

DESCARGA DE SEDIMENTOS EN RIOS GRANDES

Lilian Posada G.
Profesora Asociada
Universidad Nacional de Colombia
Sede Medellín - Colombia

Carl F. Nordin, Jr.
Profesor de Ingeniería Civil
Colorado State University
Fort Collins, Colorado - Estados Unidos

INTRODUCCION

En 1964, Bruce Colby publicó unas curvas que relacionan la descarga de arenas por unidad de ancho (q_s) con la velocidad media del flujo (V), para una temperatura constante de 15.6°C, cuatro valores de profundidad de flujo y seis tamaños del diámetro medio del sedimento del lecho; también incluyó curvas adicionales para obtener los factores de ajuste para diferentes temperaturas del agua y concentración de sedimentos finos.

Las gráficas de Colby fueron elaboradas empíricamente usando datos de laboratorio y de campo que cubrían un rango de condiciones ligeramente amplio y en los cuales las cargas de sedimento fueron medidas directamente o estimadas según el método modificado de Einstein (Colby y Hembree, 1955). Para profundidades grandes (30.3 m), las curvas son el resultado de extrapolaciones, por lo cual, los estimativos basados en esas curvas pueden no ser muy precisos (Colby, 1964).

En la investigación que aquí reportamos, se calculó la descarga total de sedimentos de ríos tropicales y no tropicales con base en datos de campo que abarcan un rango amplio de profundidades y velocidades de flujo, temperatura del agua y carga de sedimento en suspensión. La descarga de arenas por unidad de ancho fue estimada usando el método modificado de Einstein, la ecuación de transporte de sedimentos propuesta por Engelund y Hansen (1967) y una ecuación que reemplaza satisfactoriamente las gráficas de Colby. Los principales objetivos de nuestra investigación fueron verificar las gráficas de Colby con distintas condiciones de flujo, especialmente con profundidades grandes; comparar las características de transporte de ríos tropicales y no tropicales y, determinar si la ecuación de Engelund-Hansen, derivada a partir de datos de laboratorio, produce estimativos razonables para ríos grandes. En este artículo se presentan algunos resultados preliminares de nuestra investigación.

FUENTES DE INFORMACION

La descarga de sedimentos se calculó con base en muestras de sedimentos del lecho y en suspensión (integradas en profundidad) recogidas, durante las campañas de medición realizadas en períodos de aguas altas y aguas bajas, en lugares específicos a lo largo de los ríos donde, simultáneamente, se determinaron las características del flujo y temperatura del agua.

En este artículo se usaron datos de campo de los ríos Amazonas, Orinoco, Mississippi y algunos de sus principales afluentes. Los datos sobre el río Mississippi y sus afluentes se tomaron de Moody y Meade (1992a, 1992b). Los del Amazonas se tomaron de Meade y otros (1977), Meade (1985) y Merentes y Meade (1985); este último fue obtenido mediante comunicación personal de R. Meade del Centro de Investigaciones Geológicas de los Estados Unidos (U.S. Geol. Survey, USGS). La información sobre el río Orinoco y sus afluentes fue suministrada por el Proyecto Orinoco-Apure y el Ministerio

del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables (MARNR) de Venezuela. Muchos de esos datos fueron recolectados conjuntamente por el proyecto MARNR-USGS en el cual participó el segundo autor.

LOS DATOS

La Tabla 1 muestra el rango de variación de las principales variables consideradas en este informe. La distribución de tamaños del material del lecho fue determinada por tamizado de las muestras de sedimento y la concentración de sedimento en suspensión fue analizada con base en las propiedades de asentamiento de las partículas. La concentración de partículas de tamaño mayor que 0.062 mm (arenas en suspensión), la cual es baja comparada con la concentración total de sedimentos en suspensión, varió desde cero hasta un máximo de 221 mg/l en el río Mississippi, 269 mg/l en el Amazonas y 266 mg/l en el río Orinoco.

