demostración.



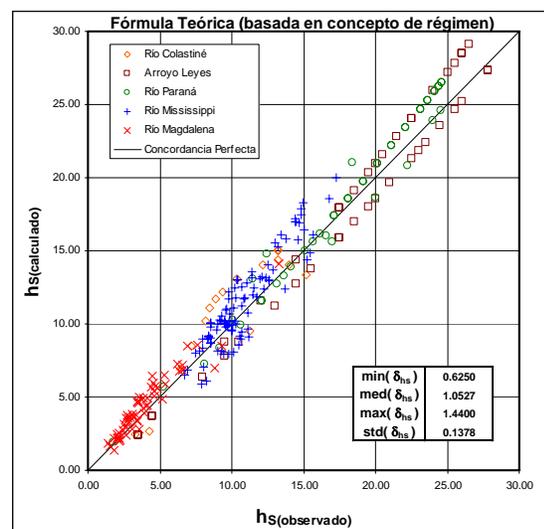
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 8. Contrastación de las fórmulas teóricas con datos observados en grandes ríos de llanura

COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LA METODOLOGÍA GENERALIZADA

La ecuación 9 fue encontrada a partir de una serie de consideraciones teóricas, por lo que ahora se intenta evaluar su bondad como predictor en el caso de sistemas fluviales reales. Para la validación de la fórmula general, se seleccionaron datos correspondientes a grandes ríos de llanura, tales como el Paraná, Leyes y Colastiné en Argentina, Magdalena en Colombia y Mississippi en Estados Unidos (Schreider *et al.*, 2001). Además de la fórmula obtenida en este estudio, también, con fines ilustrativos, se evaluaron otros métodos empíricos. Los resultados se indican en la Figura 8, para las fórmulas de: (a) Lischtvan & Lebediev; (b) Kellerhals; (c) Maza & Echavarría; y (d) La fórmula teórica (ecuación 9) obtenida a partir de consideraciones energéticas.

Se han considerado 254 datos, correspondientes a otras tantas franjas verticales de segmentación obtenidas de aforos líquidos practicados en los ríos mencionados. En cada uno de los gráficos se indican los estadísticos correspondientes de la razón de discrepancia δ_{hs} definida como el cociente entre la profundidad de erosión estimada y la observada. A pesar de que se observa una buena coincidencia entre valores calculados y observados para todo el rango de profundidades, desde 1 metro hasta 26 metros, pueden advertirse algunas singularidades en cuanto a la bondad de algunas ecuaciones respecto de otras.

De las cuatro metodologías evaluadas la fórmula de Lischtvan & Lebediev es la que exhibe un mejor comportamiento general, con una media de 1.0180 y una desviación estándar de 0.1326 para la razón de discrepancia. Dentro de este contexto, también es de destacar el excelente comportamiento de la fórmula teórica deducida en este estudio, que tiende a sobreestimar levemente las profundidades de erosión (con una media de 1.0527 y una desviación estándar de 0.1378), pero al situarse del lado conservador, este hecho la convierte en una ecuación atractiva incluso con fines de diseño.

Por debajo de las dos anteriores se sitúan las formulaciones de Maza & Echavarría y la de Kellerhals, ambas con una tendencia a la subestimación (en el orden del 5% al 6%) de las profundidades de erosión en el rango medio de los datos analizados.

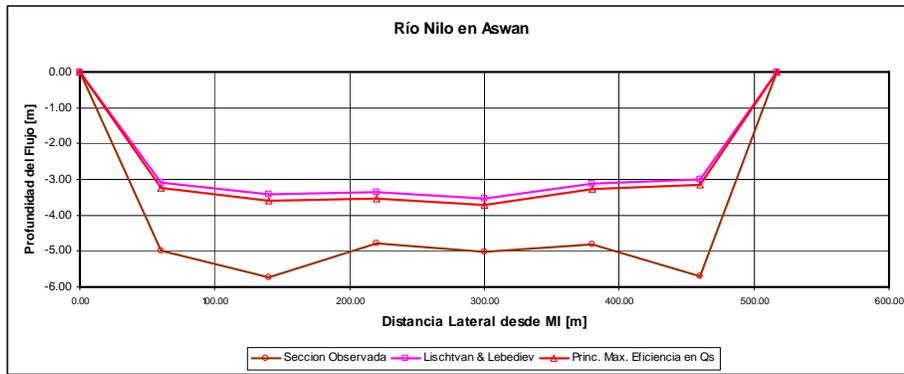
Un aspecto altamente significativo de la bondad predictiva de la formulación teórica generalizada encontrada en el presente estudio lo constituye el hecho de que para encontrar esa ecuación no ha sido necesario ningún tipo de cali-

