INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

Modelo de transporte de sedimentos de carga de fondo en cauces fluviales

Francisco Pablo García Gutiérrez.

Ingeniero Civil (Honores). Univ. de Lancaster (Inglaterra),
Master of Science en Ing. Hidráulica. Univ. de Newcastle upon Tyne (Inglaterra)
Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Univ. de Valencia (España)

Académico de Número de la Academia Nacional de Ciencias de Bolivia.
Catedrático de Hidrología e Investigador.
Universidad Autónoma Gabriel Rene Moreno.
Santa Cruz – Bolivia, Julio del 2009

DIRECCIÓN:

e-mail: fran

ABSTRACTO/RESUMEN

Se presenta un modelo para cuantificar el transporte de sedimentos de fondo de material del lecho en cauces fluviales. Dicho modelo está basado en los principios dinámicos del movimiento de partículas tanto esferoides como de sedimentos naturales en lechos de cauces aluviales, e incluye dos variaciones sustanciales en la determinación de la dinámica del transporte de sedimentos. La primera es el establecimiento de las condiciones críticas o umbral del movimiento de partículas en lechos de cauces aluviales a partir de modificaciones a la relación existente de Shields, incluyendo el efecto de la sustentación de la partícula en la misma, lo que ha dado a una nueva relación para la determinación del esfuerzo cortante crítico; y por otro lado, se han introducido relaciones que permiten la evaluación y cuantificación de la sustentación –y sobre todo su efecto en las partículas presentes en el lecho- como fuerza que actúa en la dirección vertical y normal al plano de desplazamiento de las partículas en el lecho, en conjunción con las componentes de resistencia al flujo y la gravedad. Se ha comprobado la bondad de la mencionada ecuación por comparación con los valores que dan ecuaciones determinadas por autores célebres.

PALABRAS CLAVE:

- Hidráulica Fluvial.
- Transporte de Sedimentos.

1.- ANTECEDENTES Y GENERALIDADES SOBRE EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

El movimiento de las partículas se debe a la acción que ejerce el flujo sobre ellas, a través de las fuerzas normales y de corte.

Bien se sabe que los sedimentos se mueven en cauces aluviales según dos mecanismos;

- Transporte de fondo.
- Transporte en suspensión.

El transporte de fondo se caracteriza, por efectuarse con las partículas en continuo e íntimo contacto con el lecho granular. Se da en general para las partículas de mayor tamaño, en las que el peso sobrepasa a las fuerzas del escurrimiento. El movimiento se efectúa por la acción de fuerzas de arrastre, que son preferentemente en la dirección del escurrimiento. Este movimiento se caracteriza por ser intermitente; es decir, que las partículas se mueven y se detienen continuamente. Los períodos de reposo son en general mucho mayores que los de movimiento. Sin embargo, a medida que aumenta la capacidad de arrastre del flujo, estos períodos de reposo se van haciendo cada vez menores, tendiéndose paulatinamente hacia una uniformación del arrastre sólido.

El transporte en suspensión. se caracteriza por formar parte del flujo líquido, y suspendido en este a partir de cierto nivel por encima del lecho activo hasta la superficie libre. Este se da en continuo intercambio de masa turbulento.

Además, hay que diferenciar estos mecanismos de transporte según el origen del material, bien sea este de material del lecho o de lavado, siendo este último, material muy fino que no es del lecho, y que ingresa al sistema fluvial aguas arriba del punto en consideración y proviene de aportes de la cuenca.

En el transporte de fondo que corresponde a material del lecho, - o más bien al transporte de carga de fondo- se deben diferenciar los siguientes modos de transporte:

- Deslizante o resbalante.
- Rodante.
- Saltante.

El movimiento rodante consiste en el avance de las partículas por medio de una rotación en torno a un punto de contacto, generado por un torque local.

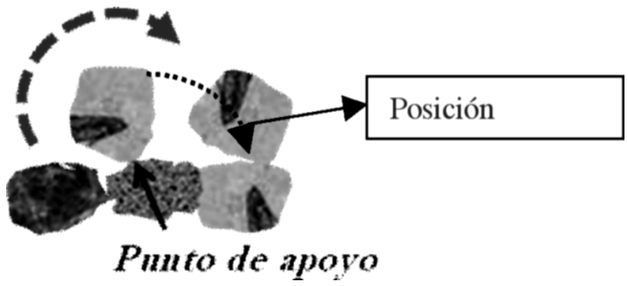


Ilustración 1.- Movimiento Rodante

El movimiento resbalante ocurre cuando las partículas se encuentran apoyadas sobre una superficie suficientemente plana de modo que no existe un punto de apoyo en torno al cual rotar.

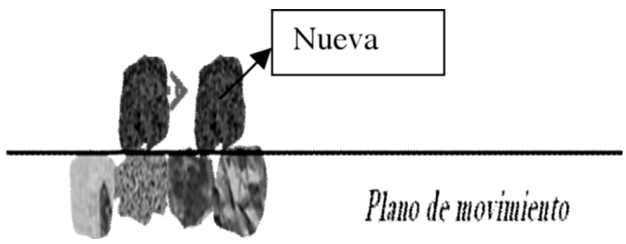


Ilustración 2.- Movimiento Deslizante o resbalante

El tercer tipo corresponde a lo que se denomina “transporte de saltación"; aquí las partículas son elevadas desde el lecho por el flujo traduciéndose ello en saltos intermitentes que alcanzan alturas de unos pocos diámetros de partícula. Es un modo de transporte que se da también en flujos gaseosos o de aire; se observa frecuentemente en el movimiento de sedimento inducido mediante la acción del viento (transporte eólico).