Tabla 1.
Rango de las Principales Variables

Río	# de sitios	Caudal líquido	Velocidad Media	Profund. media	Temper. Superfic del agua	Diam Medio Mat Lecho D50	Conc Tot Sedim Suspen
		m ³ /s	m/s	m	°C	mm	mg/l
Mississippi	85	332-34100	0.37-1.77	2.92-21.8	3.3 - 31	0.172-0.993	18-1580
Amazonas	25	2580-177000	0.37-2.20	12.0-68.0	27 - 28	0.089-0.376	25.5-677
Orinoco	79	8.6-67100	0.18-1.93	0.93-28.0	26 - 33	0.024-1.13	5-1670
Amazónas y Orinoco	104	8.6-177.000	0.18-2.20	0.93-68.0	26 - 33	0.088-1.13	5-1670

METODOS DE CALCULO

El procedimiento Modificado de Einstein (MEP) fue desarrollado por Colby y Hembree (1955) para calcular la carga total de sedimentos del río Niobrara usando el método de Einstein. El MEP calcula la descarga total de sedimentos en una sección transversal de una corriente aluvial cuyo lecho es básicamente arenoso. Los cálculos se basan en mediciones de variables hidráulicas, en la concentración y distribución de tamaños del sedimento en suspensión y del material del lecho. En los cálculos se considera una forma de extrapolación para que el sedimento en suspensión medido sea representativo de la descarga total de sedimentos en suspensión; además se incluye una ecuación para evaluar la descarga del lecho.

El procedimiento es aplicable solamente si se tienen datos de campo; por tanto, no puede ser usado directamente para diseño o predicción. Debería aplicarse únicamente cuando todo el material del lecho sea de tamaño más fino que 16 mm y sólo si una parte significante del material en suspensión está compuesto de partículas del mismo tamaño que las del lecho.

El programa de computador del MEP (Stevens, 1985) selecciona un tamaño de referencia para calcular los valores del exponente z en la ecuación de la carga en suspensión. El rango de tamaños escogido es aquel que tiene el mayor valor en la suma de los porcentajes de material del lecho y material en suspensión; sin embargo, Colby y Hembree pusieron como restricción un valor mínimo de 3%. En este trabajo fijamos ese mínimo en 1%.

El Método de Colby (1964) es una forma simple de calcular descarga de arenas. A

partir de un número pequeño de variables se obtiene una descarga base de arenas, la cual se modifica luego para incluir los efectos de temperatura del agua y tamaño del sedimento del lecho. Los coeficientes de ajuste se obtienen gráficamente. Este método fue desarrollado empíricamente usando características de flujo de poca profundidad; para profundidades mayores o iguales que 3 m se extrapolaron las gráficas. Las gráficas de Colby se han aproximado a las siguientes ecuaciones.

$$q_s = a (V - V_c)^b \quad (1)$$

donde q_s es la descarga de arenas por unidad de ancho (kg/s/m) para una temperatura constante de 15.6°C , V es la velocidad media (m/s), V_c es la velocidad crítica (m/s) y, a y b son coeficientes. El coeficiente b tiene un valor constante de 2.5 siempre que $(V - V_c) < 1$.

Cuando $(V - V_c) \geq 1$, b varía con d , el tamaño medio del sedimento del lecho (m), según la ecuación:

$$b = 0.56 d^{-0.138} \quad (2)$$

El coeficiente a se expresa en función de d y de h , la profundidad media del flujo (m), según la ecuación mostrada en la Tabla 2. Para valores intermedios se debe interpolar a lo largo de una línea recta graficada en un papel log-log.

La velocidad crítica se expresa en función de d y h , según la ecuación:

$$V_c = 5.25 h^{1/10} d^{1/3} \quad (3)$$

Tabla 2.
Valores del Coeficiente a.

d (mm)	$a = m_1 h^{n_1}; h (m)$	
	m_1	n_1
0.1	3.00	0.61
0.2	2.35	0.48
0.3	2.00	0.30
0.4	1.80	0.30
0.6	1.65	0.30
0.8	1.57	0.30
1.0	1.55	0.30

Para valores de temperatura diferentes de 15.6°C, se aplica la Ecuación 4:

$$q_s = a (V - V_c)^b [1 + (AF-1) CF] \quad (4)$$

donde AF y CF son los factores de ajuste por temperatura y tamaño del sedimento. AF y CF se obtienen de Colby (1964, Fig. 24).

