

EN BUSCA DE UNA FÓRMULA DE TRANSPORTE PRÁCTICA

A. Pujol, A. Paterson, S. Loschacoff y V. J. Charette

Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires
e Instituto Nacional del Agua

Las Heras 2214, (1127) Buenos Aires, tel: (54-11) 4514 3016, e-mail: apujol@fi.uba.ar

RESUMEN.

Es bien conocido que las mejores fórmulas de transporte aproximan los valores medidos por la mitad o el doble en un 70% a 80 %. Sin embargo, en la Ingeniería práctica un cálculo se considera adecuado cuando se aleja del valor medido dentro del 10 o 20 %. En una contribución anterior en la cual participaron la mayoría de los actuales autores (Pujol, Paterson y Charette, 2004) se modificó el coeficiente $\alpha = 0,1$ de la fórmula de Engelund – Hansen para hacerlo variable con la función de transporte ϕ y de ese modo se logró calcular el transporte sólido de canales artificiales (ACOP y All American Canals) con un margen de error entre + 30 % y – 20 %.

En la presente contribución se intenta perfeccionar la variación del coeficiente α cuando, por una parte se eliminan los datos que: 1) no corresponden a situaciones de equilibrio fluvial (permanencia de los flujos líquido y sólido) y 2) cauces de márgenes rígidas, en la medida que no reproduzcan una situación de márgenes erosionables (canales de laboratorio). Asimismo se incluyen algunos datos de ríos argentinos para los cuales es posible suponer que no tienen un suministro restringido de sedimento, limitada su capacidad de transporte por acorazamiento u ocultamiento, o transitan una situación de impermanencia.

Palabras claves: Hidráulica Fluvial, transporte de sedimentos, método de ajuste

INTRODUCCIÓN.

Después de algo más de un siglo de perfeccionamiento de las fórmulas de transporte de sedimentos, desde la primera de Du Boys (1879) hasta las muy elaboradas de van Rijn (1984), no se ha logrado alcanzar una precisión compatible con las necesidades de la técnica. En efecto, las fórmulas de van Rijn (carga de fondo y en suspensión) logran predicciones que se encuentran en un 76 a 77 % entre la mitad y el doble de lo medido en campaña. Muy recientemente, Yang – Lim (2003) publicaron una nueva alternativa que mejora en unas pocas centésimas los porcentajes anteriores.

La presente comunicación corresponde a una investigación exploratoria que intentar buscar una manera de mejorar la precisión de las predicciones para ponerlas al nivel de otras herramientas de la ingeniería práctica.

PLANTEO DEL PROBLEMA. En el periodo comprendido entre las contribuciones de van Rijn y Yang – Lim (1984 a 2002), se han logrado especificar algunos aspectos que mejoran la precisión de las estimaciones:

- Es aconsejable discretizar la sección transversal de un curso de agua en franjas verticales en correspondencia con distintas profundidades y distribución de velocidades.
- Asimismo, es aconsejable analizar separadamente los rangos de tamaño de sedimentos de granulometría extendida (Molinas y Wu, 1998; Basile y Peviani, 1998).

Por otra parte, resulta necesario distinguir entre distintas condiciones de transporte no representables por una sola fórmula. Así, Bravo-Espinosa; Osterkamp y López (2003) aconsejan distinguir entre distintas condiciones de transporte:

- con satisfacción plena de la Capacidad de Transporte por la corriente.
- con *Transporte Limitado* (restringido) por acorazamiento u otro impedimento que bloquea el transporte de ciertos tamaños, etc.
- con *Transporte Parcialmente Limitado*.
- con *Suministro Limitado*. Se transporta el material capaz de ser transportado y en existencia en el suministro y el cauce.

Finalmente, se deben tener en cuenta las condiciones de toma de muestras de carga de fondo y en suspensión de material de fondo:

- En *canales de laboratorio* las paredes laterales quitan un grado de libertad al cauce. Se establecen condiciones de equilibrio del agua y sedimento que no ocurren en cauces aluviales y aun canales artificiales, en los cuales los grados de libertad incluyen la posibilidad de modelar las márgenes (erosionar o construir) en consonancia con los gastos líquidos y sólidos. En cambio, en las experiencias de laboratorio se logran estados adicionales de equilibrio no-aluviales que deben ser desechadas al analizar condiciones de equilibrio de cauces aluviales o incluirlas en una categoría especial de cauces semi-aluviales de márgenes rígidas.