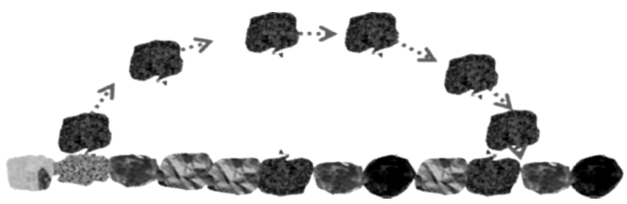


Ilustración 3.- Movimiento Saltante

Diversos han sido los autores y, consecuentemente las teorías e hipótesis bajo las cuales se han dado innumerables relaciones para poder cuantificar el transporte de sedimentos por el mecanismo de transporte de fondo. Sobre todo, porque este es el mecanismo que se dá en materiales que componen el lecho de características gruesas y que generalmente, pero no exclusivamente, se desplazan mediante dicho mecanismo.

Se tiene antecedentes desde Duboys (1879) hasta Shields (1936) cuyas formulas están basadas en los esfuerzos de corte tangenciales sobre el lecho, hasta la célebre relación de Meyer-Peter-Muller (1948), en la cual se hace ya referencia a la diferencia de la resistencia al flujo debida a la partículas que componen el lecho de la resistencia total, y propone una relación de carácter dinámico, ya que equilibra el peso sumergido de las partículas con relación al esfuerzo de corte que se produce por la resistencia de la partícula y el esfuerzo de corte que dá el umbral de movimiento; es decir, al esfuerzo residual disponible para que la partícula se mueva (como diferencia entre el esfuerzo de corte total y el necesario para que la partícula entre en movimiento).

Hans A. Einstein (hijo del célebre físico y matemático) en 1942 plantea un modelo en base a las probabilidades de que las partículas que componen el lecho se pongan en movimiento y se desplacen, y su trabajo fue posteriormente modificado por Rouse, Boyer y Laursen en un capitulo descrito por Brown en 1950, dando lugar a la formula denominada de Einstein-Brown. Esta emplea dos parámetros adimensionales, como los fundamentales en la descripción del movimiento de partículas en el lecho y utiliza ya los conceptos de velocidad de asentamiento de las partículas. En su forma original se aparta de los conceptos de esfuerzo cortante crítico.

En 1970 Ashida & Michiue, establecieron una sencilla relación en base a esfuerzos de corte y al diámetro mediano, aunque puede utilizarse para mezclas. Esta fue calibrada en un sinnúmero de ríos de Japón y los Estados Unidos con datos de cauces naturales y de laboratorio.

2.- INTRODUCCION

La relación que se presenta está basada en un modelo dinámico del movimiento de partículas en lecho aluviales, conformado tanto de partículas esferoides como de sedimentos naturales, desarrollado por el autor del presente trabajo [2]. La particularidad de este, es que se incluyen todos las variables dinámicas que intervienen en el proceso de movimiento de partículas en lechos aluviales, dando lugar a que el umbral de movimiento de las partículas que están en el lecho presente características diferentes a aquéllas que tradicionalmente se obtenían por la célebre fórmula de Shields, con la particularidad que se le ha sumado los efectos de sustentación de manera cuantitativa.

Los resultados de la fórmula tanto en lo que hace a partículas esferoides como a sedimentos naturales son bastante buenos comparados con otras metodologías similares.

3.- PLANTEAMIENTO DE LA ECUACIÓN

Para poder cuantificar el transporte de sedimentos de fondo, sobretodo incluyendo las variables que intervienen en el proceso, se presenta la siguiente ecuación:

(1) $$i_b = V_{ps} * W\mathrm{i}$$

Donde:

- ib = Cantidad de sedimentos en peso sumergido que pasan por unidad de ancho de la sección. [Kg.m/s].

- Vps = Velocidad media de las partículas que se desplazan en el lecho, en dirección del flujo principal. [m/s].

- W´= Es el peso sumergido de las partículas por unidad de área del lecho, en sentido perpendicular hacia abajo.[N/m^2] o [Kg/m^2]

4.- ECUACION DEL MOVIMIENTO DE PARTICULAS EN EL LECHO Y EVALUACION DE LAS VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DINAMICO

Para poder entender mejor la relación dinámica que representa el movimiento de partículas –sean sedimentos naturales o esferoides en lecho de cauces aluviales- y los componentes de la misma, debe considerarse, con relación a la ilustración No. 4, las siguientes variables y parámetros, que intervienen en el proceso:

- A_b = Aréa del lecho sujeta al esfuerzo del flujo en sentido del flujo principal, es decir, en sentido paralelo al flujo = B*DL.

- B = Ancho de la sección.
- DL = Longitud del área expuesta al flujo en sentido paralelo al flujo.
- Ubs = Velocidad del flujo a nivel de partícula en el lecho.(Ilust. 4 y 5)
- W´= W/Ab.
- W = Peso sumergido de las partículas.