La Ecuación de Engelund y Hansen relaciona la descarga de arenas por unidad de ancho con la velocidad, pendiente, profundidad, tamaño del material del lecho y otras características relevantes del flujo y del sedimento (Engelund and Hansen, 1967). Para una gravedad específica de 2.65 y la aceleración de la gravedad igual a 9.81 m/s², la ecuación de Engelund-Hansen puede escribirse así:

$$q_{si} = 15.54 f_i (R S)^{3/2} \frac{V^2}{d_i}$$

$$\sum q_{si} = q_s = 15.54 (R S)^{3/2} \frac{V^2}{D} \quad (5)$$

$$\frac{1}{D} = \frac{f_1}{d_1} + \frac{f_2}{d_2} + \dots + \frac{f_i}{d_i} + \dots + \frac{f_n}{d_n}$$

donde R es el radio hidráulico, S es la pendiente, d_i es el diámetro del $i^{\text{ésimo}}$ tamaño de clase, f_i es el porcentaje de sedimentos de tamaño d_i en la muestra y D es un tamaño representativo para el sedimento del lecho. En el momento no tenemos datos para la pendiente; entonces, usamos un valor del coeficiente adimensional de Chezy ($C/g^{0.5}$) igual a 20 para calcular la descarga unitaria de arenas.

RESULTADOS

La descarga de arenas por unidad de ancho para los ríos Mississippi, Amazonas, Orinoco y sus respectivos afluentes fue calculada de acuerdo con el Método Modificado de Einstein, las ecuaciones de Colby y la ecuación de Engelund-Hansen. La descarga total de sedimentos se calculó usando el Procedimiento Modificado de Einstein.

El resultado de los cálculos se resumen en la Tabla 3. En cada caso, los valores mínimo y máximo de la descarga de arenas corresponden a los sitios donde la velocidad tuvo sus valores mínimo y máximo, respectivamente. Puesto que la descarga de arenas, según el método de Colby, es función de la diferencia entre la velocidad media del flujo y la velocidad crítica, el valor mínimo de cero para q_s en los resultados de Colby se obtuvo siempre que la velocidad fue menor o igual al valor de V_c obtenido a partir de la ecuación 3.

Para profundidades de flujo mayores de 30 m y velocidades alrededor de 2 m/s, la descarga de sedimentos no medida (descarga total menos descarga medida) varió entre 2 y 15% de la carga total, con un promedio aproximado de 6%. Con profundidades pequeñas de flujo la variación fue amplia, desde cero hasta un 71%, dependiendo prin-

cipalmente de la profundidad del flujo, la velocidad y la concentración de arenas en la zona muestreada. La relación aumentó a medida que la profundidad disminuyó; sin embargo, a cualquier profundidad y velocidades bajas, cuando el diámetro medio del sedimento del lecho es grande, la descarga de arenas es muy baja y tiende a cero a medida que la velocidad del flujo se approxima a su valor crítico. Con profundidades grandes y velocidades de flujo altas, el tamaño del sedimento del lecho resultó ser más pequeño y la descarga de arenas resultó alta. Por tanto, el efecto del tamaño de las partículas sobre la descarga de arenas es grande si se tienen velocidades pequeñas (independientemente de la profundidad), o con velocidades altas si la profundidad del flujo es grande.

La relación entre la descarga de arenas, según el método modificado de Einstein y la

velocidad, considerando todo el conjunto de datos, se muestra en la Figura 1. Las líneas continua y punteada corresponden a la ecuación de Engelund-Hansen con $C/g^{1/2} = 20$, para $d = 0.1$ mm y 1.0 mm, respectivamente. Los datos muestran que, generalmente, la descarga unitaria de arenas varía aproximadamente con la quinta potencia de la velocidad media. Se observó una tendencia en los datos del río Mississippi a estar ligeramente por encima de los datos de los ríos tropicales, probablemente por las más bajas temperaturas del agua en el primero. Aparte de los efectos de temperatura del agua, parece no haber diferencias significativas entre las características de transporte de sedimentos en ríos tropicales y no tropicales. Las líneas que representan la ecuación de Engelund-Hansen aparecen como envolventes de los datos, permitiendo sugerir que la ecuación es aplicable a flujos de gran profundidad.

Tabla 3.
Descarga de sedimentos por unidad de ancho

Río	Método Modificado de Einstein	Método de Colby	Ecuación de Engelund - Hansen	Descarga de Sedimentos	Carga No. Medida / Total	Carga No. Medida
	Arenas	Arenas	Arenas	Total		
	Mg/m/d	Mg/m/d	Mg/m/d	Mg/m/d	%	Mg/m/d
Mississippi	0.1 - 360	0 - 880	0.2 - 330	7.6 - 2290	0.52 - 71.5 ¹	0.1 - 327
Amazonas	0.1 - 850	0 - 4570	0.1 - 2340	9.1 - 3320	0 - 12.7	0 - 139
Orinoco	0 - 372	0 - 455	0 - 290	0.4 - 780	0 - 93.9 ²	0 - 167
Amazonas y Orinoco	0.1 - 850	0 - 4570	0 - 2340	0.4 - 3320	0 - 93.9	0 - 167

1: Este valor corresponde al río Mississippi en Fulton, Tennessee, aguas abajo de la confluencia del río Ohio. El diámetro medio del material del lecho es 0.846 mm y la concentración total de sedimento en suspensión es 134 mg/l. El valor siguiente de esta relación, 64.47% se encontró aguas arriba de este sitio, en Hickman sobre el río Mississippi, donde d_50 es 0.444 mm.

