

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

XX CONGRESO CHILENO DE HIDRAULICA

**RESULTADOS EXPERIMENTALES SOBRE EL EFECTO DE LA
COMPACTACIÓN EN EL TRANSPORTE INCIPIENTE**

**CRISTIAN FIGUEROA D.¹
OSCAR LINK L.²**

RESUMEN

Se presenta un diseño experimental para medir el efecto de la compactación sobre el transporte incipiente. Los experimentos se realizaron en un canal rectangular de 20 m de largo, 1.2 de ancho y 1.2 m de profundidad máxima en que se dispusieron dos arenas de diámetro medio 0.0007 y 0.00036 m y desviación estándar geométrica 1.63 y 1.45 respectivamente. Se compactaron mediante golpes obteniendo tres densidades para cada sedimento. La condición de transporte incipiente se determinó de forma visual. El esfuerzo de corte sobre el lecho se estimó a partir de mediciones de velocidad con un velocímetro Doppler acústico; ADV, a partir del perfil de velocidad en capa límite. Los resultados preliminares indican que el efecto de la compactación sobre el esfuerzo crítico es menor. Aparentemente, se contrarresta el efecto de una mayor densidad relativa con la disminución de la rugosidad de la pared producto de la compactación.

¹Tesista de Magíster, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción – mail: cfigueroad@udec.cl

²Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción – mail: olink@udec.cl

1. INTRODUCCIÓN

La erosión que una corriente produce sobre suelos compactados se ha estudiado principalmente en el contexto de la escorrentía superficial y los suelos agrícolas. Sin embargo, el efecto que la compactación de un sedimento puede tener sobre las condiciones de transporte incipiente no se encuentra documentado y podría ser relevante para el diseño de obras hidráulicas fundadas en lechos móviles.

El transporte incipiente de lechos aluviales, i.e. cuyo sedimento se ha depositado naturalmente, está descrito en los diagramas de Hjulström (1935) y Shields (1936) y en las modificaciones posteriores del último (e.g. Buffington y Montgomery (1997), Parker (2005)).

Un lecho sin cohesión puede presentar una densidad mayor al nivel alcanzado solo por depositación cuando se compacta. Sedimentos muy finos, en el rango de las arcillas, experimentan consolidación en el tiempo que también aumenta su densidad. Aunque se conoce este tipo de comportamiento en estos sedimentos, no se ha respondido exhaustivamente cuánto cambia la tensión de corte requerida para que se produzca transporte incipiente si un suelo es compactado.

Parker *et al.* (1995) estudiaron la compactación con profundidades de flujo de hasta 10 mm encontrando que la velocidad cerca del lecho aumenta a mayores densidades, atribuyéndolo a cambios en la rugosidad superficial producto de la compactación, que disminuyen el efecto de la pared.

Gaucher *et al.* (2010) realizaron una investigación experimental en un canal de 0.5 m de ancho, 0.7 m de profundidad y 9 m de largo, con un caudal de entre 30 y 40 l/s, donde mostraron que sedimentos no cohesivos compactados cerca del óptimo entregado por el ensayo Proctor, exhiben una disminución de la tasa de erosión comparado con muestras de sedimentos compactados a menores densidades. Sin embargo, los valores de tensiones de corte en el umbral no presentan una marcada diferencia entre un nivel de compactación y otro para cada sedimento granular analizado.

El objetivo de este estudio es analizar el efecto de la compactación en el transporte incipiente de sedimentos fluviales para lo cual se realizaron ensayos experimentales en que se determinó la tensión de corte crítica a partir de mediciones de velocidad mediante ADV y se analizó la relación entre densidad relativa y el esfuerzo crítico.

2. METODOLOGÍA

Instalación experimental

El trabajo experimental se realizó en el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Universidad de Concepción. El sistema hidráulico consta de un circuito cerrado impulsado por una bomba de un caudal máximo igual a 110 l/s. Las mediciones se realizaron en un canal

artificial con paredes de vidrio y fondo de acero de 1.2 m de ancho, 1.2 m de alto y 20 m de largo. La Figura 1 muestra un esquema de la instalación experimental.