Lamentablemente, muchas experiencias de laboratorio no están acompañadas de una Memoria Técnica que permita identificar esas singularidades. Un caso encomiable es el de las experiencias de Guy et al (1966) quienes hicieron una descripción de cada corrida, de modo tal que es posible conocer cuando una situación se corresponde con una condición de “cauce aluvial”. De acuerdo a una opinión de H. H. Chang (1986; 1998), que se comparte, se logra la identificación de una situación aluvial completa cuando al disminuir la tensión de corte (velocidad y/o tirante) se alcanza una condición previa a la formación de bancos (barras) laterales alternados. Probablemente, la ocurrencia de un cauce sinuoso en laboratorio todavía es calificable como “aluvial” en sentido de un equilibrio dinámico.

- En “cursos de agua naturales”, la mayoría de los datos disponibles corresponden a:
 1. Muestreos en condiciones de régimen impermanente, gradualmente variado. Es entendible el deseo de obtener muestras de sedimento durante las crecidas porque en esas condiciones se registra un gran transporte de sólidos que modificará la morfología de los cauces, colmatará los embalses y perturbará el funcionamiento de otras obras. Sin embargo, se supone que las fórmulas de transporte disponibles corresponden a condiciones aproximadamente “permanentes y uniformes”, por lo cual esos registros son inválidos para calibrarlas.
 2. Falta de discriminación respecto la franja de la sección transversal donde se ha tomado una muestra. Teóricamente, debería distinguirse entre “tubos de corriente (i)” con distintas profundidades y velocidades (equiparable a tensiones de corte), cada uno de ellos con su propio gasto sólido por unidad de ancho, $g_s(i)$. Por el contrario, se privilegia el gasto sólido promedio del cauce que, no necesariamente, coincide con ninguna de las condiciones existentes en las distintas franjas.
 3. Dificultades para obtener muestras de carga de fondo representativas y para estimar el perfil de concentraciones de la carga en suspensión (de material de fondo) en la zona “no medida” impuesta por los equipos de muestreo en uso.

Convendría modificar las normas de muestreo para compatibilizarlas tanto con las necesidades individuales de un proyecto como con el adelanto de la disciplina.

La inclusión de esos registros de muestras tomadas en régimen impermanente o integradas en la sección transversal, justifican por si solos la gran dispersión de las fórmulas de transporte.

En una publicación anterior de los autores (Pujol, Paterson y Charette, 2004) se advirtió la conveniencia de modificar las fórmulas existentes para mejor describir el transporte en condiciones de equilibrio y por unidad de ancho. A tal efecto, se modificó la fórmula de Engelund – Hansen cuando se la aplica en franjas de igual profundidad (el caso de canales artificiales) y se hace variar su coeficiente α que fuera adoptado por sus autores como constante igual a 0,1. Esa variación se concretó por rangos de la denominada “función de corriente”, $\phi_{s,t}$.

Corresponde especificar que se intenta limitar la calibración de la fórmula de Engelund – Hansen con datos que correspondan a:

- Régimen permanente y uniforme del flujo líquido, aproximadamente.
- Transporte sólido de material del lecho en equilibrio, esto es, que en un tramo entra tanto material como el que sale, aproximadamente.
- Cauce en equilibrio dinámico, no necesariamente en “régimen” (estable).

- No se ha distinguido en el presente estudio entre condiciones de Suministro Limitado, Transporte Limitado y Transporte Parcialmente Limitado.

Se propone una relación única entre esas dos variables, $\alpha = f(\phi_{st})$, y se verifica la bondad del ajuste mediante la comparación de la predicciones con mediciones propias en el río Colorado (Prov. de Bs. As y La Pampa) y del río Paraná en Villa Urquiza, estas últimas suministradas por M. Amsler de la FICH – UNL. En ambos casos se puede identificar el transporte sólido por unidad de ancho, para distintas situaciones a través de la sección transversal.

Coincidentemente, Molina y Wu (1998) presentaron una modificación de la fórmula de Engelund – Hansen que también considera la variación de α pero en función de u^*/ω para considerar el porcentaje del sedimento en suspensión y del desvío estándar σ_g que tiene en cuenta la dispersión de la distribución granulométrica. La expresión de Molinas y Wu obliga al ajuste de 4 coeficientes, contra ninguno de la propuesta en la presente contribución.