2: Este es un valor espúreo en la gráfica de la relación carga no medida/carga total contra el diámetro medio de las partículas del lecho. El valor corresponde al río Suapure, un afluente de escasa profundidad del río Orinoco. El diámetro medio del sedimento del lecho es 0.890 mm; la profundidad del flujo es 0.93 m. El valor siguiente de esta relación, 44.96%, se encontró en el río Orinoco, en San Fernando de Atabapo, donde la profundidad del flujo es relativamente baja (3.76 m) y el diámetro medio del sedimento es todavía grande (0.699 mm).

La descarga de arenas obtenida a partir del MEP se muestra en la Figura 2, para profundidades mayores que 10 m y, en la Figura 3, para profundidades menores que 10 m. Las líneas allí representan los valores de la Ecuación 1 y de las curvas de Colby para un diámetro medio del material del lecho igual a 0.3 mm. De esas figuras puede observarse que no hay diferencia entre los valores obtenidos usando la ecuación propuesta y los valores obtenidos usando directamente las curvas de Colby (línea continua). Además, puede observarse que el método de Colby sobreestima la descarga de arenas para los dos sistemas de corrientes (ríos tropicales y no tropicales). Esta misma conclusión se deduce de la Figura 4, donde se graficó la descarga de arenas obtenida aplicando las ecuaciones 1 a 4 (descarga calculada) contra la descarga de arenas según el MEP (descarga medida). Los datos muestran que las curvas de Colby sobreestiman la descarga unitaria de arenas, en un factor alrededor de 2 en promedio.

En resumen, los resultados de nuestra investigación muestran que:

- la descarga de arenas por unidad de ancho varía aproximadamente con la quinta potencia de la velocidad media,
- además del efecto de temperatura no hay diferencias apreciables en las características de transporte de los ríos tropicales y no tropicales y,
- el método gráfico de Colby (1964) sobreestima la descarga unitaria de arenas en un factor alrededor de 2.

REFERENCIAS

- COLBY, B.R. y HEMBREE, C.H., 1955, Computations of total sediment discharge, Niobrara river near Cody, Nebraska: U.S. Geol. Survey, Water-Supply Paper 1357, 187 p.
- COLBY, B.R., 1964, Discharge of sands and mean-velocity relationships in sand-bed streams: U.S. Geol. Survey Professional Paper 462-A, 52 p.
- EINSTEIN, H.A., 1950, The bed-load function for sediment transportation in open channel flows: U.S. Dept. Agriculture Tech. Bulletin 1026, 71 p.
- ENGELUND, F. Y HANSEN E., 1967, A monograph on sediment transport in alluvial streams: Copenhagen, Teknisk Forlag, 62 p.
- MEADE, R.H., 1985, Suspended sediment in the Amazon river and its tributaries in Brazil during 1982-84: U.S. Geol. Survey Open File Report 85-492, 39 p.
- MEADE, R.H. y others, 1979, Suspended sediment and velocity data, Amazon river and its tributaries, June-July 1976 and May-June 1977: U.S. Geol. Survey Open File Report 79-515, 42 p.
- MERTES, L.A.K. y MEADE, R.H., 1985, Particle sizes of sand collected from the bed of the Amazon river and its tributaries in Brazil during 1982-1984: U.S. Geol. Survey Open File Report 85-333, 16 p.
- MOODY, J.A. y MEADE, R.H., 1992, Hydrologic y sedimentologic data collected during three cruises at low water

on the Mississippi River and some of its tributaries, July 1987 - June 1988: U.S. Geol. Survey Open File Report 91-485, 143 p.

MOODY, J.A. y MEADE, R.H., 1992, Hydrologic and sedimentologic data collected during four cruises at high water on the Mississippi River and some of its tributaries, March 1989-June

1990: U.S. Geol. Survey, Open File Report (in press).

STEVENS, Jr., H.H., 1985, Computer program for the computation of total sediment discharge by the Modified Einstein Procedure: U.S. Geol. Survey, Water-Resources Investigations Report 85-4047, 80 p.