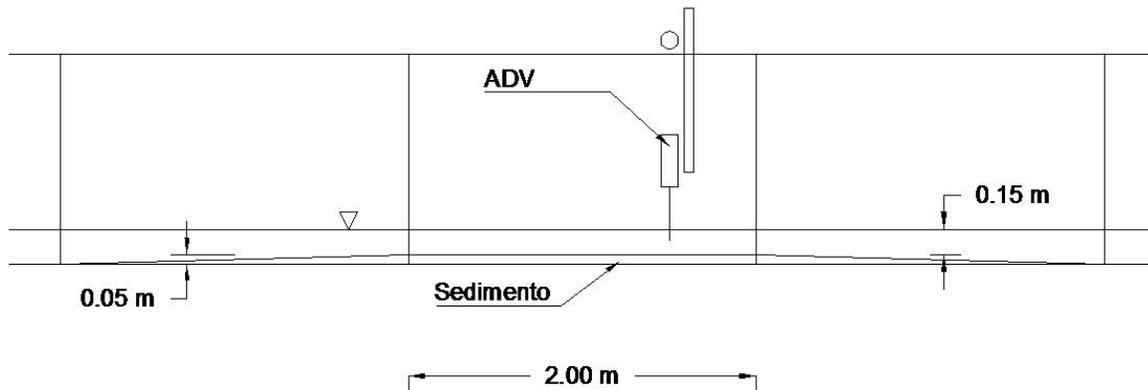


Figura 1. Esquema de la instalación experimental

La velocidad se midió en el eje del canal con un ADV Vectrino de Nortek, con una frecuencia de muestreo igual a 25 Hz. Para posicionar el instrumento se instaló una estructura que permite su desplazamiento en la vertical a través de un tornillo sin fin y un contador de avance con precisión de décima de milímetro. En la Figura 2 se muestra el sistema de posicionamiento del ADV.



Figura 2. ADV y estructura

La profundidad del flujo se midió con un sensor ultrasónico UAS de la marca Dr. D. Wehrhahn con precisión de décima de milímetro. La profundidad se regula con una compuerta deslizante vertical ubicada al final del canal. Posee una apertura mínima de 0.5 cm y máxima de 60 cm. En la Figura 3 se muestra la compuerta en operación.



Figura 3. Compuerta deslizante en operación

El flujo uniforme se obtuvo a partir de una pendiente cero. Se calculó el n de Manning para la sección de medición según la fórmula de Strickler (1923). De la fórmula de Manning se obtuvieron pendientes del orden de 0.25 por mil, lo que presenta un desnivel muy cercano a cero para la longitud del canal.

Para modificar la densidad del sedimento se aplicó compactación por golpes con un pisón de 4.5 kg de masa, y 60 cm de altura de caída sobre una superficie de 46 x 42 cm y un espesor de 5 cm dividido en dos capas. Con esto se asegura que la masa de suelo posea una densidad homogénea después de compactada. A partir del número de golpes y las características antes descritas se puede estimar una energía específica de compactación, tal como se define para el ensayo Proctor.

$$E = \frac{nNh}{V} \quad (1)$$

donde n es el número de capas en que se divide el estrato, N es el número de golpes de pisón, W es el peso del pisón, h es la altura de caída de la masa y V es el volumen de la masa de suelo.

La densidad obtenida en cada compactación fue medida a través de la extracción de seis testigos de 89 cm³ de volumen. Luego este sedimento fue secado al horno por al menos 6 horas a 105 °C. En la Figura 4 se presentan las muestras extraídas para un sedimento.



Figura 4. Muestras extraídas

Para definir la condición de transporte incipiente se utilizaron los criterios de Kramer (1932, 1935, citado en Buffington, 1999), quien propuso cuatro niveles visuales de movimiento del lecho: (1) Sin transporte, (2) Transporte débil, en que varias de las partículas más pequeñas están en movimiento, en puntos aislados y en cantidades contables, (3) Transporte medio, donde granos de diámetro medio están en movimiento en cantidad demasiado alta para ser contable. El movimiento ya no es localizado aunque no es lo suficientemente fuerte como para afectar la configuración del lecho y no resulta en transporte de una cantidad apreciable de material y (4) Transporte generalizado, hasta el grano más grande está en movimiento. Es suficientemente fuerte como para cambiar la configuración del lecho y existe una apreciable cantidad de material transportado.

En el presente trabajo se adoptó como condición crítica a la etapa de transporte medio, que es el momento en que comienza el movimiento de los granos debido a los esfuerzos de corte aplicados por el flujo.

Para obtener resultados comparables con los existentes en la literatura, la condición de transporte incipiente de las muestras sin compactación se determinó a partir del Diagrama de Shields, y para las muestras compactadas se buscó el mismo comportamiento observado. Con esto se disminuyó el error asociado a la subjetividad de definir la condición umbral a partir de criterios visuales.