FÓRMULA ORIGINAL DE ENGELUND – HANSEN (1967)

Tan como se ha mencionado, la fórmula de transporte original de Engelund – Hansen fue calibrada con datos de Guy et al (1966), obtenidos en un gran canal sedimentológico de laboratorio de la State University of Colorado (Fort Collins). La fórmula es la siguiente:

$$\phi_{st} = 0,1 \frac{1}{f} \tau_*^{5/2} \quad (1)$$

donde:

$$\phi_{st} = \frac{g_{st}}{d^{3/2} \sqrt{(s-1)g}}$$

ϕ_{st} es la “función de transporte” total de material de fondo

$$f = \frac{2}{C^2} = 2 \left(\frac{u_*}{U} \right)^2$$

Por la naturaleza de los ensayos de laboratorio utilizados para su calibración, esa fórmula puede considerarse como representativa de un “transporte en equilibrio”. Deben remarcarse las limitaciones mencionadas previamente: incluye un gran número de casos de cauces con márgenes rígidas (las paredes del canal de laboratorio), lo cual le quita un grado de libertad al sistema físico.

BASES DE DATOS

Además de la base de datos de Guy et al, se ha recurrido a las bases de datos de canales de laboratorio de Pratt y Nordin obtenidos de la publicación de Brownlie (1981), y a los sistemas de canales del Punjab (“ACOP Canals, Mahmood et al, 1987) y del All – American Canals (Brownlie, 1981). Los canales del Punjab corresponden a canales estables en los que se basó la “Teoría de Régimen”, en cambio el sistema All – American Canals fue diseñado mediante el procedimiento de Lane (1955) para el cálculo de canales estables en condiciones de iniciación del movimiento de las partículas de la margen y, en lo posible, del fondo. Como es de esperar todos los canales de

laboratorio transportan un bajo gasto líquido, no más de $2 \text{ m}^3/\text{s}$, y los canales artificiales cubren mayores rangos de caudal, hasta $500 \text{ m}^3/\text{s}$.

Para la CALIBRACIÓN de α se utilizaron las siguientes bases de datos:

- Datos de canales de laboratorio, hasta $2 \text{ m}^3/\text{s}$:
Guy et al (1961) ensayos en la State University of Colorado.
Pratt y Nordin (Brownlie (1981)
- Datos de canales artificiales, hasta $500 \text{ m}^3/\text{s}$:
 - Canales del Punjab (“ACOP Canals, Mahmood et al, 1987), diseñados en base a la Teoría de Régimen,
 - All – American Canals (Brownlie, 1981) diseñados mediante el procedimiento de Lane (1955) para canales estables.

En tanto que para la VERIFICACIÓN se recurrió a registros de algunos ríos argentinos:

- Datos propios del río Colorado (Prov. de Buenos Aires, Arg.)
- Datos del río Paraná en Villa Urquiza (gentileza del Ing. Mario Amsler de la U. Nacional del Litoral en de Santa Fe, Argentina).

ADAPTACIÓN DE LA FÓRMULA DE ENGELUND - HANSEN

Para analizar cual hubiera sido el valor de α correspondiente a cada dato, se recalculó α despejándolo de la fórmula de Engelund – Hansen a partir de los datos medidos. La aplicación de esa fórmula con $\alpha = 0,1$ es adecuado para los registros de canales de laboratorio, aunque con una gran dispersión. En cambio, para los canales del All – American Canals System y los canales ACOP los valores de α se incrementan con el gasto sólido adimensional denominado “función de transporte”:

$$\alpha = f(\phi_{Vt}) = f\left(\frac{g_{st} (m^2 / s)}{d_s^{3/2} \sqrt{g (s-1)}}\right) \quad (2)$$

En la Fig. 1 se muestran los datos utilizados en la calibración de α . De primera instancia se advierten dos tendencias: una en correspondencia con la calibración original de Engelund y Hansen con lo cual resulta $\alpha = 0,1$ y otra de α creciente en correspondencia con los datos de canales artificiales.