bración previa con profundidades de erosión observadas, sino simplemente aplicar una hipótesis de comportamiento que se considera razonable para un cauce natural en una condición de equilibrio dinámico o régimen. En el gráfico de la Figura 8(d) se observa que un porcentaje apreciable de puntos, para el rango de profundidades entre 5 metros y 25 metros, se sitúan en la banda de $\pm 10\%$, lo cual evidencia la bondad del método propuesto para grandes ríos aluviales en ambientes de llanura.

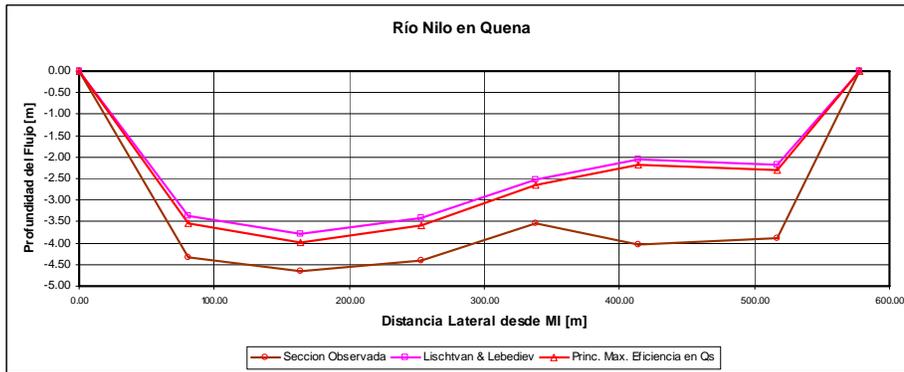
Como una comprobación adicional, se ha evaluado la formulación generalizada con datos del Río Nilo, en Egipto, y del Río Solimoes, perteneciente al sistema del Río Amazonas, en Brasil. En el caso del Río Nilo, se analizaron aforos líquidos y sólidos realizados recientemente por Abdel-Fattah *et al.* (2004). Las secciones relevadas (en el sentido de sur a norte) fueron cuatro, a saber: Aswan, Quena, Sohag y Bani-Sweif. La primera de ellas se sitúa aguas abajo de la presa de Aswan, mientras que la última se ubica al sur de El Cairo.

Los caudales líquidos durante las campañas de medición variaron entre $1040 \text{ m}^3/\text{s}$ y $1590 \text{ m}^3/\text{s}$. Los resultados se presentan en las Figuras 9 (a) hasta (d).

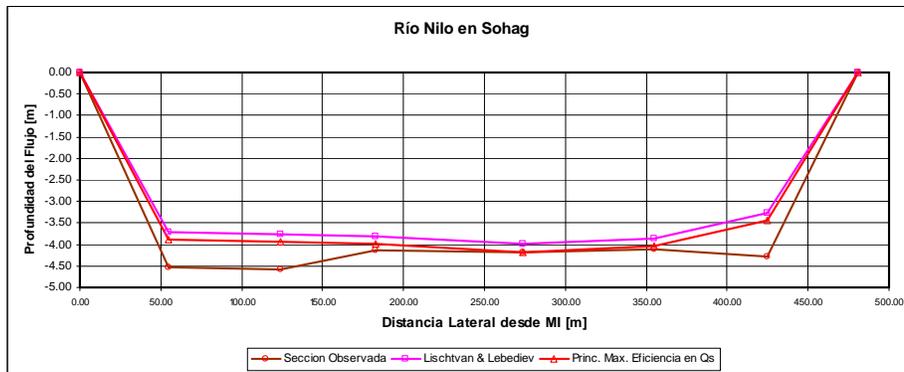
En las secciones transversales analizadas se ha dibujado, en conjunto con el perfil medido, las predicciones de las formulaciones de Lischtvan & Lebediev (ecuación 2) y la obtenida en este estudio a partir del principio de máxima eficiencia en el transporte sólido (ecuación 9). Se observa que en las dos primeras secciones analizadas (Aswan y Quena) ambas formulaciones sub-estiman en forma apreciable las profundidades de erosión general observadas, mientras que en el caso de las secciones más alejadas hacia aguas abajo de la presa de Aswan (Sohag y Bani-Sweif) las formulaciones exhiben un buen comportamiento predictivo, con una leve superioridad de la ecuación 9. Se estima que las primeras secciones situadas aguas abajo de la presa de Aswan están afectadas por un proceso de degradación de largo plazo por déficit de sedimento (retenidos en el embalse), aspecto que las formulaciones aquí presentadas no pueden predecir y es de suponer que al menos parte de ese metro y medio de erosión no explicada por los métodos analizados se debe a ese proceso. Puede observarse que el comportamiento predictivo de las formulaciones vá mejorando sistemáticamente hacia aguas abajo, llegándose a las dos últimas secciones con predicciones razonablemente buenas.