Apéndice I. Símbolos

a	=	coeficiente
AF	=	Factor de ajuste por temperatura
B	=	ancho del canal
b	=	coeficiente
C	=	coeficiente de Chezy
CF	=	factor de ajuste para el tamaño del sedimento
C_s	=	concentración de sedimentos en suspensión
D	=	diámetro representativo del material del lecho
D_{50}	=	diametro medio del sedimento del lecho
d	=	diámetro promedio del sedimento del lecho
f_i	=	fracción (en peso) de sedimentos de tamaño d_i
g	=	aceleración de la gravedad
h	=	profundidad media de flujo
Mg	=	Megagramos (toneladas métricas)
m_1	=	coeficiente
n	=	coeficiente de rugosidad de Manning
n_1	=	coeficiente
Q	=	caudal líquido
Q_s	=	descarga total de arenas
Q_T	=	descarga total de sedimentos
q_s	=	descarga de arenas por unidad de ancho del canal
R	=	radio hidráulico
S	=	pendiente del canal
T	=	temperatura media del agua
V	=	velocidad media del flujo
V_c	=	velocidad crítica
γ	=	peso específico del agua
γ_s	=	peso específico del sedimento

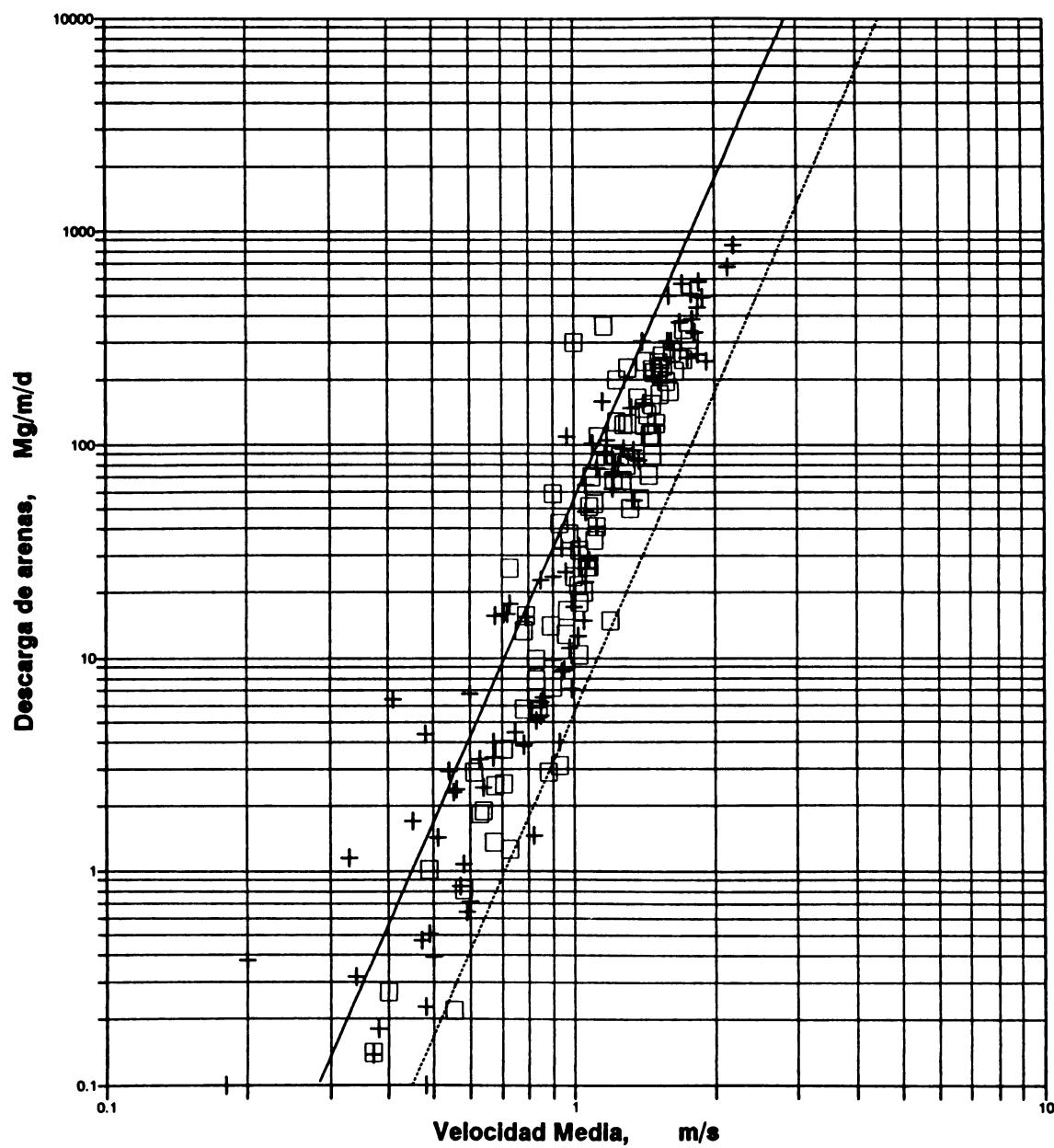


Figura 1. Relación de la descarga de arenas y la velocidad media (todos los datos). Las líneas representan la ecuación de Engelund-Hansen con $C/g^{1/2} = 20$ y d igual a 0.1 mm (continua) y 1.0 mm (punteada).