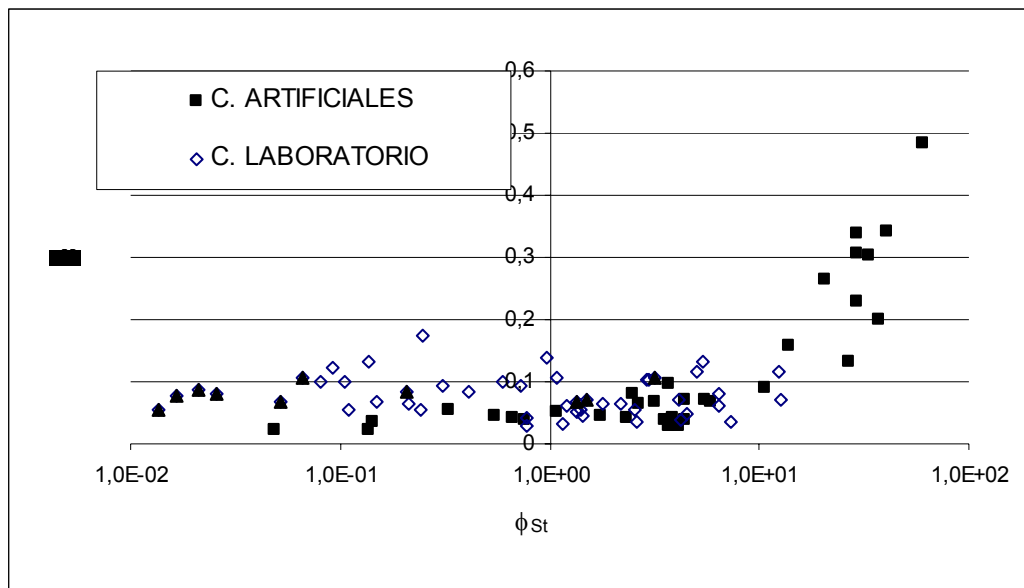


Figura 1 – Gráfico de α respecto a la función de transporte ϕ_{St} con la totalidad de los datos de calibración listados previamente (canales de laboratorio y artificiales).

El número de datos de canales de laboratorio se reduce drásticamente cuando se les aplica el criterio de H. H Chang que distingue entre una condición de márgenes rígidas (dos grados de libertad: tirante y pendiente) y datos que representan lecho y márgenes aluviales (tres grados de libertad: tirante, pendiente y fondo). Sólo estos últimos datos corresponden a cauces aluviales “completos” y se los conserva en la representación de la Fig. 2.

