

**TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN RÍOS:
ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL EFECTO
DE LA VEGETACIÓN**

*Comunicación efectuada por la Dra. Inés Paterson
en la Academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires
en la sesión privada extraordinaria
del 25 de abril de 2008*

INÉS PATERSON
RAMÓN MARTINO
MARCELO PIVA

Resumen

La protección de los márgenes de un río intenta evitar la erosión y así impedir la destrucción del terreno en los límites del cauce. En los últimos años se ha considerado de importancia la recuperación de los valores naturales del río, entre otras cosas si es posible conseguir que un río vuelva a tener espacios de valor natural o recreativo, esto significa lograr proyectos con un enfoque respetuoso del medio natural.

Esto ha motivado que en el campo de la ingeniería haya tenido especial interés el empleo de protecciones naturales que involucren cubiertas de arcillas y/o de vegetación. Sin embargo en la actualidad no se cuenta aún con demasiada información sobre la resistencia que este tipo de protección ofrece a la acción de las corrientes. Por ello la necesidad de encarar estudios sistemáticos donde se analicen la influencia de los distintos parámetros que influyen en el problema como por ejemplo la densidad de la vegetación, la altura relativa de la misma, la presencia de raíces y follaje, etc.

La alteración que sufre el campo de velocidades por la presencia de tallos vegetales impacta en las tensiones de corte sobre el lecho. Esta tensión de corte es un parámetro clave en el fenómeno de iniciación del movimiento de partículas de sedimento del lecho, así como en la posterior etapa de transporte por carga de fondo. Si bien existen datos cuantitativos para la iniciación de movimiento en flujos eólicos y atmosféricos, los mismos son escasos en el caso de dinámica fluvial.

Se estudia experimentalmente la iniciación de movimiento de sedimento no cohesivo en presencia de tallos rígidos equiespaciados en un canal horizontal a superficie libre, variando de forma sistemática los parámetros geométricos relacionados con la cobertura vegetal.

Introducción

La vegetación en ríos o canales naturales es importante desde el punto de vista biológico, ecológico y de la ingeniería, por su influen-

cia en la hidrodinámica y por ser un factor clave en el control de procesos de erosión, transporte y sedimentación de sólidos, nutrientes y contaminantes. Un estudio detallado de la influencia que el sistema vegetal completo tiene sobre la estabilidad del suelo reviste gran complejidad, Järvelä (2006). Hemos focalizado nuestro estudio en la interacción del flujo con tallos rígidos que incluso en este marco simplificado deben considerarse los casos de tallos sumergidos o emergentes. Asimismo, no puede dejar de incluirse en el análisis la densidad de la cobertura vegetal (número de tallos por unidad de área del lecho) y su distribución espacial o matriz vegetal.

Estimación de tensiones críticas en el lecho

La hidrodinámica en flujos en presencia de tallos vegetales y fondo rugoso ha sido estudiada recientemente, Stone y Shen (2002). Entre sus principales resultados, se encuentra un modelo para calcular el valor de la tensión de corte en el lecho de una corriente estacionaria y uniforme vegetada, así como el valor de tensión asociado a la cobertura de tallos.

La caracterización del lecho vegetado se realiza utilizando dos parámetros:

$$\lambda_K = \frac{h_v d_v}{a^2} \quad [1] \quad \text{y} \quad \lambda_S = \frac{\pi d_v^2}{4 a^2} \quad [2]$$

con h_v la altura de la vegetación, d_v su diámetro y a el espaciado entre tallos. Estos parámetros dan una idea del área vegetal expuesta al flujo y de la superficie del lecho ocupada por la vegetación, respectivamente; y permiten controlar la distribución de vegetación en cada ensayo.

Las tensiones de corte en el lecho τ_b , la asociada a la vegetación τ_v y la total τ_T , se calculan a partir de los valores de la velocidad media en la capa vegetal. El modelo puede aplicarse tanto en el caso de vegetación sumergida ($h_v/h < 1$) como emergida ($h_v/h = 1$). Los valores de tensión de corte en el lecho y asociada a la distribución de vegetación se calculan con:

$$\tau_b = f_b \frac{\rho}{8} V_L^2 (1 - \lambda_S) \quad [4] \quad \text{y} \quad \tau_v = C_D \frac{1}{2} \rho V_c^2 \frac{d_v h_v}{a^2} \quad [5]$$

$$\text{donde} \quad V_c = \frac{1}{1 - d_v/a} V_L \quad [6]$$

con V_c la velocidad media máxima en una constricción dentro de la capa de tallos.

