

# Optimización del uso de modelos de transporte de sedimentos en canales y ríos mediante análisis comparativo

## Optimized, analytically-compared use of sediment transport models in channels and rivers

Machado\*, Daniel; Aguirre-Pe, Julián; Moncada, Alix y Olivero, María

Centro de Investigaciones Hidráulicas y de Mecánica de los Fluidos CHIDRA, Facultad de Ingeniería, ULA,  
Mérida 5101, Venezuela

\*danielm@ula.ve

Recibido: 25-11-2005

Revisado: 15-03-2007

### Resumen

Existen muchos fenómenos mecánicos complejos, uno de ellos es el transporte de sedimento por corrientes de agua, en él influyen múltiples variables. Entre éstas se distinguen propiedades del cauce, del sedimento y del flujo. Existe gran diversidad de modelos de transporte, al menos 50, por tanto, seleccionar el más adecuado al momento de resolver problemas prácticos puede resultar difícil. Buscando optimizar el uso de algunos de ellos se evaluaron 15 modelos de transporte de sedimento del fondo, utilizando un banco de datos de más de 4000 flujos de 34 canales de laboratorio y 11 ríos. Se empleó un nuevo indicador de bondad, el índice de error o de exactitud, IE, para comparar los modelos. Para el banco de datos depurado, los modelos con mejor comportamiento fueron los de Engelund y Hansen (1967) y Aguirre-Pe et al. (2000), con valores promedio  $IE = 2,79$  y  $6,17$ , respectivamente. Se determinaron rangos de aplicabilidad de los modelos en función de: diámetro medio de sedimentos, pendiente del cauce, caudal por unidad de ancho, radio hidráulico y velocidad media de flujo. La influencia de estas cinco variables fue considerada mediante el parámetro adimensional número de Froude densimétrico de las partículas modificado para considerar la pendiente,  $F_s^*$ . Al determinar los rangos de aplicabilidad de los modelos en base a éste se obtuvo que los modelos de Engelund y Hansen (1967) y Karim (1998) presentaron los rangos más amplios. En base a los rangos de cada modelo para  $F_s^*$  se desarrolló un método, incluyendo una versión software, para la selección de los modelos más apropiados para estimar el transporte del fondo con fines prácticos. El método desarrollado mostró eficiencia del 69% al verificarse con una segunda muestra de 10 canales y ríos. Se podría mejorar el método, por lo que sería conveniente continuar investigaciones en el área.

**Palabras claves:** Transporte de sedimento, ríos, canales, modelos

### Abstract

Many complex mechanical phenomena are produced in nature. One of them is sediment transport by water streams. Three types of variables influence stream transport, these are bed properties, sediment properties and flow conditions. More than 50 models have been developed to estimate sediment transport. Selecting the most suitable model for a particular set of variables may be a difficult task. Trying to optimize the use of some of the most significant models, 15 bed sediment transport formulations were evaluated using data from more than 4000 flows, 34 of them from laboratory channels and 11 from rivers. In order to compare different sediment transport models, a new fitness index, the exactitude index IE, is introduced. For cleaned-up data the best models were those by Engelund and Hansen (1967) and by Aguirre-Pe et al. (2000) with mean values of  $IE = 2.79$  and  $6.17$  respectively. Ranks of applicability of different models were obtained as functions of mean sediment diameter, longitudinal bed slope, unit discharge, hydraulic radius and mean flow velocity. Influence of these five variables was considered through the dimensionless Froude number of the particles modified to consider slope in  $F_s^*$ . The widest applicability of models, as functions of densimetric particle Froude numbers are found to be Engelund and Hansen (1967) and Karim (1998) formulations. Taking into consideration ranks of  $F_s^*$  in each model, a method was developed to select the most appropriate algorithm to estimate bed sediment transport for practical purposes. Software for computer so-

lutions is given. The developed method gave 69% efficiency when verified with a second sample of 10 laboratory channels and rivers. The method could be improved by analyzing more widely the number of models considered

**Key words:** Sediment transport, rivers, channels, models

## 1 Introducción

Puede definirse al transporte de sedimento, muy ampliamente, como el fenómeno de arrastre de partículas de diferentes características que se da de diversas maneras en una corriente de agua (Einstein, 1950). Este ha sido un tópico de múltiples estudios de ingeniería hidráulica y mecánica de fluidos durante el último siglo. A pesar de todas las investigaciones y teorías desarrolladas, sin duda, el transporte de sedimento, la forma como se origina, evoluciona y finaliza, sigue siendo uno de los fenómenos más estudiados por la mecánica de fluidos. Tanto es así que, debido a su complejidad, aún no se ha logrado establecer un principio ni mucho menos una ley que lo describa totalmente en cualquier situación (Maza y García, 1996).

Variables de distintas índoles determinan la cantidad de sedimento que puede acarrear una corriente. Entre ellas se distinguen propiedades del cauce, de los sedimento y del flujo. Según la naturaleza del material y la manera en que es transportado, se reconocen distintos tipos de transporte. Así, para el material del lecho de un cauce usualmente se presentan: transporte por el fondo, correspondiente principalmente a material granular, arrastrado sobre el lecho del cauce, rodando o a saltos, en una capa de sedimento; y transporte en suspensión, correspondiente a material fino que presenta un gradiente de concentración en función de la profundidad (Einstein, 1950). Para ciertas condiciones, el transporte del material del lecho puede ocurrir como transporte de fondo en una capa del orden de un diámetro representativo del sedimento, y el mismo material puede ser suspendido, además de las fracciones más finas del material del lecho.

El acarreo de materiales por ríos y canales tiene implicaciones en condiciones tanto naturales como de intervención antrópica. Embalses artificiales ven reducida su vida útil por la acumulación de sedimento (Aguirre-Pe, 1980). La estabilidad del cauce de ríos depende en parte de su capacidad de transporte. Comunidades asentadas en las márgenes de ríos se ven afectadas por el arranque y movilización de materiales, produciéndose en casos extremos catástrofes como, crecidas, flujos de lodos e inundaciones (Loftin, 1999). Los materiales depositados en lagunas, mares y océanos, transforman dichos ecosistemas. Comunidades bentónicas animales y vegetales son afectadas por el transporte del fondo (Chacón, 2004). El transporte influye en la formación de suelos. Los sedimentos que logran escapar a filtros pueden ingresar a redes de canales y tuberías afectando su funcionamiento y el de instrumentos y maquinarias instalados en ellas (Loftin, 1999). En fin, son innumerables las razones para estudiar el transporte de sedimento.