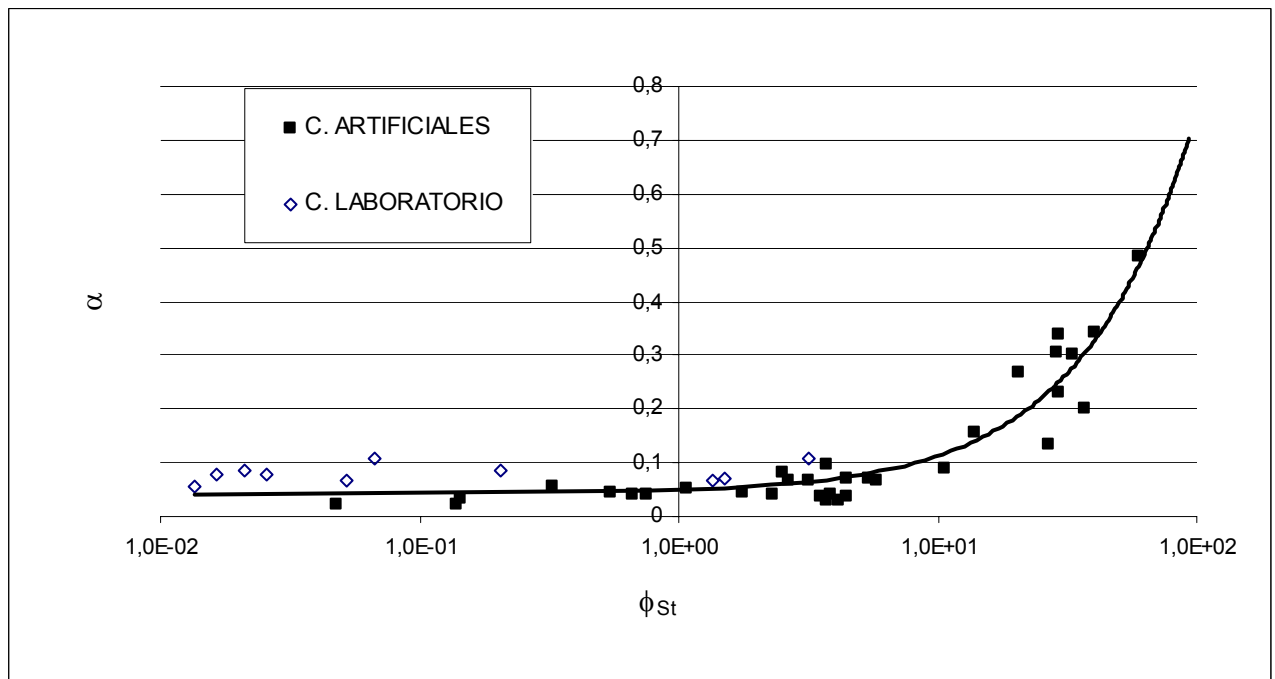


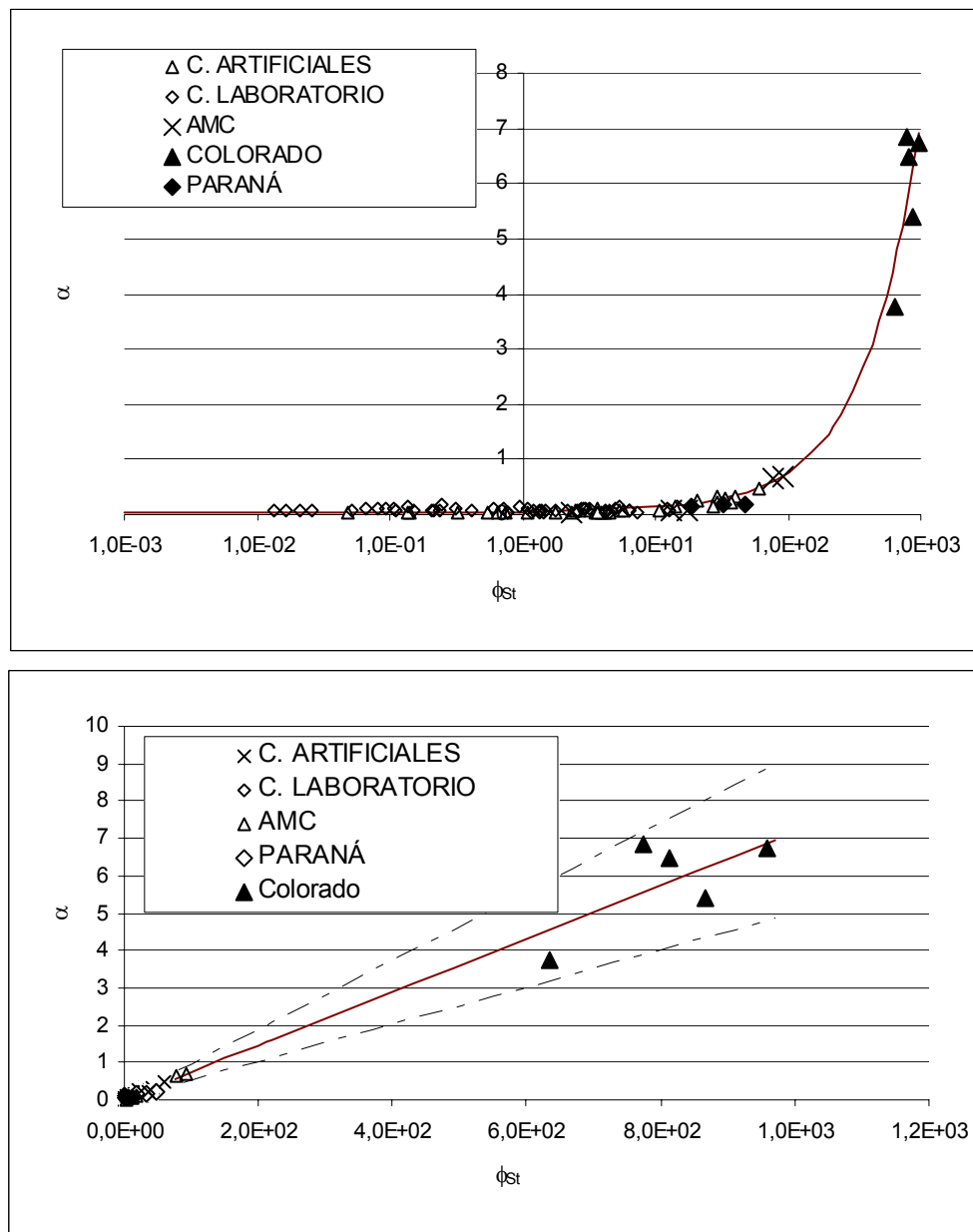
Figura 2 – Coeficiente α respecto a la función de transporte, ϕ_{St} para datos de calibración depurados, para cauces con 3 grados de libertad.