El modelo lineal de partición de tensiones utilizado, King (2005), establece que a primer orden la tensión de corte total en un flujo vegetado en ausencia de formas de fondo es:

$$\tau_T = \tau_b + \tau_v \quad [10]$$

donde τ_b es la tensión de corte que actúa sobre los granos del lecho sedimentario, y τ_v la fuerza por unidad de área actuante sobre la cobertura vegetal. Según este modelo, para la condición crítica de iniciación del movimiento de sedimento el cociente τ_b/τ_T es una función del coeficiente λ_K :

$$\frac{\tau_b}{\tau_T} = \frac{1}{1 + \beta\lambda_K} \quad \text{para la condición crítica} \quad [11]$$

Estrictamente hablando, dicho modelo descansa fuertemente en el coeficiente $\beta \approx C_D/f_b$, que a su vez es dependiente de la hidrodinámica local. Para flujo de aire el rango de valores es del orden de $50 < \beta < 225$. Para la condición crítica de movimiento inminente, el cociente:

$$R = \frac{\tau_b^c}{\tau_T^c} \quad [12]$$

donde τ_T^c es el valor de tensión total aportada por el del flujo incidente, depende del parámetro λ_K .

Dispositivo experimental y metodología de trabajo

Para la realización de las experiencias se acondicionó un canal horizontal de $4,0 \text{ m}$ de longitud, $0,15 \text{ m}$ de ancho. Mediante una compuerta ubicada al final del canal es posible controlar la altura del flujo presente en el mismo.

El sedimento no cohesivo estuvo conformado por microesferas de vidrio de diámetro medio $d_s=0,63 \text{ mm}$, con una desviación del 14% . El canal fue vegetado a lo largo de toda su longitud con tallos rígidos (varillas de bronce) de $2,0 \text{ mm}$ de diámetro y $4,0 \text{ cm}$ de altura máxima respecto del nivel del lecho de sedimento, colocados en una matriz regular al tresbolillo.

Inmediatamente luego del ingreso del agua al canal, se dispuso un lecho de grava (de aproximadamente $1,0\text{ cm}$ de tamaño) a fin de establecer rápidamente una condición de borde rugosa para el flujo. A continuación se dispuso una cama de sedimento plana de $2,2\text{ m}$ de longitud hasta la trampa de sedimento. El tramo ubicado entre la trampa y la compuerta de control de egreso del flujo del canal se encontraba también vegetado, a fin de evitar cambios bruscos en el régimen de la corriente.

El caudal se impuso mediante una bomba centrífuga, la altura del flujo se midió en tres estaciones a lo largo del. Se registró durante cada experiencia la temperatura del fluido, para estimarse la viscosidad y la densidad del agua en cada uno de los 200 experimentos realizados.

Para cuantificar el valor crítico de velocidad media del flujo se utiliza la técnica de referencia base, Shields (1936), que consiste en realizar una serie de experiencias de transporte de sedimento con valores decrecientes de velocidad media del flujo. En cada caso se registra la masa de sedimento recolectada en la trampa de sedimento en el tiempo T (entre 1 y 2 hs.) de duración.

A fin de obtener información acerca de la forma que toma la curva Q_s vs V cuando $Q_s \rightarrow 0$ el trabajo se concentró en la región de transporte de sedimento muy débil. En los estudios de la iniciación de movimiento en ausencia de vegetación se ha reportado que en cercanías de esta región la extrapolación lineal desde elevados valores de transporte puede conducir a valores sobreestimados de tensión crítica para iniciación del movimiento.

En las experiencias con canal vegetado, se estudiaron ocho configuraciones diferentes. Las series se especifican en la siguiente tabla:

Tabla 1. Configuraciones ensayadas con vegetación

	1275 tallos/m ²				3265 tallos/m ²			
h_v/h	0,25	0,67	1,00	1,00	0,25	0,67	1,00	1,00

En cada ensayo se verificó:

- 1) Ausencia de erosión localizada en el lecho
- 2) Movimiento de granos uniformemente distribuidos (aunque débil y/o esporádico)
- 3) Ausencia de deformación de la superficie libre del flujo en la zona de ensayo.

La **Figura 1** muestra el lecho de sedimento y el flujo impuesto, para una de las experiencias realizadas.

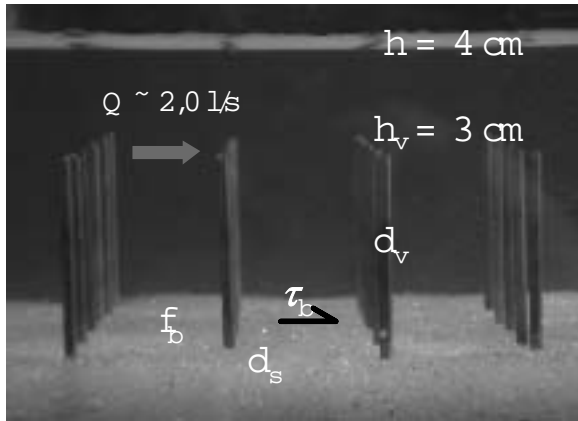


Figura 1. Detalle del lecho de sedimento sin vegetación

Las experiencias fueron realizadas en condiciones de lecho plano horizontal.