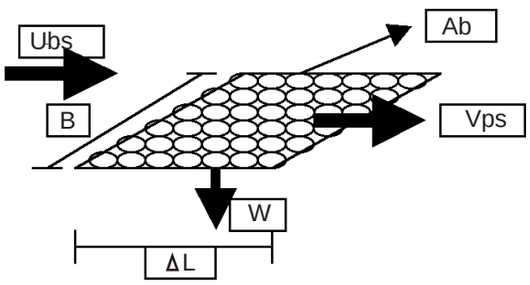


Ilustración 4.- Descripción de variables

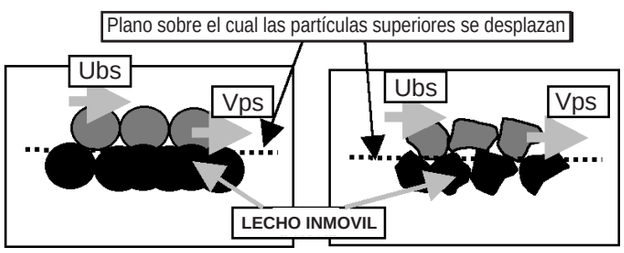
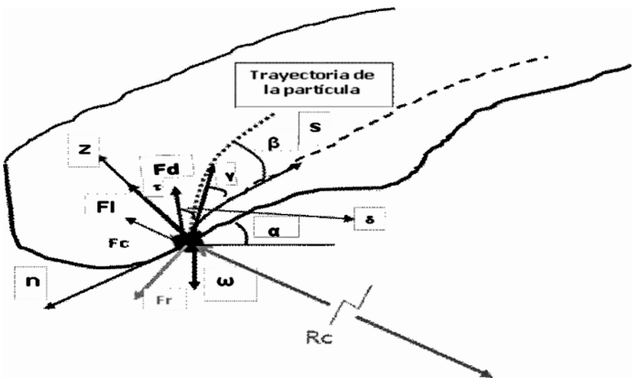


Ilustración 5.- Modo de transporte de partículas esféricas y sedimentos naturales

De acuerdo a la relación (1), es necesario evaluar los valores de las variables requeridas, es decir, Vps y W´.

Para éllo se utilizará el modelo de transporte de sedimentos realizado por el autor del presente trabajo y la ecuación dinámica de movimiento de sedimentos en cauces fluviales [2] que se desprende del mismo, ya que a partir de esta última relación se obtienen las variables requeridas.
Para ubicar al lector en el esquema de las fuerzas que actúan sobre la partícula y el sistema de coordenadas utilizado para determinar la mencionada ecuación dinámica del movimiento de partículas y/o sedimentos, se presenta la siguiente Ilustración:



lustración No. 6.- Esquema de fuerzas que actúan sobre partículas en lecho fluviales y sistema de coordenadas curvilíneo ortogonal s-n-z.

Fuente: F.P. Garcia-Gutiérrez [2] [4]

Las variables que intervienen en el esquema de fuerzas planteado en la ilustración 6, son las siguientes:

- "a" = Pendiente transversal del lecho.
- "Rc" = Radio de curvatura de la línea media del cauce.
- "b" = Dirección de la trayectoria de partículas
- Fd = Fuerza de arrastre, con dirección "y del eje s"
- Fl = Fuerza de sustentación, con dirección "z"
- w = Peso sumergido de la partícula – vertical hacia abajo.
- Fr = Fuerzas resistivas = f(m,Fl,w);
- m= coef. de fricción dinámico entre las partículas del lecho que se mueven y las que permanecen en el lecho.
- t = Esfuerzo de corte en el lecho, con dirección " s del eje s"
- Fc = Fuerza centrifuga.

El sistema coordenado curvilíneo ortogonal, que se sitúa sobre el lecho, se define como sigue:

"s" – Curvilínea en línea central del canal principal.
"n" – Perpendicular a "s" y "z"
"z" – Perpendicular a "s" y "n"

La ecuación según García Gutiérrez [2] [4], que describe el movimiento de sedimentos o partículas, tomando las variables descritas está dada por:

$$\overline{Fd} + \omega \operatorname{Tan}\phi\ \bar{e}_s + \omega \operatorname{Tan}\alpha\ \bar{e}_n + \overline{Fr} + \overline{Fc} = 0 \quad (2)$$

Donde:

Fd = Vector Fuerza de arrastre.
Fr = Vector Fuerza resistiva.
w Tan j e_s = Fuerza gravitacional hacia aguas abajo.
w Tan a e_n = Fuerza gravitacional transversal.
Fc =Vector fuerza centrífuga.
e_s, e_n = Vectores unitarios en dirección del flujo "s" y perpendicular al mismo "n".

Como lo que se requiere son los componentes de esta ecuación en la dirección principal del flujo, que se denomina "s" y que en sentido físico describe la trayectoria curvilínea del flujo, de la relación (2) se desprende que en la dirección s del flujo principal, la ecuación del movimiento es:

$$Fds + \omega \operatorname{Tan}\phi = \mu(\omega - r\,Fds) \quad (3)$$

Donde:

- Todo el término de la derecha corresponden a las fuerzas resistivas de coulomb (Fr) de la relación (2) a través de los componentes del peso sumergido (W) y de la fuerza de sustentación (Fl). (Es decir: Fr = f(m,Fl, W)).

Analíticamente el componente de las Fuerzas resistivas, está dado por la siguiente relación, que corresponde al mencionado término de la derecha de la ecuación (3):

$$|Fr| = \mu * W - \mu * r * Fds \quad (4)$$

Donde:

- Fds = Componente de la fuerzas de arrastre en dirección "s".

- m*W = Es la resistencia debida al peso sumergido de las partículas.

- m*r*Fds = Es la resistencia debida al componente de sustentación (el componente se considera positivo hacia arriba).

- r = Coeficiente que relaciona los coeficientes de arrastre (Cd) y de sustentación (Cl).

- m = Coeficiente de fricción dinámico de Coulomb. Generalmente se determina experimentalmente. Este depende de las propiedades de las partículas y de su movimiento, y del fluido en el cual se desplazan.

La relación (3) está expresada en términos de las fuerzas que actúan sobre las partículas; sin embargo, y como quiera que se precisa tener expresiones en función del área efectiva del lecho sobre la cual actúa el flujo (Ab), al dividir la relación (3) por dicha Área se tiene la relación en función de los esfuerzos o tensiones (expresados como fuerzas divididas entre las áreas que actúan). Así la ecuación (3), queda escrita en la siguiente forma:

$$\tau_o + Wi Tan\phi = Tr + Tl \quad (5)$$

Donde:

- t_o = Esfuerzo de corte que ejerce el fluido sobre el área del lecho. Este se corresponde con el valor de Fds/Ab.

- Tr = Esfuerzo o Resistencia de corte debido al movimiento de las partículas. Este es función de las fuerzas resistivas que están compuestas por los componentes del Peso sumergido W y de las fuerzas de sustentación Fl en sentido del flujo. Este se corresponde con las fuerzas resistivas "Fr" de la relación (3) y (4).

- Tl = Es el esfuerzo residual que soporta el lecho inmóvil y es igual al esfuerzo de corte en el umbral

del inicio de movimiento, es decir la tensión de corte crítica en el lecho (τ_c).

- W´= W/Ab = Es el peso sumergido por unidad de área del lecho.

- W´Tanϕ = Componente del peso sumergido por unidad de área del lecho en sentido de la dirección "s".

- Tanϕ = Pendiente del lecho. Como generalmente este valor es pequeño, puede obviarse.

Finalmente, con las relaciones en la forma de la ec. (3) o (5), se está en posición de poder determinar las variables necesarias para completar el análisis.

4.1.- Peso sumergido por unidad de area del lecho (w´)

Incluyendo la relación dada por (4) y la expresión para la Tensión residual, en la relación (5), esta finalmente queda en la siguiente forma:

$$\tau_o = \mu * \frac{W}{Ab} - \mu * r * \tau_o + \tau_c \qquad (6)$$

Operando para obtener W´, se tiene:

$$Wi = \frac{\tau_o (1 + \mu * r) - \tau_c}{\mu} \qquad (7)$$

Donde:

W´ = Peso sumergido de la partícula por unidad de área del lecho.
W = Peso sumergido de la partícula.
τ_o = Esfuerzo de corte que ejerce el fluido sobre el área del lecho.
τ_c = Esfuerzo de corte crítico que ejerce el fluido sobre el área del lecho, y que es el necesario para el inicio del movimiento de las partículas.

El valor del peso sumergido "W" de la partícula, asumiendo que estas sean esféricas está dado por:

$$\omega = \frac{4}{3} \rho \pi \Delta g \left(\frac{D_s}{2} \right)^3 \qquad (7)A$$

Donde:

w = Peso sumergido de la partícula.
r = Densidad de fluido.
r_s = Densidad de la partícula.
g = Aceleración de la gravedad.
Ds = Diámetro de la partícula.

El valor de D, representa la gravedad específica de los sedimentos y está dada por:

$$\Delta = \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \qquad (7)B$$

Observe el lector que si no se toma en cuenta el efecto de la sustentación de la partícula, la relación (7) daría valores menores o mayores del Area unitaria "W´" (Ver apartado 4.2.-), dependiendo de lo siguiente:

- Disposición de las partículas. Sean sedimentos naturales o partículas esféricas.

- Zona de rugosidad del flujo en función del Número de Reynolds de corte de la partícula.

Lo mencionado en el párrafo anterior merece un análisis particular acerca de la fuerza de sustentación que actúa sobre la partícula y su valor numérico, el mismo que se incluye en el siguiente apartado.

4.2.- La relacion entre el coeficiente de arrastre y sustentacion (cd/cl)

La sustentación de la partícula funciona en la misma dirección del peso sumergido, es decir en dirección perpendicular al plano de movimiento de las partículas como se puede ver en la Ilustración No. 6.

Durante muchos años se pensó que la relación entre arrastre y sustentación tenía un valor constante y, además, que este era positivo (hacia arriba) y numéricamente igual a 0,5. Esto implicaba que la sustentación – al tener el sentido opuesto al peso sumergido- facilitaba el proceso de inicio del movimiento de las partículas, teniendo un valor inferior del esfuerzo de corte crítico.

En investigaciones realizadas por C.S. James [2] con sedimentos naturales y partículas esféricas, éste nota que los resultados de Apperley y Bagnold corresponden más a las condiciones observadas en sus experiencias y que por lo tanto puede tomarse el valor de "r" = 0.5 solamente para valores relativamente grandes de Rw*, que expresa el número de Reynolds de corte de la partícula. Para valores menores de Rw*, observa que la relación se hace negativa y que los resultados de Watters y Rao indican que la variación depende de manera significante en la naturaleza de la configuración de las partículas. Es de hacer notar que la configuración de sedimentos naturales está más de acuerdo con la realidad observada en canales aluviales ya que en esta situación el material sólido está menos expuesto al efecto del flujo que en la condición de partícula esférica.

Como quiera que este último análisis, aparte de incluir las teorías mencionadas, toma en cuenta mediciones propias para las condiciones mencionadas, llegando así a establecer relaciones analíticas de mejor ajuste, es que se incluye dentro de este estudio como uno de los más concluyentes en el tema y de más actualidad. Así pues las relaciones propuestas por James en 1990 son las que siguen:

- Para sedimentos naturales:

$$Cl/Cd = 0.5; \text{ para } Rw^* \geq 150. \quad (8)$$

$$Cl/Cd = -0.560 + 0.212 \ln Rw^*; \text{ para } Rw^* < 150.$$

- Para esferas solas en lecho de esferas:

$$Cl/Cd = 0.5; \text{ para } Rw^* \geq 15. \quad (9)$$

$$Cl/Cd = -3.509 + 1.472 \ln Rw^*; \text{ para } Rw^* < 15.$$

De acuerdo a James, la marcada diferencia entre estas funciones para el número de Reynolds en la región de transición indican la alta sensibilidad del modelo con respecto a la estimación de la fuerza de sustentación. Esta sensibilidad enfatiza el pobre entendimiento que se tiene del fenómeno de "iniciación del movimiento de partículas y su incorporación al flujo" ("entrainment" en la literatura Anglo-sajona) en la zona de transición.

Se debe observar que el valor de "r", toma valores negativos hasta llegar a la zona de transición de rugosidad y que, consecuentemente actúa en la misma dirección que el peso sumergido, por lo tanto, aumenta la resistencia. Por otra parte, y a partir del inicio de la zona turbulenta, este actúa en dirección hacia arriba – opuesta al peso sumergido- y disminuye el valor del componente de las fuerzas resistivas.

El hecho que se acaba de mencionar es de suma importancia - ya que el efecto de la sustentación ha sido ignorado por muchos autores- y este demuestra que la resistencia es mayor hasta la zona de transición, y por lo tanto el esfuerzo que debe ejercer el flujo para iniciar el movimiento de la partícula (esfuerzo de corte crítico) será mayor que en el caso en que la sustentación no se tome en cuenta. De manera similar, a partir del inicio de la zona turbulenta la fuerza de resistencia será menor a la que se deriva si no se toma en cuenta la sustentación y en consecuencia el esfuerzo de corte crítico será menor en estas condiciones.

Es relevante hacer notar que la configuración de las partículas en el lecho, bien sean sedimentos naturales o partículas esféricas, es importante en el momento de evaluar las variables sedimentológicas.

4.3.- Tension de corte critica (*c)

Es importante introducir la relación que –basada en la ecuación (3)- lleva a establecer el valor del esfuerzo de corte que ejerce el flujo sobre las partículas del lecho que produce el inicio del movimiento; dicho esfuerzo de corte recibe el nombre de crítico.

Dicha relación es la siguiente:

$$\tau^*_c = \frac{4}{3} \frac{\mu}{c\,(1 + \mu r)\,Cd} \quad (10)$$

Donde:

- t^*_c = Tensión de corte crítica adimensional. (Ref. Tensión de corte crítica de Shields).
- r = Coeficiente que relaciona los coeficientes de arrastre (Cd) y de sustentación (Cl).
- m = Coeficiente de fricción dinámico de Coulomb. Generalmente se determina experimentalmente. Este depende de las propiedades de las partículas y de su movimiento, y del fluido en el cual se desplazan.
- c = (Ubs/U*)2, valor adimensional que relaciona la velocidad del flujo a nivel del lecho y el valor de la velocidad de corte.
- U* = Velocidad de corte.

El valor de la izquierda de la ec. (10), está dado por:

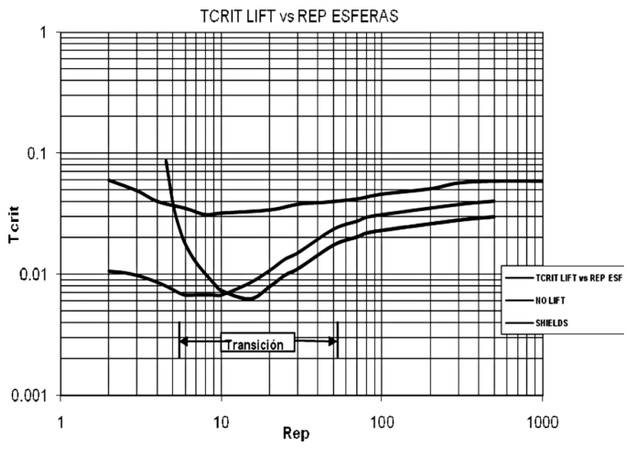
$$\frac{\tau cs}{\rho\, g\, \Delta\, D_s} = \tau^{*} c \qquad (11)$$

Donde:

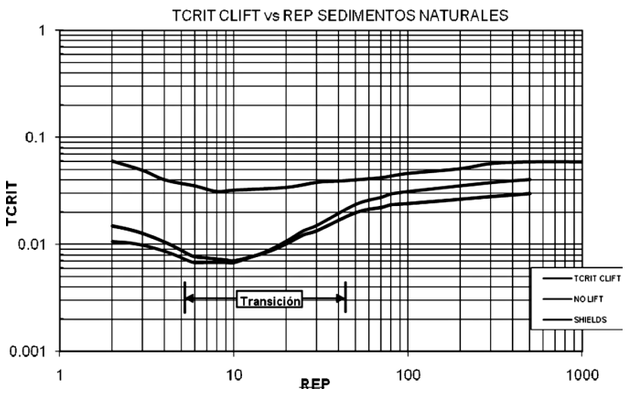
t_{cs} = Esfuerzo de corte crítico.
r = Densidad de fluido.
D = Gravedad específica del sedimento dada por (7)B..
g = Aceleración de la gravedad.
Ds = Diámetro de la partícula.