La medición del transporte de sedimento resulta, en la mayoría de los casos, muy complicada y costosa. Esto ha conducido al desarrollo de modelos mecánico-matemáticos que sirven para estimar el transporte de sedimento por medio de relaciones funcionales (ASCE, 1975). Existen más de 50 de estos modelos (Maza y García, 1996). Por ello, al enfrentarse con un problema práctico, seleccionar el más conveniente se convierte en otro problema. Con la finalidad de intentar disminuir estas dificultades, mediante la optimización de la selección y uso de modelos de transporte, en este trabajo se eligieron 15 modelos de transporte del material de fondo para determinar comparativamente sus aplicabilidades, en cuanto a cinco características consideradas como determinantes en el fenómeno de transporte y que adicionalmente son de relativa sencilla medición, dichas características fueron: pendiente longitudinal del cauce, diámetro medio del sedimento, caudal por unidad de ancho, radio hidráulico y velocidad media de flujo. La influencia de estas cinco variables fue incluida dentro de parámetros adimensionales que facilitan el uso de los resultados del trabajo. La temperatura no se incluyó entre las variables que determinan la velocidad de caída de las partículas.

## 2 Modelos de transporte de sedimento analizados

A pesar de la gran cantidad de modelos de transporte de sedimento desarrollados hasta ahora, ninguno es universal como para ser aplicado en todos los casos, pues todos han sido derivados para condiciones particulares (Aguirre-Pe et al., 2003). Al utilizar un estimador inadecuado para las características de un río o canal se estaría incurriendo en errores que podrían traer consecuencias graves. En el presente trabajo, se decidió analizar modelos que sirven para estimar el transporte de material del fondo, debido a que este material y no el de lavado es el que causa la mayoría de los problemas en proyectos ingenieriles (Aguirre-Pe, 1980). Los 15 modelos seleccionados toman en cuenta lo siguiente:

Se eligieron tanto modelos ampliamente difundidos como de menor difusión, algunos han sido aprobados y otros criticados al momento de su publicación. Se seleccionaron tanto modelos tradicionales (con más de 50 años desde su planteamiento), como modelos novedosos (propuestos en los últimos 10 años). El origen de los modelos es variado, si bien la mayoría de los modelos considerados ha sido producida por investigadores occidentales, en oriente, especialmente en Japón, se han desarrollado otros, de los cuales se incluyen en este trabajo una pequeña muestra con intención de su comparación y difusión. Respecto al tipo de estimadores, se seleccionaron modelos basados en diferencias de esfuerzos cortantes, tipo Du Boys, en diferencias de caudales, tipo Schoklitsch, respecto a valores críticos, modelos con

bases estadísticas, tipo Einstein, así como modelos basados en las características densimétricas del sedimento, tipo número de Froude densimétrico de las partículas.

Existe una amplia gama de modelos de transporte de sedimento de material del lecho. En muchos casos el transporte se da exclusivamente por el fondo, o en su defecto la proporción de materiales transportados en suspensión es pequeña frente a la transportada por el fondo, especialmente en ríos y canales de pendientes considerables (Ramírez, 2002). Sin embargo, se ha encontrado, que modelos que determinan la carga de fondo, se acercan más al transporte

real en ríos y canales que algunos modelos que determinan la carga total (carga de fondo más carga de suspensión) (Aguirre-Pe et al., 2004). Es por eso que se decidió incluir modelos de transporte de material del lecho, total y por el fondo, para confrontarlos entre si y observar el comportamiento de dichos modelos en un amplio banco de datos.

En la Tabla 1 se presentan los modelos de transporte de sedimento elegidos en este trabajo, según las consideraciones anteriores. Los modelos se encuentran agrupados según el tipo de transporte que determinan y las bases mecánicas sobre las cuales se fundamentan.

Tabla 1. Modelos estimadores del transporte de sedimento del fondo, clasificados según el tipo de transporte que determinan y las bases mecánicas sobre las que lo hacen.

Tipo de estimadores	Tipo de transporte estimado	
	Transporte por el fondo	Transporte total de material del fondo
Tipo Du Boys (basado en esfuerzos cortantes)	Meyer-Peter y Müller, 1948 Frijlink, 1962 Yalin, 1963 Parker, 1990 Cheng, 2002	Engelund y Hansen, 1967 Ackers y White, 1973 Smart y Jaeggi, 1983 Pacheco-Ceballos, 1989
Tipo Schoklitsch (basados en caudales)	Mizuyama y Shimohigashi, 1985 Bathurst et al., 1987	---
Tipo Einstein (bases estadísticas)	Einstein y Brown, 1950 Sato, Kikkawa y Ashida, 1958	---
Número de Froude densimétrico de las partículas	Aguirre-Pe et al., 2000	Karim, 1998

El transporte de sedimento, expresado en unidades de volumen por unidad de tiempo y de ancho ( $q_s$ ), fue expresado en forma adimensional ( $\Phi^*$ ) por Einstein (1950) según la expresión:

$$\Phi^* = \frac{q_s}{D_{50} [g \Delta D_{50}]^{3/2}} \quad (1)$$

donde:  $D_{50}$  = diámetro medio del sedimento,  $\Delta$  = peso específico relativo sumergido (igual a 1,65 para materiales de peso específico  $\gamma_s = 2650 \text{ Kg/m}^3$  sumergidos en agua, cuyo peso específico se puede tomar como  $\gamma = 1000 \text{ Kg/m}^3$ ) y la aceleración de gravedad ( $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ).

Según esta definición son presentadas, en forma adimensional, las ecuaciones de transporte de los modelos elegidos en este trabajo, aunque algunas de ellas no fueron definidas adimensionalmente por sus autores.