Resultados experimentales y análisis

Tomando ventaja del hecho de haber trabajado en la zona de transporte débil, y teniendo en cuenta la incertidumbre asociada a cada punto experimental, se adoptó el criterio de tomar el promedio de valores de τ_b para valores de $Q_S < 0,01 \text{ g/s}$, que es donde se observa experimentalmente que la curva tiene un «quiebre» en la tendencia.

Como segunda opción, se adoptó el criterio de tomar los valores en la región descrita y ajustar una recta mediante cuadrados mínimos, cuya ordenada al origen dé el valor de tensión crítica buscado.

El análisis de resultados en términos de τ_b vs Q_S revela una tendencia similar en todos los casos, análoga a la observada en el caso sin vegetar. En la zona de transporte débil en la que centramos nuestro estudio, los gráficos muestran una tendencia muy suavizada. En la **Figura 2** se visualizan dos curvas experimentales típicas:

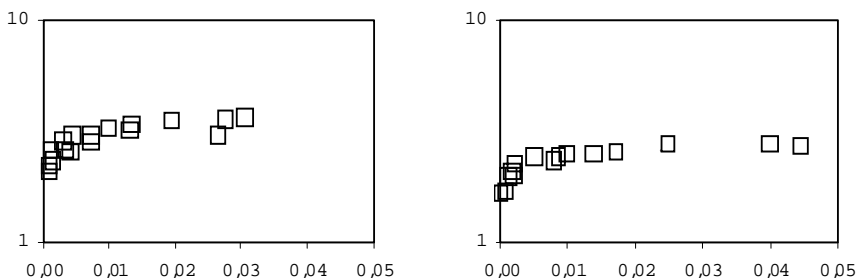


Figura 2. Q_s [g/s] vs. τ_b [g/(cm.s²)] para $h_v/h = 3/4$ con (a) 1275 tallos/m² y (b) 3265 tallos/m²

Los valores de tensión crítica en el lecho se obtienen de aplicar la ecuación [4], y se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 4. Tensión crítica, flujo con vegetación

	1275 tallos/m ²				3265 tallos/m ²				Prom.	Desv.
	h_v/h	0,25	0,67	1,00	1,00	0,25	0,67	1,00		
Criterio 1	1,5	2,7	2,4	2,9	1,1	2,2	1,9	2,3	2,1	0,6
Criterio 2	1,3	2,3	2,3	2,5	0,9	1,9	1,8	2,2	1,9	0,5

En la **Figura 3** se muestra el cociente dado por la ecuación [12] contra λ_K , ecuación [1]. Se representan los resultados correspondientes a las ocho configuraciones. El valor de τ_T se calculó en base al modelo de superposición de las tensiones. A efectos de la comparación, se incluyen valores extractados de Jordanova (2003) en un trabajo de transporte de sedimento con tallos rígidos emergidos y Baptist (2005) quien presenta experiencias de transporte y erosión de un lecho horizontal en presencia de vegetación flexible sumergida, para las cuales también realizó mediciones del perfil de velocidad. Se puede observar que todos los puntos se ubican dentro de la región comprendida entre dos curvas teóricas dadas por la ecuación 14. Los valores de β que corresponden a cada una de estas curvas, $\beta=70$ y $\beta=120$ se encuentran dentro del rango ($50 < \beta < 225$) previsto por el modelo de Raupach (1993) para flujos eólicos.

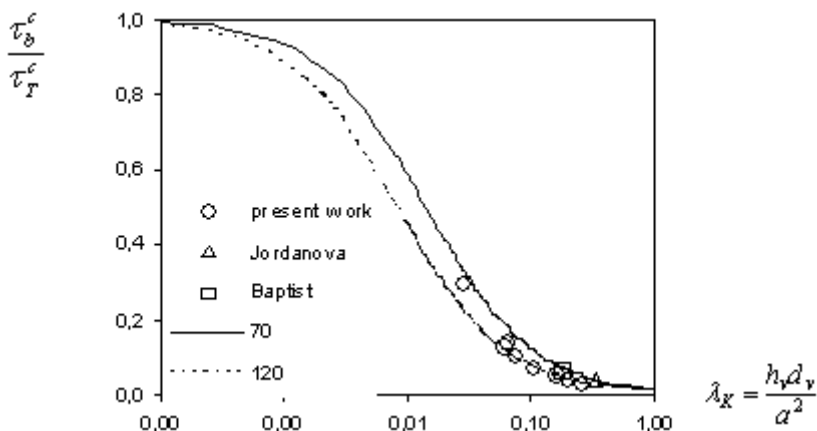


Figura 3. Criterio de Raupach aplicado a fluvial con vegetación

Un análisis detallado de los resultados de la Tabla 4 revela una dependencia de los valores críticos de t_b con la variable altura relativa flujo-vegetación, h_v/h . Estos resultados se resumen en la Figura 4.