Evidentemente, los puntos de la Fig. 2 se alinean de modo tal que es posible trazar una curva de ajuste que responde a la fórmula:

$$\alpha = 0,007 \phi_{st} + 0,04 \quad (3)$$

Se advierte que los datos de Guy et al que responden a la condición de lecho y márgenes aluviales se ajusta por debajo del valor original de $\alpha = 0,1$.

Corresponde finalmente efectuar una verificación de la curva $\alpha = f(\phi_{st})$ con los datos de los ríos Paraná en Villa Urquiza y Colorado (entre provincias de Buenos Aires y La Pampa). El resultado se muestra en la Fig. 3-a y 3-b.



Figuras 3 – Verificación de la relación $\alpha = f(\phi_{st})$, Ec. 3 con datos de los ríos Paraná en Villa Urquiza y Colorado entre las Prov. de Buenos Aires y La Pampa.

(Fig3-a: coordenadas aritmética-logarítmica, Fig3-b: coordenada aritmética-aritmética.)

En la Fig. 3-b se ha representado una franja de $\pm 30\%$ en torno a la curva de la Ec. 3. Es notable advertir que los registros de verificación, con valores muy superiores de α y ϕ_{st} respecto a los datos de canales de laboratorio y canales artificiales también caen dentro de la franja de $\pm 30\%$ en torno a la Ec. 3. Ello no sería mucha sorpresa respecto al río Paraná en Villa Urquiza, en donde un trabajo previo de Pujol y Amsler (1984) muestra cómo esos registros resultan bastante bien aproximados por el Predictor Q/H de Engelund (1966).

Adviértase que cuando se incluye la ecuación encontrada para α en la fórmula de Engelund – Hansen es posible calcular valores de carga total de material de fondo con una precisión muy cercana a la exigida en otros cálculos de la Ingeniería Fluvial. Aunque no se encuentra en los niveles de precisión de los Predictores Q/H, este resultado despierta expectativas de nuevos perfeccionamientos. Por motivos prácticos, se considera conveniente buscar una vinculación de α con el diámetro adimensional (van Rijn) o a alguna otra combinación que incluya a las propiedades del agua y sedimento, de lo contrario se deberá recurrir a un proceso de aproximaciones sucesivas para hallar el valor de α en los cálculos de la carga sólida total.

CONCLUSIONES

- Las mejores fórmulas de transporte de sedimentos calculan valores que en un 70 % a 80 % de los casos se dispersan entre el doble y la mitad respecto a los medidos. Esa dispersión entorpece sus aplicaciones técnicas.
- Se ha realizado una investigación exploratoria con la fórmula de Engelund – Hansen haciendo variar su coeficiente α para que mejor aproxime los datos de canales de laboratorio y artificiales.
- Se propone la expresión de la Ec. 3 que se acerca a 0,08 para canales de laboratorio (el valor de la fórmula original es 0,1), en tanto que para canales de laboratorio incrementa rápidamente su valor.
- Esa relación ubica la mayoría de los valores calculados dentro de $\pm 30\%$ respecto de los medidos. • La verificación con datos de algunos ríos aluviales argentinos ha sido satisfactoria: el río Parana en el tramo Villa y del río Colorado (entre las provincias de Buenos Aires y La Pampa) ostentan un aproximación muy notable a la Ec. 3, más aun si se piensa que sus valores de α y ϕ_{st} son varias veces superiores a los exhibidos por los canales de laboratorio y canales artificiales.
- En el futuro se intentará extender las predicciones a otros cauces aluviales y se estudiará la adaptación de otras fórmulas de transporte.

NOTACION

a	distancia desde lecho a partir de la cual se registra sedimento en suspensión [m]
A	superficie de la sección transversal al cauce [m ²]
d_s	tamaño representativo de grano, respecto al transporte [m]
g	aceleración de la gravedad terrestre, 9,81 [m/s ²]
h	tirante (profundidad) de un cauce [m]
g_{sf}	carga de fondo de material del lecho por unidad de ancho [m ³ /s.m o kg/s.m]
g_{ss}	carga en suspensión de material del lecho por unidad de ancho [m ³ /s.m o kg/s.m]
g_{st}	carga total de material del lecho por unidad de ancho [m ³ /s.m o kg/s.m]
s	gravedad específica del sedimento sumergido
U	velocidad media de la corriente Q/A [m/s]
u^*	velocidad de corte [m/s]
y	distancia al fondo de un cauce [m]
ϕ_{sf}	función de transporte por el fondo de material del lecho, adimensional
ϕ_{ss}	función de transporte en suspensión de material del lecho, adimensional
ϕ_{st}	función de transporte total de material del lecho, adimensional
γ	peso específico del agua [N/m ³]
γ_s	peso específico del sedimento [N/m ³]
ρ	densidad específica del agua [kg/m ³]
ρ_s	densidad específica del sedimento [kg/m ³]
τ_o	tensión de corte aplicada por el agua en el lecho [N/m ²]
τ_{crit}	tensión de corte crítica de iniciación del movimiento según Shields [N/m ²]
$\tau_* = \frac{\tau_o}{(\gamma_s - \gamma)d_s}$	tensión de corte adimensional, aplicada por el agua al lecho o crítica
μ	viscosidad del agua, [kg/m s]
ν	viscosidad cinemática del agua, [m ² /s]
ω	velocidad terminal de una partícula de sedimento [m/s]

BIBLIOGRAFÍA

- Basile, P. A. y Peviani, M. A.** (1998): “*Transporte de sedimentos incoherentes heterogéneos y número de clases granulométricas necesarias para el cálculo*”. Cuadernos del Curiham, Vol. 4, 1er semestre, pp 83-96. Rosario, Argentina.
- Bravo-Espinosa, M., Osterkamp, W. R. y Lopes, V. L** (2003): “*Bedload transport in alluvial channels*”. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 129, No. 10, Octubre.
- Brownlie, W. R.** (1981): Prediction of flow depth and sediment discharge in open channels. Report No. KH-R-43A, W. M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources. California Institute of Technology, Pasadena, Calif.
- Chang, H. H.** (1998): Fluvial Processes in River Engineering. Krieger Publishing Company. Malabar, Florida. Primera edición: 1988.
- Chang, H. H.** (1986): “*River channel changes: Adjustments of equilibrium*”. J. of Hydraulic Enggr., ASCE, 112(1), pp. 43-55, January.
- Engelund, F. y Hansen, E.** (1967): A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams. Teknisk Volag, Copenhagen, Denmark.
- Guy, H. P., Simons, D. B y Richardson, E. V.** (1966): Summary of alluvial channel data from flume experiments. Professional Paper N° 462-I, U. S. Geological Survey.
- Lane, E. W.** (1955): “*Design of Stable Channels*”. Transactions, ASCE, Vol. 120, Paper No. 2776, pp. 1234-1279.
- Mahmood, K. et al** (1987): ACOP Canals Equilibrium Runs – Computerized Data Base. International Water Resources Institute, The George Washington University, Washington D. C.
- Molinas, A. y W. Baosheng** (1998): “*Effect os Size Gradation on Transport of Sediment Mixtures*”. Journal of Hidraulic Engineering, ASCE, Vol. 124, No. 8, August.
- Van Rijn, L. C.** (1984): “*Sediment Transport, Part I: Bed Load Transport*”. Journal of Hidráulic Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 10, October.
- Van Rijn, L. C.** (1984): “*Sediment Transport, Part II: Suspended Load Transport*”. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 11, November.
- Yang y Lim** (2003): “*Total Load Transport Formula for Flow in Alluvial Channels*”. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 129, No. 1, January.