El primer estimador seleccionado fue el de Meyer-Peter y Müller (1948), el cual forma parte del grupo conocido como ecuaciones tipo Du Boys, que definen el transporte en función de una relación de esfuerzos cortantes. La ecuación en forma adimensional se puede escribir como:

$$\Phi^* = 8(\lambda \tau^* - \tau_c^*)^{3/2} \quad (2)$$

donde:  $\lambda$  = parámetro numérico en función de las condiciones de flujo y sedimento,  $\tau^*$  = parámetro de Shields y  $\tau_c^*$  representa el valor crítico de  $\tau^*$  para la iniciación del movimiento de las partículas ( $\tau_c^* = 0,047$ ).

El método conocido como Einstein-Brown, publicado por el segundo autor (Brown, 1950), expresa el transporte por el fondo como función de la velocidad de caída de las partículas y las características del flujo y sedimento:

$$\Phi^* = 40 F_1 \tau^{*3} \quad (3)$$

en la cual  $F_1$  es un factor, propuesto por Rubey, que considera el efecto de la velocidad de caída de las partículas.

El procedimiento de Sato, Kikkawa y Ashida (1958), define al transporte por el fondo como:

$$\Phi^* = \left( \frac{1}{40n} \right) \tau_0 u_* f \left( \frac{\tau_c}{\tau_0} \right) \frac{1}{\gamma_s \sqrt{g \Delta D_{50}^3}} \quad \text{Si } n \leq 0,025 \quad (4)$$

$$\Phi^* = \tau_0 u_* f \left( \frac{\tau_c}{\tau_0} \right) \frac{1}{\gamma_s \sqrt{g \Delta D_{50}^3}} \quad \text{Si } n > 0,025$$

donde:  $n$  = coeficiente de rugosidad de Manning en forma adimensional,  $u_*$  = velocidad de corte,  $\tau_0$  y  $\tau_c$  = esfuerzo cortante y su valor crítico.

El modelo de Frijlink (1962), para transporte por el fondo, de forma exponencial, tiene por ecuación:

$$\Phi^* = 5\Psi_F^{*-1/2} e^{-0,27\Psi_F^*} \quad (5)$$

en la que  $\Psi_F^*$  = intensidad de corte, inversa del esfuerzo cortante adimensional.

El quinto método incluido, también estima la carga de fondo, fue el de Yalin (1963), cuya expresión es:

$$\Phi^* = \frac{g_b}{\gamma\sqrt{(g\Delta D_{50}^3)}} \quad (6)$$

donde  $g_b$  es el transporte expresado en peso por unidad de ancho y tiempo, el subíndice b indica que para su cálculo se toma en cuenta el efecto de las paredes y el fondo. Yalin define ese gasto como:

$$g_b = C_3 S_y D_{50} u_* (\gamma_s - \gamma) \left[ 1 - \frac{1}{a_y S_y} \ln(1 + a_y S_y) \right] \quad (7)$$

donde  $C_3$  es una constante igual a 0,635,  $S_y$  = relación entre el parámetro de Shields y su valor crítico y  $a_y$  = otra relación de esfuerzos cortantes.

El modelo de Engelund y Hansen (1967), sirve para estimar el transporte total de material del fondo. Su expresión adimensional, donde  $f_c$  = factor de fricción, puede escribirse de la siguiente manera:

$$\Phi^* = \frac{0,1\tau^{*1/2}}{f_c} \quad (8)$$

Ackers y White (1973) plantearon, para el cálculo de transporte total la ecuación:

$$\Phi^* = \frac{0,025}{D_{50} [g(\Delta - 1)D_{35}]^{1/2}} q \frac{D_{35}}{d} \left( \frac{P^*}{0,17} - 1 \right)^{3/2} \quad (9)$$

donde:  $q$  es el caudal por unidad de ancho,  $D_{35}$  representa el diámetros del 35% de material pasante y  $P^*$  tiene su propia expresión de cálculo.

La relación funcional de Smart y Jaeggi (1983), para el transporte del fondo, viene dada por la expresión:

$$\Phi^* = 4 \left( \frac{D_{90}}{D_{30}} \right)^{0,2} S^{0,6} C^* \tau^{*0,5} \frac{d}{r_b} (\tau^* - \tau_{cj}^*) \quad (10)$$

en la cual  $D_{90}$  y  $D_{30}$  representan los diámetros del 90 y 30% de material pasante, respectivamente,  $S$  es la pendiente,  $C^*$  el coeficiente adimensional de Chézy,  $d$  es la profundidad,  $r_b$  es el radio hidráulico y  $\tau_{cj}^*$  es el esfuerzo cortante crítico, función del parámetro crítico de Shields  $\tau_c^*$ , la pendiente y el ángulo de reposo del material.

En noveno lugar se seleccionó la ecuación, en función del caudal, de los autores japoneses Mizuyama y Shimohigashi (1985), que puede escribirse de manera reducida como:

$$\Phi^* = A' \frac{qS^2}{(g\Delta D_{50}^3)^{1/2} \Delta^2} \quad (11)$$

en la cual,  $A'$  toma el valor constante de 20. Dado que esta relación funcional no ha sido muy difundida ni utilizada (al menos en occidente), se decidió incluirla en este trabajo.

Bathurst et al. (1987) sugieren la ecuación de Schoklitsch (1962) como una de las de mejor aproximación a los valores reales de transporte por el fondo en cauces de alta pendiente. En la Ec. (12),  $q_c$  = caudal crítico para la iniciación del movimiento de las partículas de sedimento,

$$\Phi^* = \frac{2,5S^{3/2}}{(\Delta + 1)(g\Delta D_{50}^3)^{1/2}} (q - q_c) \quad (12)$$

El método de Pacheco-Ceballos (1989), para el transporte total de material del fondo, tiene el acierto de incluir la velocidad de flujo en el fondo  $u_b$ :

$$\Phi^* = \frac{2 \left( \frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right)^{3/2} u_b S d}{\Delta t g(\alpha)(g\Delta D_{50}) r_b} \quad (13)$$

donde:  $\alpha$  = ángulo de reposo del material,  $\tau$  y  $\tau_c$  son el esfuerzo cortante y su valor crítico respectivamente.

Parker (1990) plantea un modelo para la estimación del transporte por el fondo de material granular:

$$\Phi^* = W^* \tau^{*3/2} \quad (14)$$

donde  $W^*$ , velocidad de caída adimensional, se calcula mediante una función por partes.

Karim (1998) propuso un modelo para el transporte total de material del lecho, en función del número de Froude densimétrico de las partículas  $F^*$ , la velocidad de corte  $u_*$  y la velocidad de caída de las partículas  $W$ :

$$\Phi^* = 0,00139 F^{*2,97} \left( \frac{u_*}{W} \right)^{1,47} \quad (15)$$

Otro modelo basado en el número de Froude densimétrico de las partículas es el de Aguirre-Pe et al. (2000). Determina el transporte por el fondo, tomando en cuenta la relación de Chézy ( $C^*$ ) entre la velocidad de corte y la velocidad media del flujo y la pendiente:

$$\Phi^* = 1,5 \frac{F^{*6} S^{1/2}}{C^{*4}} \quad (16)$$

Finalmente, uno de los estimadores de más reciente publicación, el modelo de Cheng (2002) para el transporte por el fondo, se diferencia de casi todos los anteriores en tener una forma exponencial:

$$\Phi^* = 13\tau^{*3/2} e^{\left(\frac{-0,05}{\tau^{*3/2}}\right)} \quad (17)$$

### 3 Materiales y métodos

Se determinó el transporte de sedimentos por medio de las ecuaciones correspondientes a los 15 modelos elegidos para un amplio banco de datos, tomados de recopilaciones reconocidas de este tipo de datos (Brownlie, 1981 y Hydra-Tech. Inc. 1998). El banco de datos incluyó más de 4000 flujos provenientes de 34 canales de laboratorios y 11 ríos. Para cada flujo se procesaron valores de caudal, anchura de superficie libre, ya que no fue posible disponer del ancho del lecho activo, profundidad de agua, pendiente longitudinal del cauce, diámetro medio del sedimento, peso específico del sedimento, concentración del sedimento en peso por volumen, para obtener el transporte de sedimentos en forma adimensional según cada modelo, así como el valor del transporte adimensional experimental (considerado como el valor real).

Las características hidráulicas consideradas como determinantes en el fenómeno de transporte, variaron en el banco de datos dentro de los siguientes rangos: pendiente  $S$ : 0,00001 – 0,25; diámetro medio de los sedimento  $D_{50}$  (mm): 0,079 – 28,65; radio hidráulico  $r_b$  (m): 0,0077 – 17,11; caudal por unidad de ancho  $q$  (m<sup>3</sup>/s m): 0,0022 – 39,82 y velocidad media del flujo  $V$  (m/s): 0,19 – 2,33.

Se compararon los valores de transporte estimados con los valores de transporte reales. Para ello se propuso un índice de exactitud o error, IE, como indicador de bondad de los modelos de transporte, el cual puede tomar valores desde cero, cuando el valor calculado es igual al valor medido, hasta valores muy altos, cada vez mayores a medida que el valor estimado se aleja más del real. Dicho índice (Ec. 18) se definió en función del error medio normalizado MNE y del factor medio de predicción MPF, ambos parámetros utilizados en otros trabajos para la comparación de modelos de transporte (Karim, 1998 y Aguirre-Pe et al., 2003)

$$IE = \frac{MNE}{100} MPF \quad (18)$$

Según los valores promedio de IE se determinaron las jerarquías de aplicabilidad de los 15 modelos seleccionados para los bancos de datos depurados de ríos y canales de laboratorio de manera independiente y para ambos tipos de fuentes de datos de manera combinada. Se determinaron rangos de aplicabilidad de los modelos en función de las cinco características hidráulicas fundamentales en el fenómeno de transporte y de sencilla medición ya mencionadas. Esto se hizo mediante dos criterios: uno de “excelente predictibilidad”, en el que se incluyeron para determinar los rangos de aplicabilidad de cada modelo únicamente las fuentes de datos en las que los modelos presentaron valores promedios de  $IE \leq 1$ ; y otro de “jerarquía”, en el que se incluyeron únicamente las fuentes de datos para las que cada modelo figuró entre los tres primeros puestos de la jerarquía de exactitud en base a IE. Se definieron y calcularon dos parámetros adimensionales que incluyeran la influencia de las cinco características hidráulicas mencionadas.

Los parámetros definidos fueron un número de Froude ( $F_S^*$ ) y otro de Reynolds ( $R_S^*$ ), ambos modificados para considerar la pendiente del cauce y el diámetro medio del sedimento. Interceptando los dos criterios considerados (“excelente predictibilidad” y “jerarquía”) se determinaron rangos de aplicabilidad de alta confianza de los modelos en función del número de Froude modificado. Esto permitió desarrollar un método práctico y sencillo (incluyendo una versión software) para la selección de modelos de transporte de sedimentos en ríos y canales.

### 4 Resultados y discusión

Para el banco de datos depurado, los modelos de transporte que resultaron más exactos, en el caso de canales de laboratorio, fueron los de Engelund y Hansen (1967) y Aguirre-Pe et al. (2000) con valores de IE promedio de 3,29 y 5,51, respectivamente; en el caso de ríos, Engelund y Hansen (1967) y Karim (1998) con IE promedio de 1,33 y 1,66, respectivamente; y para la combinación de ambos tipos de fuentes de datos, Engelund y Hansen (1967) y Aguirre-Pe et al. (2000) con IE promedio de 2,79 y 6,17, respectivamente. En la Tabla 2 se puede observar que se encontraron jerarquías de aplicabilidad de modelos similares para ríos y canales de laboratorio, aunque con valores menores de IE en el caso de los ríos, posiblemente debido a la cantidad de datos analizados, lo cual sugiere que los modelos de transporte pueden, al menos de manera general, ser usados en ríos y canales indiferentemente. Un análisis matemático de desigualdades y su comparación con resultados empíricos sugieren  $IE = 2$  como límite superior a considerar para obtener resultados de alta confiabilidad.

La Fig. 1 muestra en forma de barras los valores de IE de los 15 modelos para una muestra de 4 canales de laboratorio y 2 ríos. Se puede notar que de los modelos de transporte analizados algunos presentaron IE menores o cercanos a 2 de manera consecuente, tal fue el caso en la Fig. 1 de los

modelos de Engelund y Hansen (1967), Aguirre-Pe et al. (2000), Karim (1998) y Sato, Kikkawa y Ashida (1958), lo cual indica que esos modelos son de alta confiabilidad para los canales y ríos de dicha muestra.

Tabla 2. Jerarquías de aplicabilidad de modelos estimadores de transporte de sedimento en canales de laboratorio y ríos según el índice de exactitud (IE) promedio para bancos de datos depurados, tomados de Brownlie, 1981 y Hydraul-Tech. Inc. 1998.

Jerarquía de aplicabilidad de estimadores de transporte de sedimentos						
#	Canales de laboratorio		Ríos		Canales de laboratorio y río	
	Estimadores	IE promedio	Estimadores	IE promedio	Estimadores	IE promedio
1	Engelund y Hansen (1967)	3,29	Engelund y Hansen (1967)	1,33	Engelund y Hansen (1967)	2,79
2	Aguirre-Pe et al. (2000)	5,51	Karim (1998)	1,66	Aguirre-Pe et al. (2000)	6,17
3	Sato, Kikkawa y Ashida (1958)	6,23	Yalin (1963)	7,08	Sato, Kikkawa y Ashida (1958)	8,12
4	Smart y Jaeggi (1983)	6,55	Aguirre-Pe et al. (2000)	8,06	Karim (1998)	8,48
5	Bathurst et al. (1987)	8,92	Ackers y White (1973)	11,79	Yalin (1963)	9,35
6	Yalin (1963)	10,14	Meyer-Peter y Müller (1948)	13,37	Ackers y White (1973)	14,24
7	Karim (1998)	10,85	Sato, Kikkawa y Ashida (1958)	13,54	Meyer-Peter y Müller (1948)	23,06
8	Einstein y Brown (1950)	14,59	Frijlink (1962)	14,94	Bathurst et al. (1987)	23,18
9	Ackers y White (1973)	15,09	Cheng (2002)	25,65	Smart y Jaeggi (1983)	24,22
10	Mizuyama y Shimohigashi (1985)	20,73	Bathurst et al. (1987)	64,18	Frijlink (1962)	29,00
11	Meyer-Peter y Müller (1948)	26,43	Smart y Jaeggi (1983)	75,04	Cheng (2002)	39,31
12	Pacheco-Ceballos (1989)	30,57	Parker (1990)	129,71	Einstein y Brown (1950)	46,04
13	Frijlink (1962)	33,89	Einstein y Brown (1950)	149,39	Pacheco-Ceballos (1989)	81,74
14	Cheng (2002)	44,06	Pacheco-Ceballos (1989)	228,85	Mizuyama y Shimohigashi (1985)	401,16
15	Parker (1990)	25036,91	Mizuyama y Shimohigashi (1985)	1494,89	Parker (1990)	18609,25

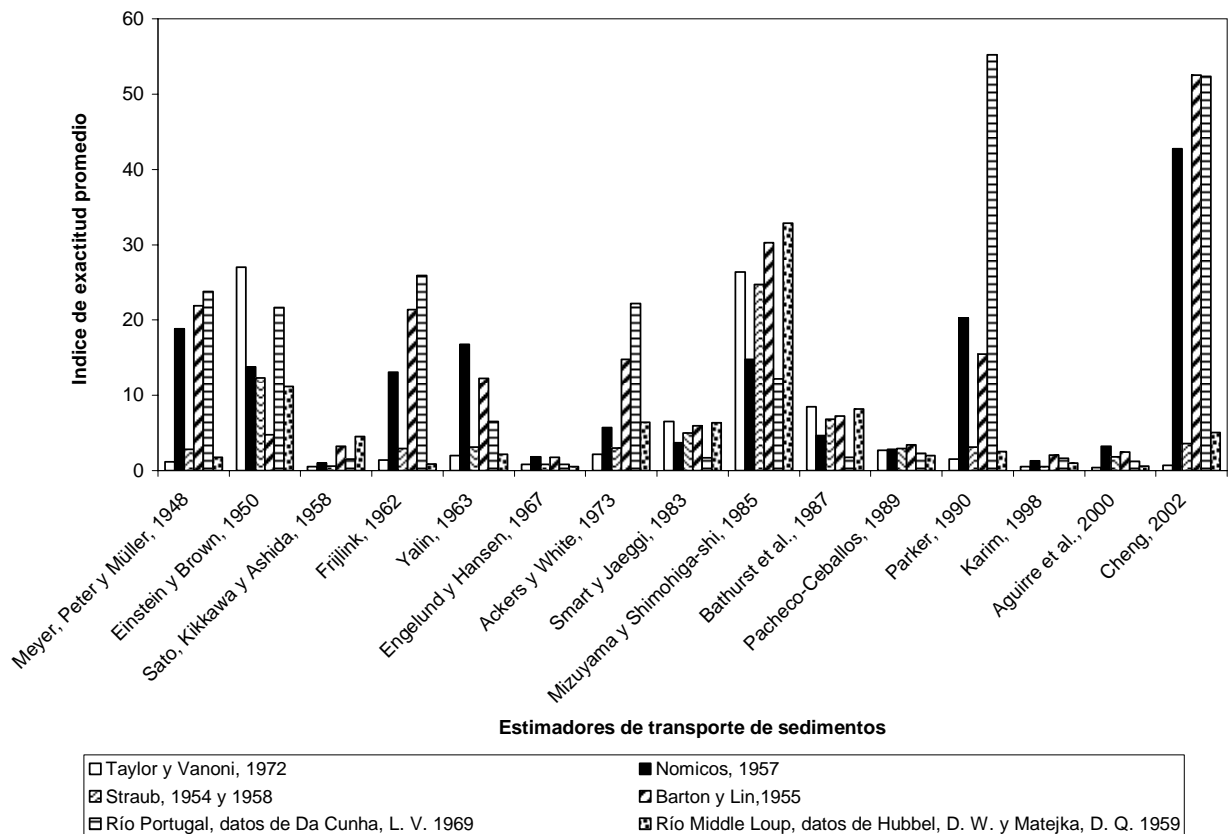


Fig. 1. Índices de exactitud o error (IE) encontrados para 15 modelos estimadores de transporte de sedimento para los datos de cuatro canales de laboratorio y dos ríos representativos tomados de Brownlie, 1981 y Hydraul-Tech. Inc. 1998.

Si se observan las barras de IE para otros modelos en la Fig. 1, como los de Parker (1990), Cheng (2002), Meyer-Peter y Müller (1948) y Frijlink (1962), se hace evidente que esos modelos, y otros, presentaron valores de IE de alta confiabilidad para algunos canales o ríos, y valores de IE altos que indican que esos modelos no son los más confiables para otros canales y ríos. Este resultado no se consiguió solamente en la muestra de fuentes de datos presentada en la Fig. 1, sino en todo el banco de datos, lo cual indicó que la mayoría de los modelos tienen rangos de aplicabilidad de alta confianza y rangos en los que no son muy exactos al estimar el transporte. Se procedió entonces, empleando los criterios de “excelente predictibilidad” y “jerarquía”, a determinar los rangos de alta confiabilidad de los modelos de transporte.

Al ser determinados los rangos de aplicabilidad de cada modelo, para cada una de las 5 variables consideradas determinantes del fenómeno de transporte, e interceptarse los criterios de “excelente predictibilidad” y “jerarquía” fue posible comparar los dos parámetros adimensionales considerados, números de Froude ( $F_S^*$ ) y Reynolds ( $R_S^*$ ) modificados, como medidores de la aplicabilidad de modelos de transporte. De estos dos parámetros, el número de Froude modificado, Ec. (19), presentó un comportamiento más confiable, lo cual es lógico pues ya ha sido demostrado en trabajos anteriores la importancia del número de Froude en los fenómenos de transporte, en oposición a la del número de Reynolds relacionado con fenómenos de flujo laminar.

$$F_S^* = \frac{qS}{r_b \sqrt{gD_{50}}} = \frac{VS}{\sqrt{gD_{50}}} \quad (19)$$

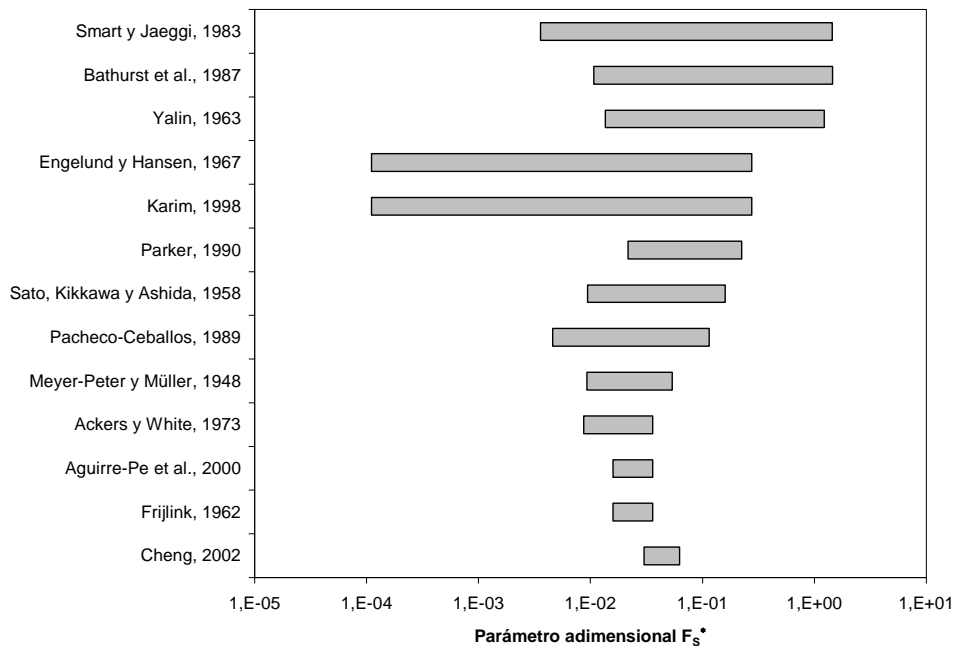


Fig. 2. Rangos de aplicabilidad de modelos de transporte de sedimento según el número de Froude modificado  $F_S^*$ .

Como ventajas adicionales del número de Froude modificado ( $F_S^*$ ) se encontró que los rangos de aplicabilidad de los modelos de transporte se solaparon menos y se extendieron a lo largo de un menor número de órdenes de magnitud para dicho parámetro que para el número de Reynolds modificado ( $R_S^*$ ).

Los rangos de aplicabilidad de los modelos según  $F_S^*$  se pueden apreciar en la Fig. 2. Los modelos de Engelund y Hansen (1967) y Karim (1998) presentaron los rangos más amplios de alta confianza, especialmente para valores “bajos” de  $F_S^*$ , correspondientes por lo general, a cauces de sedimentos finos (limos y arcillas), bajas velocidades de flujo y pendientes suaves, condiciones típicas de ríos de llanura.

En cambio, los modelos de Smart y Jaeggi (1983), Bathurst et al. (1987) y Yalin (1963) extendieron sus rangos hacia valores “altos” de  $F_S^*$ , correspondientes a sedimentos gruesos (arenas gruesas, gravillas y gravas), altas velocidades de flujo y pendientes altas, condiciones típicas de ríos de montaña. Los modelos de Einstein y Brown (1950) y Mizuyama y Shimohigashi (1985) no reportaron en ningún caso rangos de aplicabilidad que satisficieran los dos criterios empleados.

Al analizar la Fig. 2 se pudieron distinguir grupos de modelos con intervalos de aplicación similares. En base a esos intervalos se desarrolló un método, de sencilla aplicación, para la selección de los modelos de transporte más adecuados, de los 15 analizados en este trabajo, a utilizar

para estimar el transporte con fines prácticos. Este método (Fig. 3) tiene como ventaja adicional que para su uso se requieren datos de variables de sencilla medición.

Para verificar el nuevo método de selección de modelos de transporte de sedimento del fondo (Fig. 3) se empleó una muestra de 10 fuentes de datos distintas a las utilizadas en la deducción del mismo, entre las que se incluyeron ríos

y canales, tanto de laboratorio como de riego. La eficiencia de selección de modelos del método respecto a las jerarquías de aplicabilidad de modelos correspondientes fue del 69% para dicha muestra. Este es un resultado bastante alentador. Verificado el nuevo método, se desarrolló la versión software, de sencillo uso para facilitar su divulgación y aplicación con fines prácticos y/o investigativos.

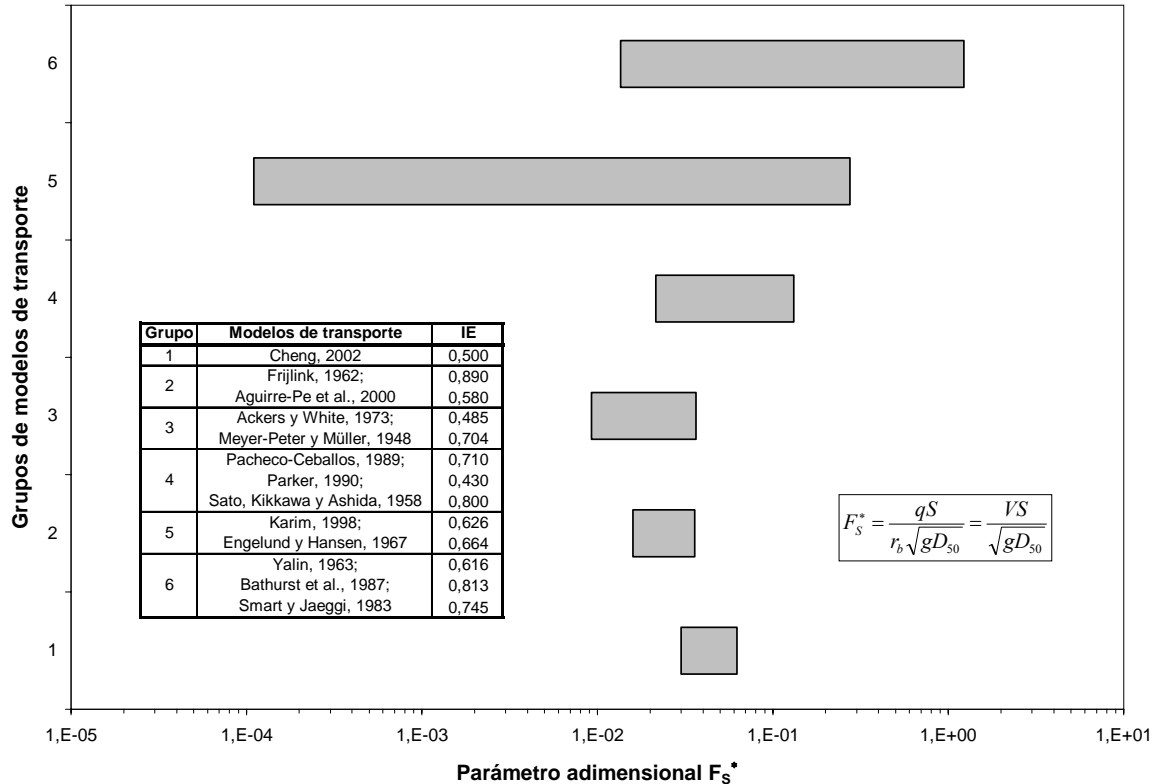


Fig. 3. Método para la selección de modelos de transporte de sedimento del fondo en ríos y canales según grupos de modelos y sus rangos de aplicabilidad en función del parámetro adimensional de Froude modificado,  $F_s^*$ . La tabla incluida muestra los modelos pertenecientes a cada grupo y sus índices de exactitud o error, IE. A menor IE menor error cometido al emplear los modelos.

## 5 Conclusiones y recomendaciones

El parámetro para la medición de la bondad de modelos de transporte introducido, índice de exactitud o error, IE, efectivamente puede ser utilizado en la comparación de modelos de transporte pues es un indicador sensible a la dispersión y exactitud de los valores estimados al emplear modelos de transporte. Se recomienda, en aquellos casos en los que se desee una buena predictibilidad al momento de emplear modelos estimadores de transporte, el valor  $IE = 2$  como límite superior del índice de exactitud o error. Sin embargo, dado que esto puede resultar difícil de lograr en canales y ríos de condiciones irregulares, el valor de 10 podría ser aceptado en tales casos.

El parecido de las jerarquías de aplicabilidad de modelos encontrado entre canales de laboratorio y ríos sugiere que los resultados obtenidos en canales de laboratorios pueden ser extrapolados a ríos y otros canales. No obstante, se

recomienda tener mucha precaución a la hora de considerar resultados de laboratorio en aplicaciones prácticas de gran importancia.

Para el amplio banco de datos analizado, los modelos con los menores índices de error, IE, y mayor exactitud encontrados fueron los de Engelund y Hansen (1967), Aguirre-Pe et al. (2000), Sato, Kikkawa y Ashida (1958) y Karim (1998). Esto confirma resultados señalados por otros autores (Karim, 1998 y Aguirre-Pe et al., 2003 y 2004).

Los rangos de aplicabilidad, para las variables consideradas, de los modelos de transporte analizados resultaron en su mayoría similares a los sugeridos por sus autores u otros investigadores. En ciertos casos los rangos encontrados fueron diferentes a los sugeridos en la bibliografía, lo cual es lógico considerando que se aplicaron los modelos a un banco de datos con características variables dentro de amplios espectros, distintos, en gran medida, a los consideradas por los autores de los modelos considerados.



De los dos parámetros adimensionales estudiados para la determinación de los rangos de aplicabilidad de los modelos, el número de Froude modificado  $FS$  resultó dominante sobre el de Reynolds  $RS$ , tal como era de esperarse y como ya ha sido reiteradamente reportado en la bibliografía.

El método desarrollado para la selección de modelos de transporte de sedimentos del fondo mostró una eficiencia del 69%, resultado que indica el aporte en la optimización de los modelos de transporte. Sin embargo, se requieren más investigaciones, pues tanto el método como el programa para su uso desarrollados pueden ser mejorados.

Algunas maneras de contribuir en esas mejoras podrían ser. Primero, mejorando los modelos de transporte de sedimento, por ejemplo mediante análisis de sus coeficientes como lo han hecho algunos autores recientemente (Pujol et al., 2004). Segundo, realizando un tratamiento similar al realizado en este trabajo a otros modelos de transporte no considerados en esta investigación. Tercero, evaluando los modelos de transporte aquí considerados con nuevos datos de ríos y canales, para afinar aun más sus rangos de aplicabilidad.

#### Agradecimientos

A los investigadores y demás personal del Centro de Investigaciones Hidráulicas y de Mecánica de los Fluidos por su colaboración en las diferentes etapas de este trabajo. Al Ingeniero de Sistemas Jorge Redondo por su trabajo en el diseño y programación del software del método para la selección de modelos de transporte. Al CDCHT por su apoyo económico mediante la subvención I-805-04-02-F.

#### Referencias

- Ackers P y White WR, 1973, Sediment transport: new approach and analysis, *J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng.* 99(HY11), pp. 2041-2060.
- Aguirre-Pe J, 1980, Hidráulica de sedimentos, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, pp. 269.
- Aguirre-Pe J, Olivero ML y Moncada AT, 2000, Transporte de sedimentos en cauces de alta pendiente, *Ing. Agua*, 7(4), pp. 353-365.
- Aguirre-Pe J, Olivero ML y Moncada AT, 2003, Particle densimetric Froude number for estimating sediment transport, *J. Hydraul. Eng.* 129(6), pp. 428-437.
- Aguirre-Pe J, Moncada AT, y Olivero ML, 2004, Transporte de sedimentos en ríos y canales, XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR, CD-ROM, São Pedro, Brasil.
- American Society of Civil Engineers, ASCE, 1975, Sedimentation Engineering, ASCE-Manuals and Reports on Engineering Practice, No. 54, Ed. V.A. Vanoni, New York, U.S.A., pp. 745.
- Bathurst JC, Graf WH y Cao HH, 1987, Bed load discharge equations for steep mountain rivers, en: *Sediment transport in gravel-bed rivers*, Eds. C.R. Thorne, J.C. Bathurst, y R.D. Hey, Jhon Wiley & Sons Ltd, Great Britain, Cap. 15, pp. 453-491.
- Brown CB, 1950, Sediment transportation en: *Engineering hydraulics*, Ed. H. Rouse, J. Wiley & Sons Ltd, New York, U.S.A., pp. 229-237.
- Brownlie WR, 1981, Compilation of alluvial channel data: laboratory and field, California Inst. Tech. Report No. KH-R-43B, Pasadena, U.S.A., pp. 209.
- Chacón M, 2004, Comunidades de Ephemeroptera (Insecta) en la cuenca del río Chama y su relación con la variabilidad ambiental, Tesis Doctoral, Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE), Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, pp. 199.
- Cheng N, 2002, Exponential formula for bed load transport, *J. Hydraul. Eng.* 128(10), pp. 942-946.
- Einstein HA, 1950, The bed-load function for sediment transportation in open channel flows, United States Department of Agriculture Soil Conservation Service, Technical Bulletin No. 1026, pp. 78.
- Engelund F y Hansen E, 1967, A monograph on sediment transport in alluvial streams en: *Sedimentation Engineering*. ASCE-Manual, Teknisk Vorlang, Copenhagen, Dinamarca, No. 54, pp. 208-209.
- Frijlink HC. y Angerman JJ, 1961, Present state of the investigations on bed-load movement in Holland. *Internationale d'Hydrologie Scintiiq*, Asma. Gén. de Bruxelles.
- Hydrau-Tech. Inc., 1998, Sed base, sediment transport data base. Sedbase 3, CD-ROM, Fort Collins, Colorado, U.S.A.
- Karim F, 1998, Bed material discharge prediction for non-uniform bed sediments, *J. Hydraul. Eng.* 124(6), pp. 597-604.
- Loftin MK, 1999, Ingeniería de recursos hidráulicos, en: *Manual del Ingeniero Civil*, Eds. F. S. Merritt., M. K. Loftin. y J. T. Ricketts, Mc Graw Hill. D.F., México, Tomo II, Cap. 21, pp. 21.1-21.138.
- Maza JA. y García F, 1996, Transporte de sedimentos, Capítulo 10 del Manual de Ingeniería de Ríos, Series del Instituto de Ingeniería, 584, UNAM, México, pp. 531.
- Meyer-Peter E. y Müller R, 1948, Formulations of the bed-load transport, II Int. Congress. IAHR, Estocolmo, Suecia, pp. 39-64.
- Mizuyama T. y Shimohigashi H, 1985, Influence of fine sediment concentration on sediment transport rates, *Japan Civ. Eng. J.* 27(1).
- Pacheco-Ceballos R, 1989, Transport of sediments: analytical solution, *J. Hydraul. Res.* 27(4), pp. 501-518.
- Parker G, 1990, Surface-based bed load transport relation for gravel rivers, *J. Hydraul. Res.* 28(4), pp. 417-436.
- Pujol A, Paterson A. y Charette VJ, 2004, La aproximación de las fórmulas de transporte, XXI Cong. Latinoameric. de Hidrául., IAHR, CD-ROM, São Pedro, Brasil.
- Ramírez MF, 2002, Estudio del transporte de sedimentos en función del parámetro de Froude de las partículas, Trabajo

- 
- Especial de Grado en Ingeniería Civil, Lab. de Hidráu. – CHIDRA, ULA, Mérida, Venezuela, pp. 77.
- Sato S, Kikkawa H y Ashida K, 1958, Research on the bed-load transportation, J. Res. PWRI. 3(3), pp. 11.
- Schoklitsch A, 1962, Handbuch des Wasserbaues, 3er Ed. Springer-Verlag, Vienna, Austria.
- Smart GM y Jaeggi M, 1983, Sediment transport on steep slopes, V.A.W. Mitteilungen 64. Hydrologie und Glaziologie. ETH, Zurich, Suiza, pp. 191.
- Yalin MS, 1963, An expression for bed-load transportation. J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng. 90(HY3), pp. 1433-1443.