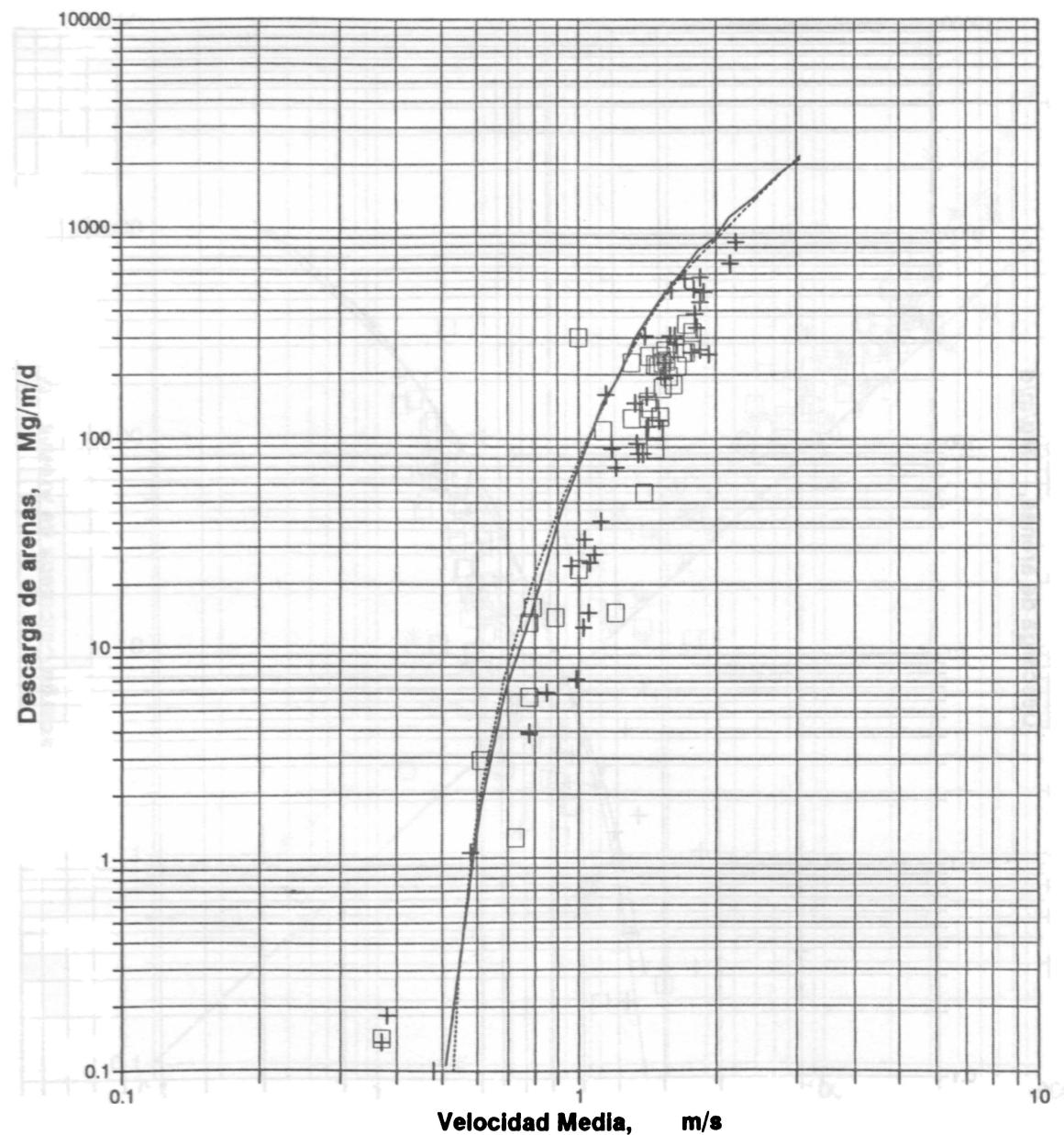


Figura 2. Relación de la descarga de arenas y la velocidad media para profundidades mayores que 10 m, en ríos tropicales (cruz) y no tropicales (cuadrado). Las líneas representan los valores según el método de Colby (punteada para la ecuación propuesta y continua, para las curvas).