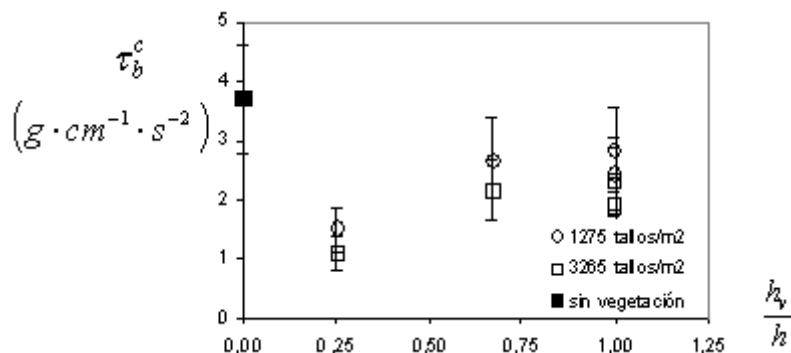


Figura 4. Tensión crítica en el lecho para diferentes relaciones h_v/h

Se observa que para $h_v/h=0,25$ la tensión de corte crítica adquiere su valor mínimo. Este comportamiento puede interpretarse en términos de la interacción entre el lecho de sedimento y la capa de corte que se desarrolla en la interfase que separa el flujo vegetado de la corriente libre. En efecto, a medida que la vegetación disminuye en altura, la estela vorticiosa en el extremo de los tallos se acerca al le-

cho produciendo el efecto de aumentar la movilidad de los granos. Es necesario ahondar en este aspecto, con experiencias de mayor detalle que muestren la hidrodinámica en esta situación.

Conclusiones

En este trabajo se presentan resultados experimentales sobre la iniciación de movimiento de partículas en un canal de ensayos horizontal en presencia de vegetación.

La variación sistemática de los parámetros de control asociados a la distribución de los tallos rígidos muestra que, en la zona de transporte débil de sedimento, las curvas de τ_b vs Q_S , presentan una tendencia muy suavizada, análogamente a lo que ocurre en el caso sin vegetación.

Para el presente trabajo se adoptaron dos criterios independientes para estimar la tensión crítica. En el caso no vegetado, ambos criterios predicen valores similares a los reportados en la literatura.

Se muestra la compatibilidad de los modelos de *Stone y Shen (2002)* y la pertinencia del modelo aerodinámico de *Raupach (1993)* aplicado a un flujo hidrodinámico. El criterio de *Raupach* basado en la partición lineal de tensiones, permite determinar el porcentaje de tensión crítica disponible para la movilidad de los granos en función del grado de cobertura vegetal del lecho λ_K .

Referencias bibliográficas

- Järvelä, J., Aberle, J., Dittrich, A., Rauch, H. P. and Schnauder, I. (2006). *Flow-vegetation-sediment interaction: Research challenges*. River Flow 2006, Taylor and Francis Group, London.
- Buffington, J. M. (1999). *The legend of A. F. Shields*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 125, No. 4, April 1999, pp. 376-387.
- Stone, B. M. and Shen, H. T. (2002). *Hydraulic Resistance of Flow in Channels with Cylindrical Roughness*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 128, No. 5, May 2002, pp. 500-506.
- Jordanova, A. A. and James, C. S. (2003). *Experimental Study of Bed Load Transport through Emergent Vegetation*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 129, No. 6, June 2003, pp. 474-478.
- King, J. and Nickling, W. G. and Gillies, J. A. (2005). *Representation of vegetation and other nonerodible elements in aeolian shear stress partitioning models for predicting transport threshold*. Journal of Geophysical Research, AGU, Vol. 110, F04015, December 2005.

- Velasco, D. , Bateman, A., DeMedina, V. (2004). *Estudio experimental y teórico del inicio de movimiento de partículas en lechos con vegetación*. XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR.
- Baptist, M. J. (2003). *A flume experiment on sediment transport with flexible, submerged vegetation*. International workshop on RIParian FOrest vegetated channels: hydraulic, morphological and ecological aspects. February 2003
- Huthoff, F., Augustijn, D. C. M. and Hulscher, S. J. M. H. (2007). *Analytical solution of the depth-averaged flow velocity in case of submerged rigid cylindrical vegetation*. Water Resources Research, Vol. 43, W06413, June 2007.
- Van Rijn, L. C. (2007). *Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. I: Initiation of Motion, Bed Roughness, and Bed-Load Transport*. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 133, No. 6, June 2007, pp. 649-667.

Departamento de Hidráulica y Grupo de Medios Porosos
Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires