



Mecánica del transporte de sedimentos en cauces de alta pendiente Modelo de Estela

Mechanics of sediment transport in high slope channels Estela Model

Jorge Alejandro Medina Rosell^{1*}; Jesús Abel Mejía Marcacuzco²;
Angel Fausto Becerra Pajuelo³

¹Universidad Nacional Agraria La Molina, Programa de Maestría en Recursos Hídricos, Lima, Perú.

²Universidad Nacional Agraria La Molina, Programa de Doctorado en Recursos Hídricos, Lima, Perú.

³Universidad Nacional Agraria La Molina, Facultad de Ingeniería Agrícola, Departamento de Recursos Hídricos, Lima, Perú.

Recepción: 01/05/2018 ; Aceptación: 05/01/2019

Resumen

En el presente trabajo, se ha estudiado la mecánica del transporte de sedimentos en el río Ica, un cauce de alta pendiente y gran rugosidad, empleando para ello el modelo de estela y el modelo de flujo de ríos HEC-RAS. Los parámetros geomorfológicos del tramo del río Ica, se han estimado utilizando los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y los parámetros hidráulicos han sido obtenidos de la aplicación del modelo HEC-RAS. El cálculo de la resistencia de la rugosidad se realizó empleando un modelo de estela, el cual considera un coeficiente de rugosidad e introduce otro, el coeficiente de estela. Los coeficientes de Estela considerados, son valores promedio recomendados en el estudio “Transporte de Material Grueso en Cauces de Alta Pendiente” debido a la imposibilidad de poder calcularlos directamente por la ausencia de registros en el río Ica. Los valores obtenidos fueron comparados con los estudios realizados por la empresa consultora Asesores Técnicos Asociados S.A. encontrándose una buena correspondencia (99,18%) entre los valores calculados. La determinación de las condiciones de inicio de movimiento de partículas, fue analizada considerando los criterios de la velocidad crítica, caudal crítico, número de Froude densimétrico y esfuerzo cortante crítico. Los resultados de inicio de movimiento de partículas muestran una correspondencia adecuada entre los criterios de esfuerzo cortante crítico y velocidad crítica. Para el estudio del transporte del material de fondo, se analizaron tres funciones de transporte de esfuerzo cortante, una función de exceso del caudal sobre su valor crítico y una función de exceso del número de Froude de la partícula sobre su valor crítico. Los resultados hallados muestran cierta similitud entre los métodos de Ackers White y Mora y una fuerte disparidad entre los otros métodos; asimismo, la curva de distribución granulométrica presenta una zona de transición en la cual las diversas formulaciones de transporte proporcionan resultados que no reflejan adecuadamente el incremento en la capacidad de transporte con la presencia de mayores caudales.

Palabras clave: rugosidad; alta pendiente; inicio de movimiento de partículas; transporte de sedimentos; coeficiente de estela.

Forma de citar el artículo: Medina *et al.*, 2019. Mecánica del transporte de sedimentos en cauces de alta pendiente Modelo de Estela. Anales Científicos 80 (1): 138-149 (2019).

DOI: <http://dx.doi.org/10.21704/ac.v80i1.1379>

Autor de correspondencia: Angel Fausto Becerra Pajuelo. Email: abecerra@lamolina.edu.pe

© Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

Abstract

In this work the mechanics of sediment transport in the Ica river, a high slope and high roughness channel, have been studied using the wake model and the HEC-RAS river flow model. The geomorphological parameters of the Ica river have been estimated using the Geographic Information Systems (GIS) and the hydraulic parameters have been obtained from the application of the HEC-RAS model. The roughness resistance calculation was performed using a wake model, which considers a roughness coefficient and introduces another, the wake coefficient. The wake coefficients considered are average values recommended in the study "Transportation of Coarse Material in High Slope Channels" due to the impossibility to calculate directly due to the absence of records in the Ica River. The values obtained were compared with the studies carried out by the consulting firm Asesores Técnicos Asociados S.A. finding a good correspondence (99.18%) between the calculated values. The determination of the conditions of the particle motion was analyzed considering the criteria of critical velocity, critical flow, densimetric Froude Number and critical shear stress. The results of the start of particle movement show an adequate correspondence between the criteria of critical shear stress and critical velocity. For the study of the bed-load transport, three functions of shear stress transport were analyzed, a function of excess flow over its critical value and a function of excess of the particle's Froude number over its critical value. The results found show some similarity between the methods of Ackers White and Mora and a strong disparity between the other methods; also, the granulometric distribution curve presents a transition zone in which the various transport formulations provide results that do not adequately reflect the increase in transport capacity with the presence of higher flows.

Keywords: roughness; high slope; start of particle motion; sediment transport; wake coefficient.

1. Introducción

En el diseño de diversas obras hidráulicas, tales como bocatomas y defensas ribereñas, se requiere el conocimiento de materias especializadas como la hidrología, hidráulica fluvial, régimen de transporte de sedimentos, entre otros, a fin de tener una idea cabal del proceso de erosión y sedimentación de ríos a lo largo del tiempo.

Este conocimiento adquiere relevancia en cauces de alta pendiente, los cuales son típicos de la sierra y de algunos cauces de la costa peruana, existiendo en la actualidad poca experiencia e investigación para determinar el coeficiente de escurrimiento, condiciones de inicio de movimiento de partículas y tasas de transporte en flujos de alta pendiente y grandes rugosidades.