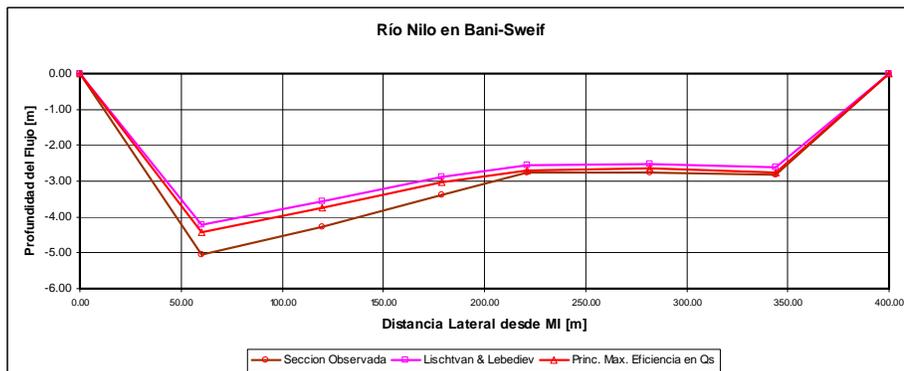
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 9. Secciones transversales del Río Nilo

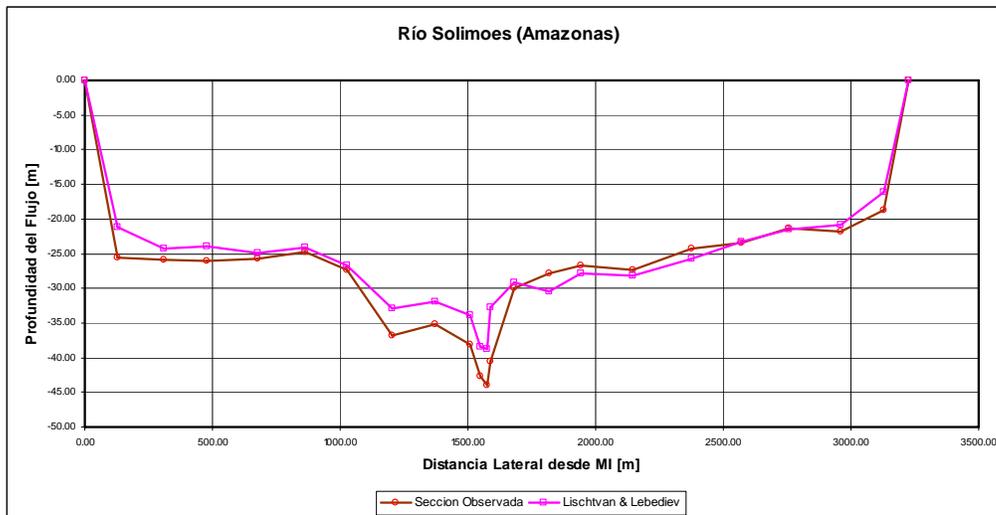


Figura 10. Sección transversal del Río Solimoes (Amazonas) en Manacapurú. Ec. de Lischtván-Lebediev

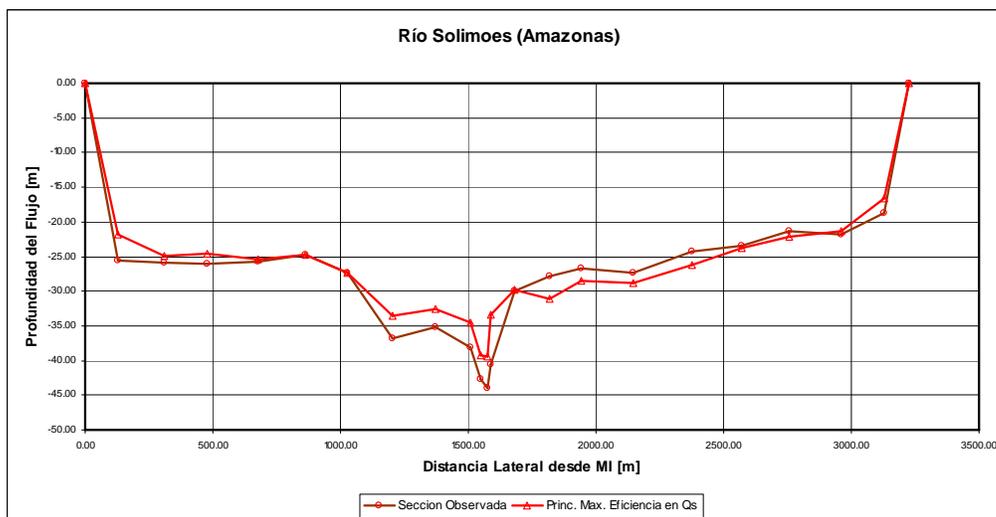


Figura 11. Sección transversal del Río Solimoes (Amazonas) en Manacapurú. Ec. METS

El otro caso analizado, fue el del Río Solimoes, tributario principal del Amazonas, en la estación de aforos de Manacapurú, la cual en un aforo practicado en septiembre de 1994 arrojó un caudal líquido del orden de $113000 \text{ m}^3/\text{s}$ (Medeiros Fernandes *et al.*, 1994; Giacosa, 2004).

En las Figuras 10 y 11 se presentan las secciones medidas y las que se obtienen a partir de las predicciones con las formulaciones de Lischtván & Lebediev y del Principio de Máxima Eficiencia en el Transporte Sólido (METS), respectivamente. Puede observarse que ambas metodologías producen resultados prácticamente idénticos con este caso, con muy buenas predicciones en gran parte de la sección transversal, pero en ambos

casos se producen subestimaciones en la región central del cauce, el cual presenta un comportamiento muy particular.

En efecto, una aspecto singular de los grandes ríos de llanura es el comportamiento del thalweg de los mismos, definido en el sentido hidráulico-morfológico como aquel subsistema de escurrimiento en el que se concentran los mayores caudales unitarios (Toniolo, 1999; Farias *et al.*, 2003c). En ese contexto, el río se comporta como una especie de 'gran tubo de corriente' contenido en el interior del curso global, que inclusive desarrolla su propio patrón de alineamiento en cuanto a la morfología de la corriente dominante. Los estudios de antece-

dentes en otros grandes ríos como por ejemplo el Paraná (Toniolo, 1999; Farias *et al.*, 2003c) referidos al análisis detallado de aforos líquidos que permiten establecer la distribución de velocidades (vertical y lateralmente) hacen posible sustentar la hipótesis de la existencia de un verdadero 'río' sinuoso dentro de otro mayor que mantiene su caudal en toda la sucesión de ensanchamientos, confluencias, estrechamientos y expansiones del curso a la largo de un tramo. Parecería ser que el Río Solimoes exhibiría este patrón de comportamiento, lo cual se refleja en la existencia de ese thalweg localizado en la sección central del cauce. Como el conjunto de ecuaciones aquí presentadas no tienen en cuenta esas singularidades, las mismas son incapaces de predecir las profundidades en esas regiones.

CONCLUSIONES

Se ha presentado una demostración teórica que permite expresar la erosión general en una franja vertical de la sección transversal en función del caudal unitario y del tamaño característico del sedimento. Para ello, se han aplicado hipótesis de comportamiento extremo referidas a los aspectos energéticos del flujo en la situación de máxima erosión y se ha encontrado una relación funcional genérica basada en el principio de máxima eficiencia en el transporte sólido (METS), la cual engloba a gran parte de las ecuaciones disponibles para calcular la erosión general como casos particulares de aquella.

Asimismo, se han revisado los conceptos asociados al proceso de erosión general en cauces naturales y algunos de los métodos actualmente disponibles para su estimación cuantitativa. El análisis de los conceptos de velocidad crítica y de equilibrio ha conducido a la propuesta de una formulación generalizada para calcular la erosión general en ríos con lechos arenosos a partir de un relevamiento previo de la sección transversal antes de ocurrir la crecida bajo análisis. El método 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.

La potencialidad predictiva de la metodología propuesta ha sido ilustrada mediante la aplicación práctica de la formulación generalizada a ejemplos de diseño. En ellos, se muestran las discrepancias que se pueden obtener entre las profundidades de socavación calculadas y medidas con varias formulaciones, incluida la teórica deducida en este estudio. En ese sentido, para el

caso de grandes ríos arenosos de llanura con tirantes máximos del orden de los 3 a 25 metros, la fórmula teórica produce predicciones que pueden considerarse satisfactorias teniendo en cuenta los errores de estimación que habitualmente se encuentran en estudios fluviales, lo cual posiciona al método propuesto como un buen predictor de la profundidad de erosión local para ríos aluviales con lechos arenosos y márgenes cohesivos.

AGRADECIMIENTOS

Parte de las investigaciones que se presentan en este trabajo han sido financiadas por el Consejo de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad Nacional de Santiago del Estero (CICYT-UNSE) a través de fondos de subsidios y por el CONICET. Los autores también desean expresar su gratitud a Roger Bettess y Christine Lauchlan de HR Wallingford, quienes gentilmente facilitaron documentos usados en esta investigación. Los datos correspondientes a los aforos en el Río Solimões (Amazonas) fueron facilitados gentilmente por el Ing. Ricardo Giacosa, del CRL-INA.

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_i : Constantes ($i = 1, 2, 3, \dots$)
- c_j : Constantes ($j = 1, 2, 3, \dots$)
- d: Tamaño mediano de las partículas de sedimento ($d = d_{50}$)
- g: Aceleración de la gravedad
- H: Profundidad media del flujo en una sección estable
- h_s : Profundidad local del flujo
- h_s : Profundidad del flujo luego de producida la erosión general
- K_G : Coeficiente en la fórmula de Glushkov
- K_{Go} : Coeficiente del tirante en la fórmula de Glushkov generalizada
- k_i : Constantes ($i = 1, 2, 3, \dots$)
- m: Exponente del ancho en la fórmula de Glushkov
- m_i : Constantes ($i = 1, 2, 3, \dots$)
- q: Caudal líquido específico (por unidad de ancho del cauce)
- r: Exponente del sedimento en la fórmula de Glushkov generalizada
- S: Pendiente del lecho
- T: Ancho del cauce a nivel de la superficie libre del flujo
- U_e : Velocidad media de equilibrio

V_r : Velocidad media del flujo
 V_c : Velocidad media del flujo crítica para el inicio de arrastre de sedimentos
 α_M : Coeficiente en la ecuación generalizada de erosión
 Δ : Densidad relativa del sedimento sumergido
 $[= (\rho_s - \rho)/\rho]$
 δ_X : Razón de discrepancia ($= X_{calculado}/X_{observado}$)
 μ : Viscosidad dinámica
 ρ : Densidad del fluido
 ρ_s : Densidad del sedimento

REFERENCIAS

- Abdel-Fattah, S., Amin, A. y van Rijn, L.C., (2004). Sand Transport in Nile River, Egypt. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 6, June 2004, pp. 488–500.
- Aguirre Pe, J., (1980). *Hidráulica de Sedimentos*. Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
- 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.
- Chang, H.H., (1988). *Fluvial Processes in River Engineering*. J. Wiley & Sons, NY, USA.
- Farias, H.D., (1998). Racionalización de la Fórmula de Glushkov para Cauces Aluviales Estables. *Memorias del XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Oaxaca, México, Oct. 1998, pp. 33–40.
- Farias, H.D. y Pilán, M.T., (2000). Análisis de Fórmulas de Fricción Aplicables a Canales Arenosos en Régimen. XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Córdoba, Argentina. Tomo I, pp. 511–520.
- Farias, H.D. & Pilán, M.T., (2002). Cálculo de las Profundidades de Socavación General en Cauces Aluviales. Aspectos Teóricos y Aplicaciones. XX Congr. Latinoam. de Hidráulica, La Habana, Cuba.
- Farias, H.D., Pilán, M.T., Pece, F.J., Mattar, M.T., Storniolo, A., Olmos, L., Galvan, L. e Infante, C., (2003a). A Simplified Method for Computing General Scour in Sand-Bed Channels. *Proceedings of XXX IAHR Congress*, Thessaloniki, Greece.
- Farias, H.D., Pilán, M.T., Pece, F.J. y Olmos, L., (2003b). Erosión General en Ríos con Lechos Arenosos. *Nuevas Tendencias en Hidráulica de Ríos*. Primer Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Buenos Aires, Argentina.
- Farias, H.D., Rodriguez, A., Brea, J.D., Bravo, H.R., Castello, E., Hillman, G., Pagot, M. y Martínez, R., (2003c). Morphodynamic Analysis of a Large Plain Alluvial River in relation to Cross-Channel Road and Bridge Works. *Proceedings of 3rd IAHR Symposium on River, Estuarine and Coastal Morphodynamics*, Barcelona, Spain, September.
- Farraday, R.V. y Charlton, F.G., (1983). *Hydraulic Factors in Bridge Design*. Hydraulics Research Stations Ltd., Wallingford, Oxfordshire, U.K.
- Franceschi, L.E., (1984). *Drenaje Vial*. Ed. Fundación J.J. Aguerrevere, Fondo Editorial del Colegio de Ingenieros de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- Giacosa, R., (2004). Comunicación Personal.
- Juárez Badillo, E. y Rico Rodríguez, A., (1984). *Mecánica de Suelos*. Tomo III, Flujo de Agua en Suelos, Editorial Limusa, México, 414 pp.
- Lauchlan, C. & May, R. (2002). Comparison of general scour prediction equations for river crossings. First International Conference on Scour of Foundations, ICSF-1. Texas, USA, pp. 184–197.
- Leopold, L.B., Wolman, M.G. y Miller, J.P., (1964). *Fluvial Processes in Geomorphology*. W.H. Freeman and Co., San Francisco, USA, 522 pp.
- May, R., Ackers, J. y Kirby, A., (2002). *Manual on scour at bridges and other hydraulic structures*. CIRIA Publication C551, Construction Industry Research and Information Association, ISBN:0-86017-551-0, London, U.K.
- Maza Alvarez, J.A., (2000). Erosión General en Cauces con Material Granular. XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Córdoba, Argentina. Tomo I, pp. 319–328.
- Maza Alvarez, J.A., (2004). Velocidad media de inicio de erosión en pilas, velocidad media crítica de arrastre, y velocidad media de equilibrio en erosión de avenidas. XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, São Pedro, Edo. São Paulo, Brasil, pp. 233.
- Maza Alvarez, J.A. y Grajales, J.A., (2000). Velocidades Medias de Inicio de Erosión. XIX

- Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Córdoba, Argentina. Tomo I, pp. 471-480.
- Medeiros Fernandes, U. y otros, (1994). Técnicas de Medição de Descarga Líquida em Grandes Ríos. Notas del 2o. Curso Internacional, 08-16 sept. 1994. Ministerio de Minas y Energía, Coordinación General de Recursos Hídricos, Brasil.
- Melville, B. W. y Coleman, S.E., (2000). Bridge Scour. Water Resources Publications LLC, Littleton, Colorado, USA.
- Moreno, C. y Fuentes, R., (1998). Socavación generalizada, método de cálculo de Lischtvan Lebediev y Maza. Verificación experimental. XVIII Congr. Latinoam. Hidráulica, V.2, pp 149-154. Oaxaca, México.
- Przedwojski, B., Blazejewski, R. y Pilarczyk, K.W., (1995). River Training Techniques: Fundamentals, techniques and applications. A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, The Netherlands.
- Schreider, M.I., Scacchi, G., Franco, F., Fuentes, R. y Moreno, C., (2001). Aplicación del Método de Lischtvan y Lebediev al Cálculo de la Erosión General. Ing. Hidr. en México, Vol. XVI, No. 1, pp. 15-26.
- U.S. Department of Transportation, (1993). Evaluating Scour at Bridges. Hydraulic Engineering Circular No. 18, report FHWA-IP-90-017, Federal Highway Administration, Washington, DC, USA.
- Toniolo, H.A., (1999). Las Divagaciones del Thalweg del Río Paraná. Tesis de Magister en Ingeniería de los Recursos Hídricos. FICH - UNL, Santa Fe, Argentina.
- Weber, J.F., (2003). Modelación integrada uni y bidimensional de flujo en planicies de inundación. Tesis de Maestría, Fac. de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.