La relación (10) es clara en cuanto a la inclusión del componente de sustentación y su importancia en la evaluación del proceso. Si este no se incluye, el denominador de (10) sería menor, con lo que se tendría un valor mayor del esfuerzo crítico necesario para el inicio del movimiento de las partículas.

Para aclarar la situación en lo que se refiere a la inclusión de la sustentación en la evaluación del esfuerzo de corte crítico, se incluyen las gráficas 1 y 2 donde se aprecia de forma comparativa los esfuerzos de corte críticos "adimensionales" dados por Shields, con aquéllos que provienen de la aplicación de las relaciones (10) y (11) con sustentación (Lift) y sin sustentación (no-lift); para los dos casos, es decir para partículas de sedimentos naturales y esferoides.



Grafica 1.- Tensiones de corte críticas adimensionales para esferoides según Shields, y según Garcia-Gutierrez con y sin sustentación [2] [3]



Grafica 2.- Tensiones de corte críticas adimensionales para sedimentos naturales según Shields, y según Garcia-Gutierrez con y sin sustentación [2] [3]

4.4.- Velocidad de la particula en el lecho (vps)

Si, nuevamente, se toma la ecuación del movimiento dinámico de las partículas (3) y se efectúan operaciones [2] –las mismas que se obvian en el presente por simplicidad-, se llega a establecer que la Velocidad de la partícula a nivel del lecho (Vps) en dirección principal del flujo; esta dada por :

$$Vps = Ubs\left(1 - \left(\frac{\tau^{*} c}{\tau^{*}}\right)^{1/2}\right) \qquad (12)$$

Donde:

Ubs = Velocidad de flujo cercana al lecho.
Vps = Velocidad de la partícula en el lecho.
t^{*} = Tensión de corte adimensional de Shields.
t^{*}_{c} = Tensión de corte crítica adimensional. Definida por (11).

4.5.- Velocidad del flujo en el lecho (ubs)

La velocidad del flujo a nivel del lecho se establece en función de las condiciones de rugosidad con dos modelos [2], el de Rotta y el de Prandtl, a un nivel equivalente a un diámetro o a medio diámetro de partículas sobre el lecho, y a partir de los resultados se tiene disponible el valor de la constante "c", (Ver ec. (10)) que es necesaria para poder evaluar todo el proceso.

5.- ECUACION DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Introduciendo las relaciones (12) para la Velocidad de la partícula en el lecho y la (7) para el peso sumergido por unidad de área del lecho, en la ecuación (1), se tiene, finalmente, la relación de transporte de carga de fondo de sedimentos:

$$i_b = \frac{\tau_o(1+\mu r)-\tau_c}{\mu}\left[cU^*\left(1-\left(\frac{\tau^*_c}{\tau^*}\right)^{1/2}\right)\right] \quad (13)$$

Donde:

- t* = Tensión de corte adimensional.
- t*c = Tensión de corte crítica adimensional. Definida por (11).
- to = Esfuerzo de corte que ejerce el fluido sobre el área del lecho.
- tc = Esfuerzo de corte crítico que ejerce el fluido sobre el área del lecho, y que es el necesario para el inicio del movimiento de las partículas.
- c = (Ubs/U*)2, valor adimensional que relaciona la velocidad del flujo a nivel del lecho y el valor de la velocidad de corte.
- r = Coeficiente que relaciona los coeficientes de arrastre (Cd) y de sustentación (Cl).
- m = Coeficiente de fricción dinámico de Coulomb. Generalmente se determina experimentalmente. Este depende de las propiedades de las partículas y de su movimiento, y del fluido en el cual se desplazan.

5.1.- Análisis de sensibilidad

El esfuerzo de corte crítico, de acuerdo a (10) es proporcional a;

$$\tau_c \alpha \frac{\mu}{1+\mu r} \quad (10A)$$

Dados los siguientes valores referenciales de:

$$\mu = 0{,}7; r = 0{,}5(+); r = -0{,}2(-)$$

(Nota. El valor de r es variable según las condiciones de flujo y no constante. Ver 4.2).

Se tiene que los esfuerzos de Corte serìan proporcionales a:

DESCRIPCION	VALOR DE c	COMENTARIO
SIN LIFT	0,7	
CON LIFT (+ positivo)	0,52	CON LIFT (+) <SIN LIFT
CON LIFT (- negativo)	0,813	CON LIFT (-) >SIN LIFT

Fuente: Elaboración Propia

Por otra parte, el peso sumergido por unidad de área del lecho W´, es proporcional a:

$$W` \alpha \frac{1+\mu r}{\mu} \quad (7)A$$

Con los mismos valores anteriores, se tiene que “W´”:

DESCRIPCION	VALOR DE W´	COMENTARIO
SIN LIFT	1,43	ESTE ES EL COMUNMENTE UTILIZADO
CON LIFT (+)	1,93	CON LIFT>SIN LIFT (+36%)
CON LIFT (-)	1,224	CON LIFT<SIN LIFT (-15%)

Fuente: Elaboración Propia

6.- RESULTADOS DE LA ECUACIÓN VERSUS OTROS AUTORES

Como quiera que la obtención de valores de la descarga de fondo en cauces aluviales es bastante tediosa y requiere de instrumentos especiales, aparte de experiencia, es difícil obtener mediciones directas en cauces naturales y, generalmente, se las efectúa en laboratorio.

Atendiendo a lo dicho, es que en la mayoría de las ocasiones se recurre a relaciones conocidas y que han sido probadas, para así obviar mediciones bajo condiciones de flujo y transporte de material granular del lecho, que muchas veces no son controladas.

Para comparar la bondad de la ecuación descrita, se la ha comparado con las siguientes ecuaciones y

metodologías; Duboys (1879), Shields (1936), Meyer-Peter Muller (1948), Einstein-Brown (1942-1950), y Ashida y Michiue (1970).

Para efectuar el estudio comparativo se utilizaron datos de carácter hidráulico y de sedimentos de la estación de Abapó en el Rio Grande en Santa Cruz – Bolivia, evaluados por el autor del presente trabajo, los mismos que se presentan en el Cuadro No.1.

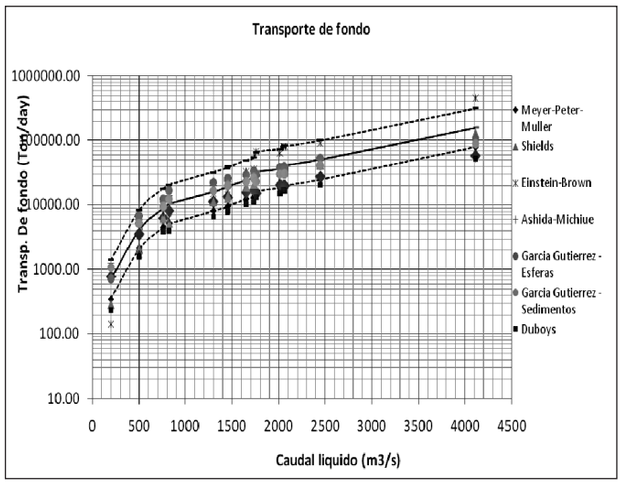
MUESTRA Nº	FLUJO MEDIO DIARIO (M3/S)	Caudal por unidad de ancho – qw (m2/s)	Ancho de flujo B (m)	Diámetro mediano particulas d50 (mm)	Pendiente de energía. S (m/m)
2009	201	2.052	97.83	0.151	0.000480
2	505	3.881	130.28	0.194	0.000810
3	760	5.144	147.94	0.165	0.001022
1	830	5.466	152.05	0.249	0.001074
7	1300	7.448	174.82	0.214	0.001053
5	1450	8.015	180.86	0.244	0.001105
14	1460	8.052	181.25	0.213	0.001108
10	1650	8.756	188.28	0.203	0.001170
8	1740	9.104	191.41	0.206	0.001198
13	1760	9.170	192.09	0.138	0.001204
12	2020	10.071	200.50	0.187	0.001280
6	2050	10.186	201.42	0.163	0.001288
4	2070	10.252	202.03	0.165	0.001294
9	2450	11.505	212.91	0.217	0.001394
11	4110	18.035	228.00	0.234	0.001754

Fuente: Elaboración Propia

Cuadro No 1.- Datos Hidráulicos y característica de sedimentos del lecho de la Estación Abapó

Los resultados numéricos de la aplicación de las diversas metodologías se muestra en el Cuadro No.2, en los cuales –y para poder apreciar mejor los resultados- se tiene la cantidad de sedimentos por unidad de tiempo en Toneladas métricas/dia (Ton/dia).

Los resultados también se presentan en la Gráfica No. 3, donde puede apreciarse, que todas las metodologías –incluyendo las del autor- siguen la misma tendencia.



Grafica 3.- Resultados de aplicación de formulas de Transporte de carga fondo para la estación de Abapo – Rio Grande – Santa Cruz –Bolivia

Para poder tener una idea comparativa mas real de la actuación y bondad de las metodologías estudiadas, se procedió a obtener el valor medio de todas éllas con excepción de los resultados obtenidos por la metodología