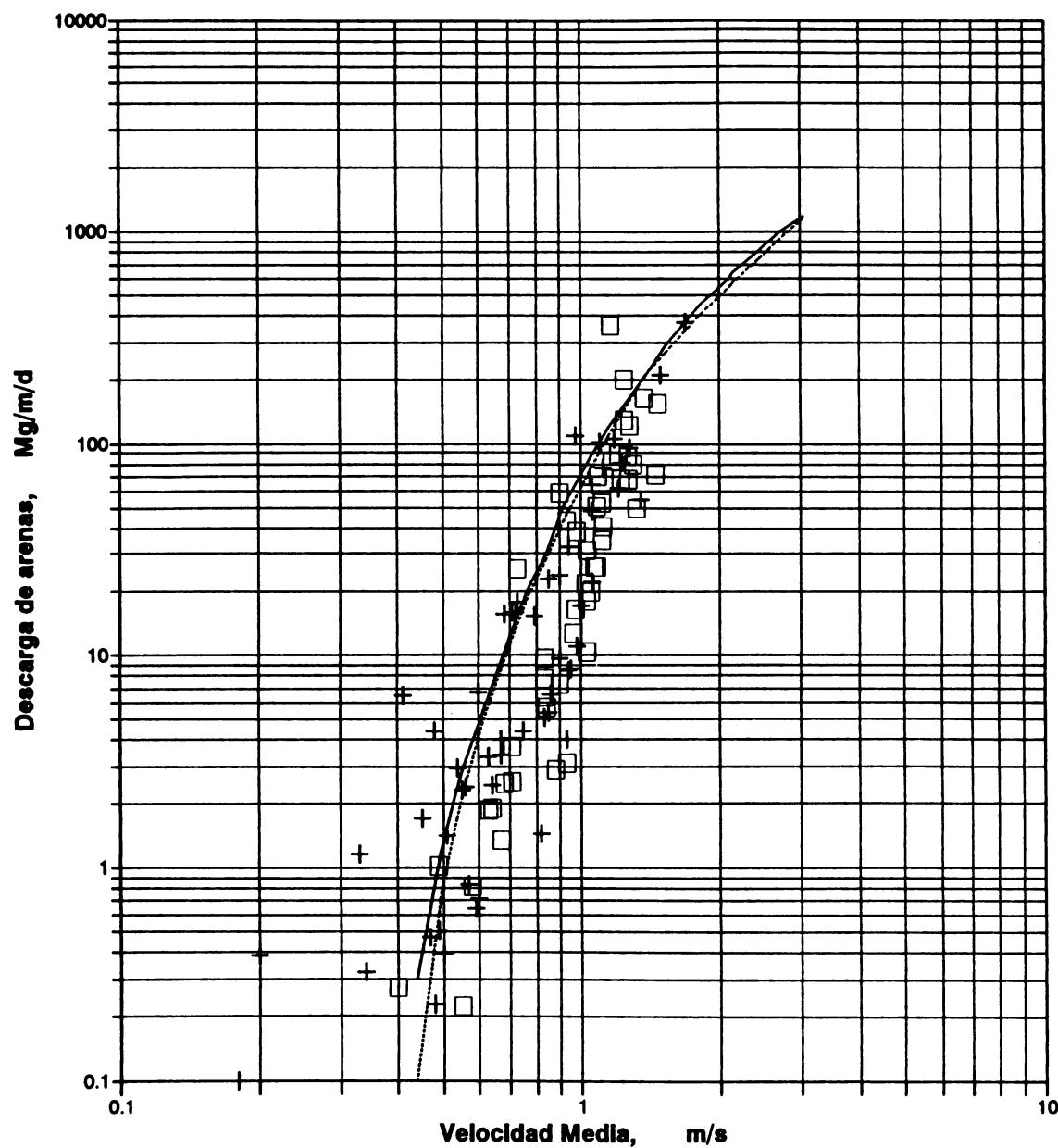


Figura 3. Relación de la descarga de arenas y la velocidad media para profundidades menores que 10 m, en ríos tropicales (cruz) y no tropicales (cuadrado). Las líneas representan los valores según el método de Colby (punteada para la ecuación propuesta y continua, para las curvas).