El objetivo general que persigue el presente trabajo es el de definir una metodología de cálculo del transporte de sedimentos en un cauce de alta pendiente empleando para ello el modelo de estela, el sistema de información geográfica (SIG) y el modelo matemático de flujo de agua unidimensional HEC-RAS.

La presente investigación se realizó en función de tres temas principales: a) resistencia al flujo, b) inicio de movimiento de las partículas y c) relaciones de transporte.

Modelo de distribución de velocidades en contorno macrorugoso

Distintos autores han señalado que la distribución de velocidades en flujos con altas rugosidades difiere de la ley logarítmica en la cercanía al contorno rugoso.

Aguirre (1998) asume la proposición de que en la región inferior del flujo en una corriente de superficie libre, de alta rugosidad y de pendiente pronunciada podría considerarse una zona de estelas generadas por las rugosidades sobresalientes e irregulares; por consiguiente, el flujo próximo al contorno sería mucho más uniforme que el correspondiente a la distribución logarítmica; por lo que se identifican dos zonas en el campo de flujo, tal y como se ilustra en la [Figura 1](#) en la cual Θ es el ángulo de inclinación.

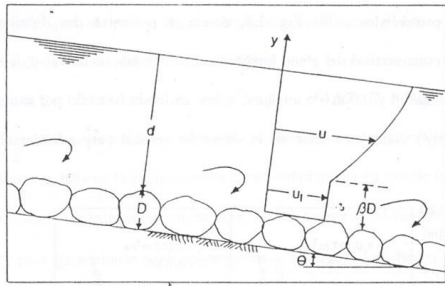


Figura 1: Distribución de velocidades considerando las estelas

En la primera zona de espesor constante y proporcional al diámetro, D , la velocidad en la dirección del flujo se supone constante e igual a u_1 (contiene las estelas generadas por los elementos rugosos). El espesor de la zona de estelas es proporcional a las rugosidades según un factor, β , que Aguirre (1998) denomina factor de estela.

En la segunda zona, ubicada sobre la primera, la velocidad variable u puede describirse mediante un perfil logarítmico.

Suponiendo que el origen de la profundidad y se ubique sobre el diámetro medio de los elementos rugosos del fondo y que el flujo bajo dicho tope sea despreciable, el perfil de velocidad estaría dado por:

$$u = \frac{u_1 \hat{\alpha} D}{d} + \frac{1}{d} \int_{\beta D}^d u \, d \quad (1)$$

En la cual β es el factor de estela; d es la profundidad medida desde el tope de los elementos rugosos; dy es la diferencial de elevación para lo cual se define u . El término integral contiene la velocidad en la zona logarítmica, dada por:

$$\frac{u}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{y}{\alpha D} \right) + B \quad (2)$$

Donde: B es la constante aditiva que toma el valor de 8,50; κ es la constante de Von Karman; U_* es la velocidad de corte; α es un factor de textura relacionado con el valor normalizado de Nikuradse por la igualdad:

$$K_s = \alpha D \quad (3)$$

Introduciendo la ecuación 2 en la ecuación 1 e integrando se obtiene:

$$\frac{u}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{d}{\alpha D} \right) + B - \frac{1}{\kappa} + \frac{\hat{\alpha} D}{\kappa d} + \frac{\hat{\alpha} D}{d} \left(\frac{u_1}{u_*} - \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{\hat{\alpha} D}{\alpha D} \right) - B \right) \quad (4)$$

Pero como en la ecuación 4, $u = u_1$ para $y = \beta D$, resulta que los términos en el paréntesis de la ecuación 4, se anulan entre sí y ella se reduce a:

$$\frac{u}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{d}{\alpha D} \right) + B - \frac{1}{\kappa} + \frac{1}{\kappa} \frac{\hat{\alpha} D}{d} \quad (5)$$

Finalmente, la ecuación 5 expresa la distribución de velocidades en un canal macrorugoso de gran pendiente de acuerdo a la formulación del modelo de estela.

Relaciones de resistencia para cauces en alta pendiente

Entre los estudios semianalíticos y experimentales realizados para establecer las leyes de resistencia en corrientes naturales macrorugosas, tenemos los de Bathurst, Thompson y Campbell, Griffiths, descritos en Bathurst (1985), además de las relaciones de Jarret (1984). Todas estas formulaciones, cuales fueron expresados por Aguirre (1998), con respecto al patrón dado por la ecuación de Keulegan, pudiendo escribirse como:

$$f = \frac{1}{\left[2.0 \log \left(\frac{1.1 d}{\alpha_i D_i} \right) \right]^2} \quad (6)$$

Donde D_i y α_i , equivale a la rugosidad de Nikuradse (Tabla 1).

Obviamente, existen otras formulaciones que no pueden ser ajustadas a la forma de la ecuación 6 y que son igual de importantes.

En este punto, es importante señalar que las diferentes expresiones presentadas producen errores que llegan a ser del orden del 30 % en la estimación de la velocidad media en ríos de montaña y por consiguiente su empleo debe realizarse con cautela, especialmente

en el rango de pendientes del 0,40 % al 00 % y para sumersiones relativamente pequeñas, $d/D_{84} < 6$.

Tabla 1: Valores de las variables D_i y α_i

Ecuación	Investigador	D_i	α_i
1	Keulegan	Ks	1,00
2	Leopold	D_{84}	3,57
3	Limerinos	D_{84}	2,98
4	Hey	D_{84}	3,35
5	Bray	D_{50}	0,90
6	Graf	D_{50}	3,01
7	Graf	D_{84}	2,24
8	Bathurst	D_{84}	2,24

Las discrepancias existentes entre estas ecuaciones se deben a que la resistencia al flujo está relacionada con las irregularidades de las formas y con la ubicación espacial de los elementos rugosos, siendo especialmente significativo en el caso de piedras y peñones, que sobrepasan el fondo medio, las cuales producen una resistencia adicional, tal y como lo señala [Aguirre \(1998\)](#).

El modelo de estela para flujo macrorugoso

El modelo de estela considera que la zona de estelas es generada por las rugosidades sobresalientes e irregulares, por lo que el flujo próximo al contorno sería más uniforme que el correspondiente a la distribución logarítmica. Escribiendo la ecuación 5 en función al coeficiente de Chezy, tenemos:

$$C^* = C_0^* + \frac{1}{\kappa} \frac{\hat{a}D}{d} \tag{7}$$

$$C_0^* = \sqrt{\frac{8}{f_0}} = \frac{1}{\kappa} h \left(\frac{d}{\alpha D} \right) + B - \frac{1}{\kappa} \tag{8}$$

Donde: C_0^* , es el coeficiente de Chezy; f_0 , el factor de fricción de Darcy-Weisbach.

Si se observa la ecuación 7, se muestra en forma evidente que, para rugosidades relativas altas, es decir, D/d apreciable, se

obtiene una resistencia al flujo diferente del valor para pequeñas rugosidades.

Los valores de los coeficientes de textura y estela, α y β respectivamente, se calculan realizando un análisis de regresión lineal simple al conjunto de ecuaciones 9.

$$\begin{aligned}
 Y &= A + \beta X \\
 Y &= 1 + 0.40 C^* - 8.5 + h X \\
 A &= -h \alpha \\
 X &= \frac{D}{d}
 \end{aligned} \tag{9}$$

Cuando no se dispone de los valores α y β para un tramo de río en el cual se requiere predecir la resistencia, se puede emplear la ecuación 7 con los valores de α y β de otro río semejante calibrado, o aún se pueden emplear los valores medios obtenidos por [Aguirre Pe \(1998\)](#).

De los análisis realizados, la curva de mejor ajuste, para el conjunto de ríos considerados, corresponde a $\alpha = 6,80$ y $\beta = 0,30$ para un diámetro D_{50} , la cual produce un error medio absoluto porcentual en la estimación de la velocidad del 28 % y son aplicables en los siguientes rangos:

$$0,70 < (D/d_{50}) < 100$$

$$0,001 < S < 0,06$$

Esfuerzo cortante crítico

La relación mejor conocida para describir la iniciación del movimiento de las partículas según este criterio, fue propuesta por [Shields en 1936](#), [Van Rijn \(1993\)](#), quien describe el inicio del movimiento de las partículas como la relación entre dos parámetros adimensionales: el parámetro de Shields y el índice de inestabilidad; ello cuando hay influencia de la subcapa laminar ([Figura 2](#)).

- Parámetro de Shields

$$\tau_c^* = \frac{(\tau_o)_c}{(\gamma_s - \gamma)d} \tag{10}$$

- Índice de inestabilidad

$$Re_* = (V*d) / \nu \quad (11)$$

Para canales empinados, Van Rijn (1993) sugirió definir el parámetro de Shields como $(\frac{\sin(\phi_s - \theta)}{\sin(\phi_s)}) \tau_c^*$, donde ϕ_s , es el ángulo de reposo y θ , es la pendiente del lecho y τ_c^* es el parámetro de Shields

El modelo de estela

Las condiciones críticas de iniciación del movimiento de las partículas son establecidas cuando el momento dado por las fuerzas actuantes F_D del fluido en movimiento es igualado con el momento producido por las fuerzas del cuerpo F_G , alrededor de algún

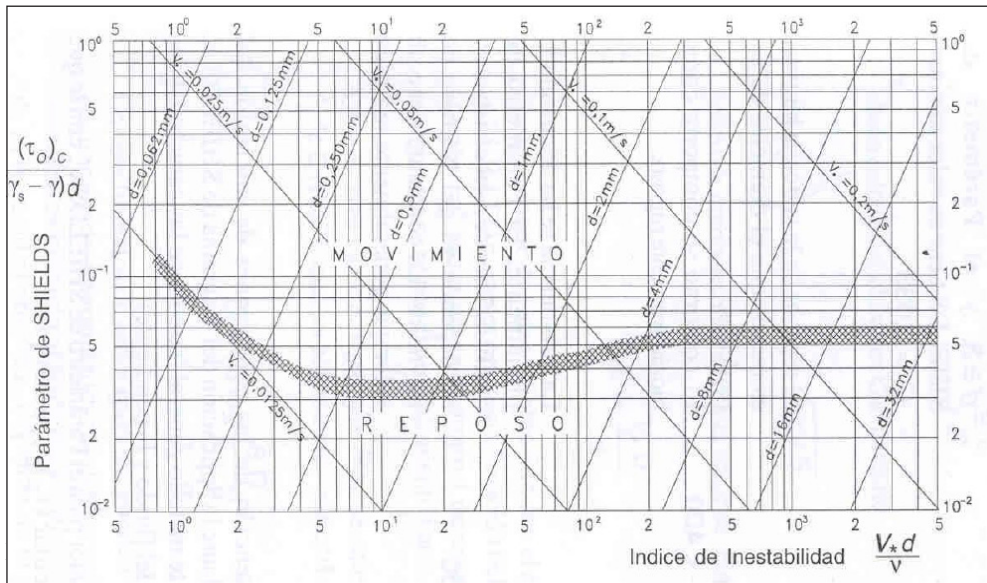


Figura 2: Diagrama de Shields (1936)