TRANSPORTE DE FONDO EN TON/DIA

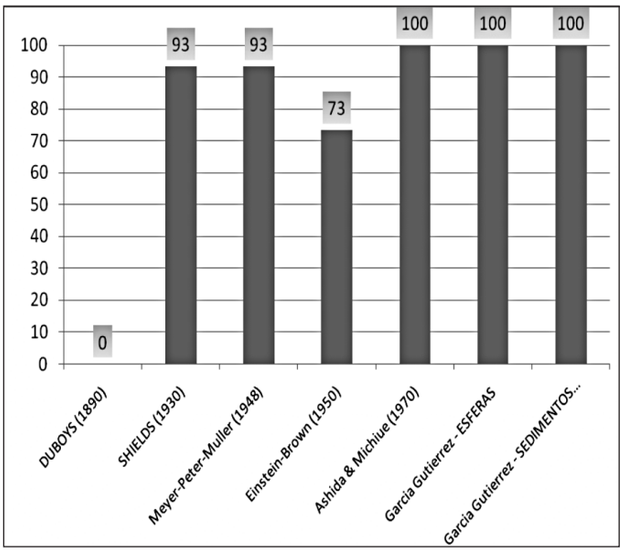
MUESTRA No	FLUJO MEDIO DIARIO (M3/S)	DUBOYS (1879)	SHIELDS (1930)	Meyer-Peter Muller (1948)	Einstein-Brown (1950)	Ashida & Michiue (1970)	Garcia Gutierrez - ESFERAS	Garcia Gutierrez - SEDIMENTOS NATURALES
2009	201	233.68	286.24	762.82	141.58	1220.82	695.05	1072.73
2	505	1562.94	2026.58	3465.36	1712.39	5854.97	6808.34	5182.92
3	760	3798.31	6124.26	6268.84	7678.29	10928.40	12409.41	9334.01
1	830	3957.52	5200.73	8075.87	5910.28	13840.97	16330.47	12310.19
7	1300	6533.59	11245.35	11142.09	15021.30	19496.73	22203.21	16659.41
5	1450	7607.20	12539.48	13586.35	17439.93	23551.13	24971.82	19931.69
14	1460	8072.74	13985.76	13141.72	20963.40	23057.23	25867.39	19497.43
10	1650	10236.06	18850.50	15389.54	31564.42	27228.63	29371.95	23121.70
8	1740	11240.63	20915.10	16794.23	36254.29	29576.73	32403.84	25459.41
13	1760	13047.03	33154.42	15019.83	67528.91	27072.46	29210.39	22978.87
12	2020	15146.38	31879.89	20086.79	62683.30	35756.28	38450.22	30326.54
6	2050	16270.52	38757.84	19662.97	79790.70	35229.59	37628.41	30234.64
4	2070	16491.58	38882.90	19928.31	80514.64	35858.26	38212.39	29795.42
9	2450	20423.10	41023.42	27580.25	89725.32	49128.35	52553.53	39751.94
11	4110	50472.14	129503.57	57021.06	453886.03	103789.98	104555.72	86620.61

Cuadro No 2.- Resultados de aplicación de ecuaciones de Transporte de fondo a la Estación Abapó Rio Grande – Santa Cruz – Bolivia

de García-Gutiérrez –cuyos resultados son los que se quieren verificar - (línea continua en la gráfica No 3) y, a fines de poder comparar la bondad de ajuste de las relaciones del autor, se seleccionaron aquéllos datos que se encuentren a "+/- _" de la desviación con relación a la media obtenida (trazo discontinuo en la gráfica 3). Este tipo de comparación es práctica común en estudios comparativos como el que se presenta.

7.- CONCLUSIONES

El resultado de aquéllos valores que caen dentro del rango indicado en el párrafo anterior en forma de porcentaje con respecto al total, se muestran en la gráfica No. 4, para cada una de las metodologías; y a partir de éllos se puede ver la bondad de los resultados de las metodologías estudiadas y, de forma particular, de las ecuaciones que se presentan en el presente artículo.



Grafica 4.- Resultados comparativos de aplicación de formulas de Transporte de Fondo – Valores dentro del rango +/- 1/2 de la media - Estación de Abapo – Rio Grande – Santa Cruz –Bolivia

De todas maneras cabe aclarar que, todas las metodologías requieren de algún tipo de dato en particular en relación a las variables hidro-sedimentológicas del cauce fluvial que se quiera estudiar y, en consecuencia se considera que todas ellas son de valor en la apreciación del fenómeno.

El hecho que la relación de Duboys, no muestre resultados dentro del rango puede ser ajustado a través de un coeficiente, ya que el principio de la cual esta se desprende es similar a las demás relaciones, y de esa manera se tendría mejores resultados numéricos.

De todas maneras, es evidente la tendencia general de todas las relaciones, y ese hecho es el que debe valorarse.

Se presenta pues, una relación que –al incluir las variables dinámicas que intervienen en el proceso de movimiento de partículas en el lecho- dá buenos resultados comparados con metodologías similares.

REFERENCiAS

1. GARCIA GUTIERREZ, Francisco Pablo & FERNANDEZ BONO, Juan Francisco.

   "AN ALTERNATIVE METHOD TO ESTIMATE THE STABLE TRANSVERSE BED SLOPE IN CURVED ALLUVIAL CHANNELS" – THE GARCIA-GUTIERREZ EQUATION" Proc. XXIV Congress "International Association for Hydraulic Research", IAHR.

   Palacio de los Congresos - Madrid – España. 1991.

2. GARCIA GUTIERREZ, Francisco Pablo.
   "ESTUDIO DEL FLUJO LIQUIDO Y MASICO Y SUS INTERACCIONES, PARA ALTOS NUMEROS DE FROUDE, EN CAUCES ABIERTOS NATURALES – ALUVIALES CON MEANDROS. ANALISIS Y MODELACION DE LA EVOLUCION DEL LECHO Y MIGRACION DEL CAUCE."

   TESIS DOCTORAL (CUM LAUDE) como requisito parcial para el título de "Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos."

   Depto. de Ing. Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia,.
   España. 1994.

3. GARCIA GUTIERREZ, Francisco Pablo.
   "UN MODELO DINÁMICO PARA EL MOVIMIENTO DE PARTÍCULAS Y SEDIMENTOS EN LECHOS DE CAUCES NATURALES ALUVIALES". - PONENCIA MAGISTRAL –CUARTO CONGRESO NACIONAL DE ESTUDIANTES DE INGENIERIA CIVIL UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES. Pp. 41. JULIO DEL 2008. LA PAZ - BOLIVIA

4. RAUDKIVI, A.J.
   "LOOSE BOUNDARY HYDRAULICS".
   Pergamon Press, Oxford, U.K., 2nd. Ed., 1976.