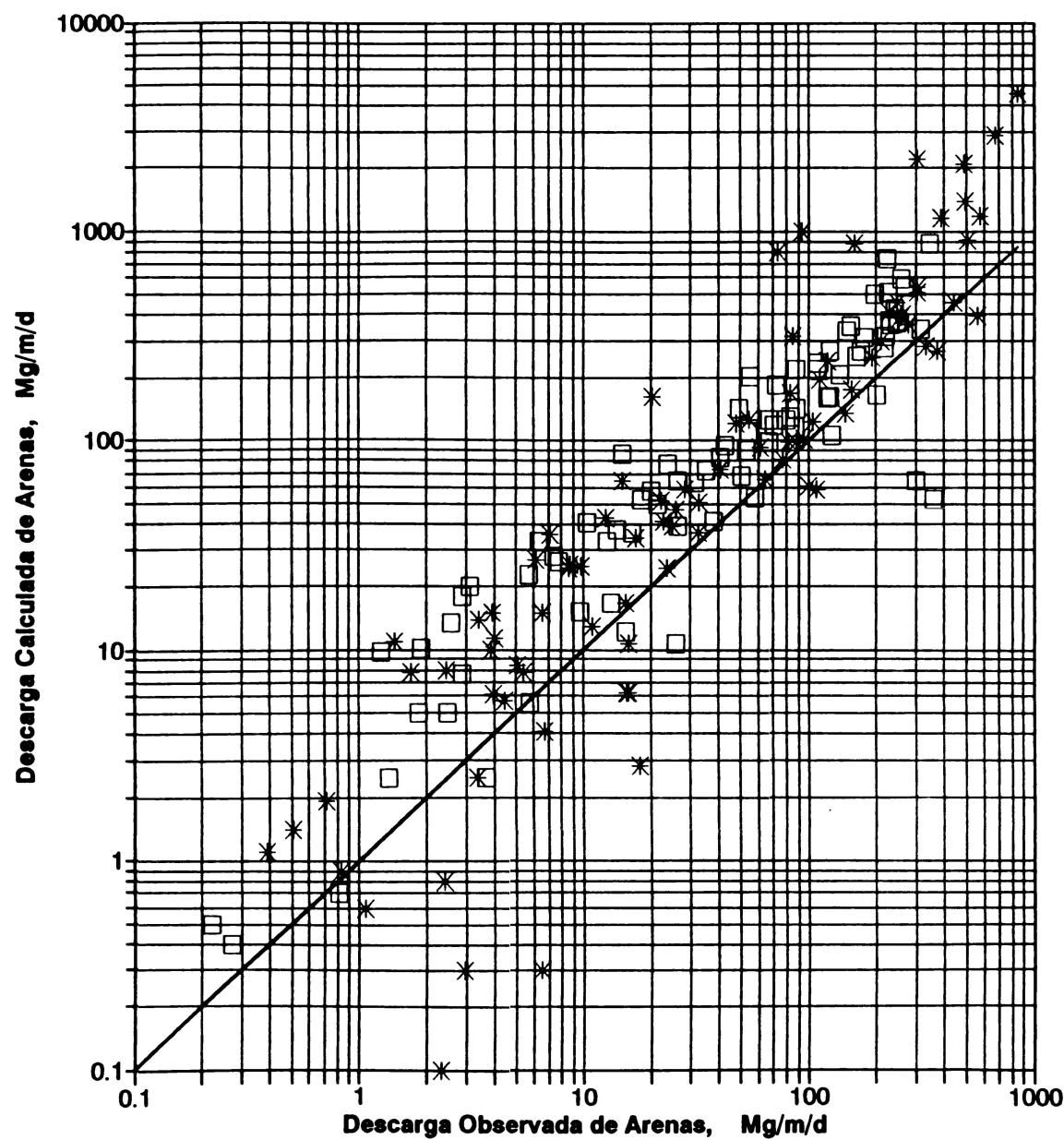


Figura 4. Relación de la descarga de arenas medida y calculada usando el método de Colby (1964). La línea representa perfecto acuerdo.