Velocidad media crítica

La velocidad media crítica es estimada a partir de los resultados de las investigaciones realizadas por Maza y García. La fórmula planteada es función del tirante de la corriente y por tanto para evaluarla es necesario especificar el diámetro de las partículas.

$$U_c = (\gamma_s - \gamma)^{1/2} D^{0.35} R_H^{0.15} \quad (12)$$

Esta formulación es válida para tirantes comprendidos entre 0,40 y 10,00 m y para diámetros de lecho comprendidos en el intervalo $0,0001 < D < 0,40 \text{ m}$.

punto (Figura 3).

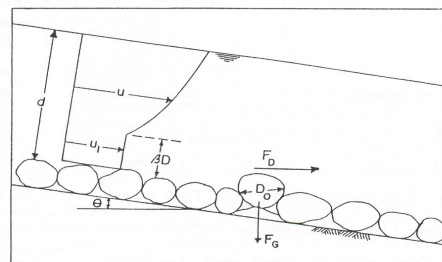


Figura 3: Acción del flujo de agua sobre una partícula suelta

Bajo la condición de que exista una zona de estela cerca del lecho, y suponiendo en un primer grado de aproximación, una velocidad media constante de valor u_1 , las condiciones críticas se establecerán para $u_{1c} = u_{1c}$, lo cual da:

$$(p\delta_1 u_{1c}^2 D_0^3) / ((p_s - p)\delta_2 g D_0^4 \cos\theta(\tan\phi - \tan\theta)) = 1 \quad (13)$$

δ_1 y δ_2 , son factores que dependen de la velocidad del fluido en el contorno y la forma de la partícula, D_0 , es el diámetro de la partícula sujeto a condiciones críticas, D , es el diámetro medio de las partículas de acuerdo a $D_0 = \delta_3 D$, donde δ_3 es una constante. Se admite asimismo que la velocidad sigue la ley logarítmica de Prandtl-von Karman para $y \geq \beta D$, donde "y" es la distancia desde el tope del lecho y β el factor de estela.

De acuerdo al modelo de estela, se tiene que para $y = \beta D$, la velocidad crítica u_{1c} se encuentra expresada como:

$$\frac{U_{1c}}{U_*} = \frac{1}{0.40} \ln \frac{\beta D}{\alpha D} + 8.50 \quad (14)$$

α , es el factor de textura, u_{*c} es la velocidad de corte crítica que se expresa como U_c/C_c , donde U es la velocidad crítica media del flujo y C_c el coeficiente adimensional crítico de Chezy, modificado por Aguirre Pe y Fuentes.

Igualando las ecuaciones 13 y 14 tenemos:

$$\frac{U_c}{(g \Delta D_0 \cos\theta(\tan\phi - \tan\theta))^{1/2}} = \frac{\left(\frac{\delta_2}{\delta_1}\right)^{1/2}}{\frac{1}{0.40} \ln \frac{\beta}{\alpha} + 8.50} C_c \quad (15)$$

Donde:

$$C_c = 2.50 \ln(d/\alpha D) + 6.00 + 2.50(\beta D/d) \quad (16)$$

Ahora bien, los valores de α , β , δ dependen de la forma, el tamaño relativo de los elementos y de las condiciones de flujo por lo que, según Aguirre (1998), una formulación para el número de Froude crítico de las partículas, F_c^* , debería estar dada por la siguiente relación funcional:

$$F_c^* = \frac{U_c}{(g \Delta D_0 \cos\theta(\tan\phi - \tan\theta))^{1/2}} \quad (17)$$

Considerando valores para $\alpha=2,40$, $\beta=1,30$ y un valor supuesto de $(\delta_2/\delta_1)=1,40$, que son valores que se aproximan a diversos casos de laboratorio, se encuentra la ecuación 18 que representa adecuadamente los datos experimentales.

$$F_c^* = 0,90 + 0,50 \ln(d/D) + 1,30(D/d) \quad (18)$$

Transporte en función del esfuerzo cortante

De la revisión bibliográfica efectuada, las relaciones de transporte más empleados y de fácil aplicación para calcular el transporte de material sólido en cauces de alta pendiente en función al criterio de esfuerzo cortante son el Método de Van Rijn, el método de Ackers-White y el método de Meyer-Peter y Muller.

El método de Van Rijn representa un avance significativo en la estimación del transporte sólido y la resistencia al escurrimiento debido al rigor teórico que presenta en sus análisis. Además de considerar el transporte sólido de fondo separado del transporte de sólidos en suspensión, Van Rijn procura estudiar y definir los criterios para identificar el inicio del transporte de sólidos en suspensión. La experimentación realizada para el cálculo del transporte de sólidos de fondo, fue desarrollado en base a 580 experimentos con partículas comprendidas entre 0,20 y 2,00 mm. La fórmula propuesta para cuantificar el transporte de sedimentos es la siguiente:

$$q_s = \frac{0.0053 \{(s-1)g\}^{0.5} T^{2.1} D_{50}^{1.5}}{D_{gr}^{0.3}} \quad (19)$$

Donde T , es un parámetro adimensional que expresa la movilidad de las partículas, D_{gr} , es el diámetro adimensional del sedimento.

El método propuesto por Ackers-White

está basado en el análisis dimensional de dos parámetros relacionados al transporte de sedimentos. Las ecuaciones fueron desarrolladas en base a 1000 experimentos realizados con partículas uniformes o casi uniformes con una profundidad de flujo de 0,40 m y calibradas para números de Froude menores a 0,8. Este método admite que existe una relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad media de escurrimiento con la superficie rugosa en reposo.

De acuerdo a este método, para evaluar el transporte de sedimentos se tiene la expresión general del transporte, en la que X expresa el flujo de sedimentos por la vena líquida.

$$X = \frac{G_{gr} s D_{50}}{d \left(\frac{U_*}{U} \right)^m} \quad (20)$$

Donde G_{gr} está representado por la ecuación 21, en la cual C , A y m son valores constantes que dependen del tipo de sedimentos y F_{gr} es el número de movilidad del sedimento.

$$G_{gr} = C \left(\frac{F_{gr}}{A} - 1 \right)^m \quad (21)$$

El método propuesto por Meyer Peter y Muller, sirve tanto para materiales de cualquier peso específico, como para muestras de material uniforme o con granulometría extendida. Estos ensayos fueron realizados en cuatro series hasta llegar a la fórmula definitiva considerando tamaños de partículas uniformes y no uniformes de 0,4 a 3,00 mm, pendientes que varían en el rango de 0,4 a 2 %, altura de agua de 0,01 a 1,00 m, gravedades específicas sumergidas desde 0,25 a 3,2 tn/m³ y gastos líquidos de 0,002 m³/s x m. La expresión propuesta establece que:

$$q_s = 8 \gamma_s g^{1/2} (s-1)^{1/2} D_m^{3/2} \left(\left(\frac{n'}{n} \right)^{3/2} \tau_* - 0,047 \right)^{3/2} \quad (22)$$

Donde “ n' ” es la rugosidad debida a las partículas y “ n ” la rugosidad total del cauce que se obtiene con la fórmula de Manning.

Transporte en función del caudal

El transporte de sedimentos, puede expresarse en función de la pendiente y de la descarga en exceso de la descarga crítica tal y como se muestra en la formulación dada por Schoklitsch. La formulación planteada es la siguiente:

$$q_s = (2,5 * s) S^{1.5} (q - q_c) \quad (23)$$

$$q_c = 0,15 g^{1/2} D_{50}^{3/2} S^{1.12} \quad (24)$$

Transporte como Función del Número de Froude del Sedimento

Mora et al (1990), propuso una función diferente de transporte basada en el concepto de transporte de sedimentos en función del exceso de velocidad media sobre la velocidad media crítica. Esta formulación está dada por:

$$q_s = 0.0072 D_{50}^{3/2} (g (s-1))^{1/2} C^* S (F_*^2 - F_{*cr}^2)^{3/2} \quad (25)$$

Donde F_* , es el Número de Froude de la partícula **previamente definido por:**

$$F_* = \frac{U}{(g(s-1)D_{50} \cos \theta (\tan \Phi - \tan \theta))^{1/2}} \quad (26)$$

F_{*cr} , su valor crítico, que se expresa experimentalmente como:

$$F_{*cr} = 0.9 + 0.5 \ln \left(\frac{d}{D_{50}} \right) + 1.3 \left(\frac{D_{50}}{d} \right) \quad (27)$$

2. Materiales y métodos

Materiales

El trabajo se realizó en el río Ica teniendo como punto de referencia la bocatoma La Achirana, la cual se encuentra ubicada entre las coordenadas 75°41' de longitud oeste y 13°56' de latitud sur, a una altitud de 500 m s.n.m. Por el carácter de la investigación realizada, fue necesario contar con información primaria referida a la topografía

de la zona del estudio, estudios hidrológicos realizados en la zona de interés y estudios geotécnicos diversos.

Topografía. El tramo seleccionado se encuentra al norte de la ciudad, a 20 km de distancia. Políticamente, pertenece a la provincia de Ica, distrito de Los Molinos. Los trabajos topográficos realizados consideran el levantamiento topográfico de 275 m aguas arriba y 200 m aguas debajo de la bocatoma La Achirana.

Hidrología. Se usó la serie de caudales máximos generadas por el modelo hidrológico HFAM (Hydrocomp Forecast and Analysis Modeling), el cual es un modelo de simulación continua que representa toda la hidrología de una cuenca, basado en la asociación de tres grupos de datos (datos generales, parámetros y condiciones iniciales). El periodo de simulación comprendió desde el 2 de febrero de 1964 al 28 de febrero del 1999; con los caudales máximos anuales encontrados se procedió a determinar los caudales generados para diferentes periodos de retorno (Tabla 2).

Tabla 2: Caudales para diferentes períodos de retorno

Periodos de retorno (años)	Descargas máximas (m ³ /s)
2	152
5	262
10	334
20	403
50	493
100	561
200	628
500	716
1000	783

Material de Lecho. El Laboratorio Nacional de Hidráulica (2002), hizo un estudio detallado de la granulometría del río Ica con el objetivo de caracterizar el lecho existente. Se encontró que el lecho es mayormente pedregoso y, en menor proporción, arena y grava de tamaño variable, habiéndose observado en forma dispersa bolones de hasta

60 cm de diámetro. Ochoa (2002) realiza un análisis granulométrico, considerando las mismas muestras y son precisamente estas distribuciones granulométricas las que se emplearon en el presente trabajo. Los diámetros característicos encontrados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Diámetros característicos

Diámetros	Muestra I	Muestra II	Muestra III
	54+060 (mm)	54+500 (mm)	54+660 (mm)
D ₃₅	105,00	82,00	71,00
D ₅₀	115,00	100,00	90,00
D ₆₅	155,00	110,00	110,00
D ₉₀	280,00	185,00	160,00

Métodos

Los métodos empleados estuvieron orientados a la cuantificación del transporte de sedimentos en cauces de alta pendiente dando un énfasis especial al método de estela, descritos con detalle en la revisión bibliográfica. Secuencialmente, se estructuró en métodos para determinar la resistencia al flujo, métodos para el inicio del movimiento de partículas y métodos para cuantificar el transporte de sedimentos.

3. Resultados y discusión

Resistencia al flujo

Con fines de análisis y comparación, se tomó como referencia otras investigaciones realizadas en el tramo de río seleccionado; en este sentido, existen dos estudios específicos: el primero fue realizado por la empresa Asesores Técnicos Asociados-ATA S.A., en el marco del estudio definitivo de la nueva bocatoma La Achirana, ATA (2000), y el segundo, es el trabajo de investigación realizado por Ochoa (2002).

De los resultados encontrados, se observa una coincidencia entre los valores encontrados en la presente investigación y los valores calculados por la empresa ATA S.A., encontrándose una discrepancia en comparación con el estudio realizado por Ochoa (2002), cuyos valores se pueden observar en la Tabla 4.

Tabla 4: Comparación de resultados

Trabajo	Coeficiente de rugosidad			Promedio	Discrepancia %
	Muestra I	Muestra II	Muestra III		
Cálculo empresa ATASA	0,035	0,043	0,043	0,040	99,18
Cálculo por Ochoa	0,028	0,027	0,027	0,027	67,21
Método de Estela	0,043	0,037	0,042	0,041	100,00

Inicio de movimiento de partículas

El criterio del esfuerzo cortante crítico, calcula directamente el diámetro máximo de sedimento que podría entrar en movimiento para cada caudal de la serie, para este caso particular, el rango de diámetro que podría entrar en movimiento para todos los caudales de la serie considerada, están entre los 206 y 294 mm, movilizándose prácticamente todo el material de lecho.

El criterio de la velocidad media crítica, así como el criterio del caudal medio crítico, necesitan como variable el diámetro medio (D_m) y diámetro 50 (D_{50}), respectivamente, para calcular la condición de movimiento; entonces, de acuerdo al proceso iterativo realizado, se determinaron estos diámetros para el caudal de la serie.

Los resultados así obtenidos se compararon con los calculados de acuerdo al criterio del esfuerzo crítico, encontrando que los diámetros encontrados por el criterio de Maza (D_m) guardan similitud, existiendo una diferencia porcentual promedio de 8 %.

En la **Figura 4** se aprecia la comparación entre los diámetros medios calculados por estas metodologías considerando únicamente los datos que produzcan el 100 % de movimiento de las partículas.

En lo referente a la comparación de los diámetros (D_{50}) obtenidos por el criterio del esfuerzo cortante crítico con el criterio del caudal crítico, sí se observa una gran dispersión de resultados tal y como se muestra en la **Figura 5**.

En lo referente al inicio del movimiento, considerando el criterio del número de Froude densimétrico, se observa que las diversas formulaciones analizadas presentan discrepancias que fluctúan entre el 50% y el 300% (**Figura 6**).

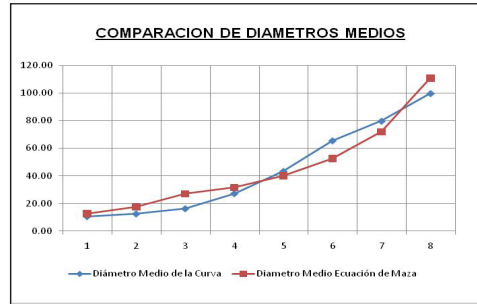


Figura 4: Diámetro medio vs velocidad

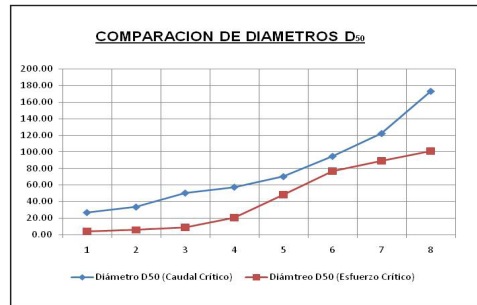


Figura 5: Diámetro 50 vs caudal por unidad de ancho

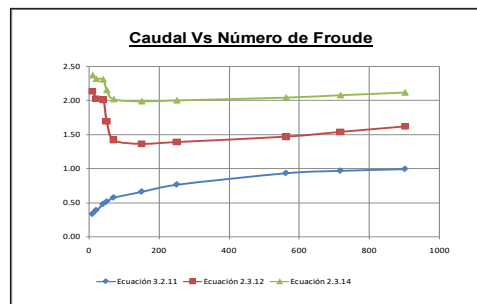


Figura 6: Variación del número de Froude

Funciones de transporte de sedimentos

Del análisis de los resultados obtenidos por los tres criterios, se desprende que existe una incongruencia en los valores obtenidos (transporte de sedimentos) y de manera general para la serie de caudales comprendidos entre los 50 y 150 m³/s tal y como se puede observar en la [Figura 7](#) (por comodidad solo se representó las funciones de Van Rijn, Ackers White y Mora).

Este resultado indicaría que la forma de la sección transversal en el tramo de río analizado se dividiría en dos, un cauce principal y un cauce secundario y que caudales mayores a 50 m³/s ya estarán ingresando en el cauce secundario, lo cual estaría originando distorsiones en el modelo unidimensional HEC-RAS.

Lo indicado se manifestaría en la evolución de la velocidad, profundidad y espejo de agua, las cuales no se estarían incrementando debido a la presencia de este cauce secundario, por lo que, para verificar esta presunción, se corrió el modelo HEC-RAS, pero esta vez considerando el cauce secundario como inefectivo.

De la comparación de estos resultados encontramos que efectivamente se verifica la variación de la velocidad, profundidad y espejo de agua, según se muestra en la [Tabla 5](#).

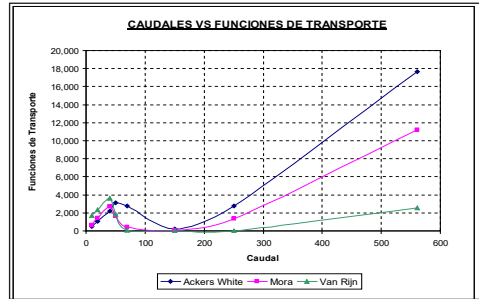


Figura 7: Curva de caudal vs funciones de transporte

Entonces, se concluye que parámetros hidráulicos como el perímetro mojado y el área hidráulica se incrementan sustancialmente cuando se considera, en el análisis, el cauce alterno, por lo que estaríamos hablando de un modelo bidimensional; mayores investigaciones podrían determinar el límite práctico entre modelos unidimensionales y bidimensionales.

Finalmente, **R** estos nuevos resultados se traducen en un incremento de la capacidad de transporte de sedimentos, el cual se muestra en la [Tabla 6](#).

Tabla 5: Comparación de resultados con HEC RAS

Caudal	Velocidad			Ancho			Profundidad		
	Actual	Leeves	%	Actual	Leeves	%	Actual	Leeves	%
	(m/s)		Variación	(m)		Variación	(m)		Variación
10.00	1.04	1.04	0.00%	42.87	42.87	0.00%	0.23	0.23	0.00%
20.00	1.20	1.20	0.00%	61.54	61.54	0.00%	0.27	0.27	0.00%
40.00	1.49	1.49	0.00%	67.06	67.06	0.00%	0.40	0.40	0.00%
50.00	1.60	1.60	0.00%	68.72	68.72	0.00%	0.45	0.45	0.00%
70.00	1.79	1.79	0.00%	71.42	71.42	0.00%	0.55	0.55	0.00%
150.00	2.06	2.35	14.08%	97.81	77.54	26.1%	0.75	0.82	9.33%
250.00	2.39	2.75	15.06%	111.24	82.60	34.7%	0.94	1.10	17.0%
561.00	2.91	3.61	24.05%	148.17	89.22	66.1%	1.30	1.74	33.8%
716.00	3.02	3.91	29.47%	154.15	91.90	67.7%	1.54	1.99	29.2%
900.00	3.10	4.18	34.84%	155.86	93.30	67.1%	1.86	2.31	24.2%

Tabla 6: Re-cálculo del transporte de sedimentos

Caudal	Transporte de Fondo				
	Van Rijn	Meyer Peter	Ackers White	Schoklitsch	Mora
(m ³ /s)	(Tn/día)				
10.00	1,697.92	1,505.43	461.98	3,664.59	663.50
20.00	2,312.94	3,567.37	1,069.54	7,200.04	1,397.00
40.00	3,606.47	11,110.81	2,164.47	14,362.81	2,696.18
50.00	1,839.44	8,795.68	3,096.89	15,301.76	1,613.03
70.00	45.22	5,248.87	2,775.38	11,763.90	411.57
150.00	112.79	15,875.73	3,515.50	24,715.36	5,689.44
250.00	544.57	48,982.96	9,052.48	52,110.29	13,247.71
561.00	7,591.22	225,410.02	38,636.70	159,629.79	45,474.91
716.00	11,659.76	337,325.88	56,423.84	218,151.80	63,053.86
900.00	15,001.54	486,974.91	72,908.19	288,792.08	81,987.55

Del análisis de los resultados, encontramos dos agrupaciones de formulaciones que presentarían alguna similitud; el primer grupo lo conformaría la formulación Meyer Peter y Schoklitsch y el segundo grupo las formulaciones de Van Rijn, Ackers White y Mora.

En relación al primer grupo, se observa una similitud de resultados hasta los 300 m³/s y a partir de ese punto se nota una marcada diferencia en las cantidades.

En relación al segundo grupo de formulaciones, se observa que la formulación de Van Rijn guardaría cierta correspondencia hasta caudales que no superen los 50 m³/s, a partir de este punto ya definitivamente sus resultados son muy dispersos en comparación con las otras formulaciones.

En cuanto a las formulaciones de Ackers White y Mora, sus resultados tienden a converger a medida que la serie de caudal se incrementa a partir de los 250 m³/s.

4. Conclusiones

Se ha realizado el estudio de transporte de sedimentos de fondo del río Ica para la progresiva 54+160 haciendo uso de la información existente en el Proyecto Especial Tambo Ccaracocho (PETACC), estudios realizados por el Laboratorio Nacional de Hidráulica (LNH), trabajos previos de análisis granulométrico efectuado por Ochoa (2002). Asimismo, se ha empleado el Sistemas de Información Geográfico (SIG)

para la ubicación tridimensional del tramo de río a analizar, construcción de los modelos digitales de terreno (MDT) para incorporar los datos topográficos en el modelo de flujo de agua unidimensional HEC-RAS.

Se ha determinado el coeficiente de rugosidad de Manning aplicando la ecuación de estela, el cual arroja valores promedio de 0,040 siendo similares a los valores calculados por la empresa Asesores Técnicos Asociados (ATA S.A.) en el marco del estudio definitivo 'Diseño Definitivo de las Bocatomas La Achirana, Macacona Quilloay y la Venta'. El predictor de resistencia para cauces de alta pendiente y gran rugosidad, modelo de estela, considerando los valores de 6,8 y 0,3 para los factores de textura y estela, ha estimado valores adecuados para este tipo de cauces y con una precisión mayor a las formulaciones tradicionales existentes.

Los resultados de las diferentes variables hidráulicas calculada con el modelo HEC-RAS, han sido empleados en la determinación, primero del inicio del movimiento de las partículas y después en el cálculo del transporte de sedimentos empleando las diferentes funciones existentes. En este punto, se encontró que el modelo HEC-RAS asume que los cauces secundarios conducirán fluidos (tal y como sucede realmente en el río Ica), a pesar de que los diques existentes no hayan sido rebasados, originando con ello errores en los resultados numéricos; por lo indicado, fue necesario modificar el modelo conceptual

restringiendo el ingreso de fluidos al cauce secundario a través de la opción 'leeves' obteniéndose mejores resultados.

La distribución granulométrica de estas muestras presenta una curva que inicialmente tiene poca pendiente y luego sufre un gran quiebre, dejando una zona de transición en la cual la estimación de la capacidad de transporte por las diferentes formulaciones no reflejaría adecuadamente el incremento de la capacidad de transporte con la presencia de mayores caudales tendiendo más bien a disminuir lo cual no sería posible. En este sentido, la capacidad de transporte estimada para los caudales de 50 y 70 m³/s, no debe ser considerada toda vez que por lo menos se debería mantener los volúmenes de arrastre correspondientes al caudal anterior, es decir, 40 m³/s (Formulación de Mora, Meyer Peter y Muller y Van Rijn); en el caso de las formulaciones de Schoklisch y Ackers White, esta condición correspondería al caudal de 50 m³/s.

Asumiendo como válidos los resultados del Laboratorio Nacional de Hidráulica (LNH), en orden descendente de mejor estimador tendríamos la metodología de Meyer Peter y Muller, seguida por Schoklisch, Mora, Ackers White y Van Rijn.

5. Literatura citada

- Aguirre, J. 1998. Transporte de Material Grueso en Alta Pendiente, Tesis para optar el Grado de Doctor en Ciencias Técnicas, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría, Facultad de Ingeniería Civil, La Habana, Cuba.
- Asesores Técnicos Asociados. 2000. Diseño Definitivo de las Bocatomas La Achirana, Macacona Quilloay y la Venta, Proyecto Especial Tambo Ccaracocha. Ica, Perú.
- Asesores Técnicos Asociados. 2000. Estudio de Factibilidad para la Solución de la Problemática de Desbordes e Inundaciones del Río Ica y Quebrada Cansas/Chanchajalla. Proyecto Especial Tambo Ccaracocha. Ica, Perú.
- Bathurst, J.C. 1985. "Flow Resistante Estimation in Mountain Rivers", paper N° 19661, Journal of Hydraulic

Engineering 111(4).

- Jarret, R. 1984. Hydraulics of High-Gradient Streams, Paper 19272, Journal of Hydraulic Engineering 110 (11).
- Laboratorio Nacional de Hidráulica. 2002. Modelo Hidráulico Bocatoma La Achirana. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Ochoa, M. 2002. Estudio de la Influencia de las Fluctuaciones de Velocidad del Flujo en los Enrocados de Protección en Cauce de Ríos, Tesis para optar el grado académico de Magister of Scientiae, UNALM, La Molina, Lima Perú.
- Van Rijn, I.C. 1993. Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries, Coastal Seas and Oceans. International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering, Delf, The Netherlands.