Determinación de la tensión de corte sobre el lecho

El esfuerzo de corte sobre el lecho se determinó a partir de mediciones de velocidad con ADV en condición de transporte incipiente. Se midió el perfil de velocidades dentro de la capa límite, i.e., en el 20% más cercano al fondo, que es donde aplica la Ley Logarítmica de Velocidades (Nezu y Nakagawa, 1993). La constante de integración del perfil logarítmico de velocidades

$$\frac{u(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{k_s} \right) + B_s \quad (2)$$

se calculó según Yalin (1992) para paredes lisas, rugosas y en transición:

$$B_s = 8.5 + [2.5 \ln(Re_*) - 3] e^{-0.121 \ln(Re_*)^{2.42}} \quad (3)$$

donde $Re_* = u_* k_s / \nu$, u_* es la velocidad de corte, κ es la constante de von-Karman, que tiene un valor aproximado de 0.41 y k_s es la rugosidad equivalente de Nikuradse.

El esfuerzo crítico se calculó a partir de la velocidad de corte. Se sabe que $\tau'_c = \rho u_*^2$, donde τ'_c es la tensión de corte sobre el lecho.

3. RESULTADOS PRELIMINARES

La Tabla 1 muestra las propiedades relevantes de los sedimentos utilizados, denominados arena Biobío y arena Carampangue.

Tabla 1. Propiedades de los sedimentos

Propiedad		Arena Biobío	Arena Carampangue
Granulometría	D84 (mm)	1.20	0.59
	D50 (mm)	0.70	0.36
	D16 (mm)	0.45	0.28
	σ_g	1.63	1.45
Densidad de sólidos	Gs	2.72	2.59
Densidad relativa	Máxima (g/cm^3)	1.79	1.52
	Mínima (g/cm^3)	1.48	1.40

La Figura 5 muestra las curvas granulométricas de cada uno.

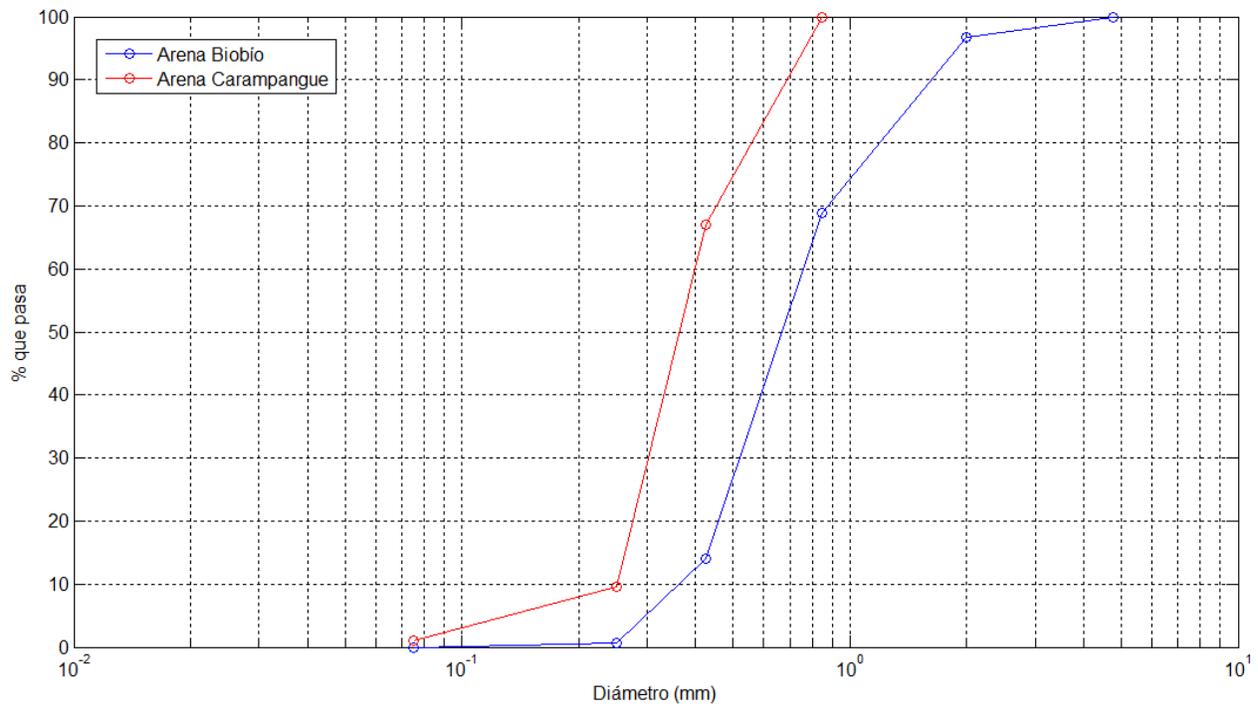


Figura 5. Distribuciones granulométricas

El porcentaje que pasa por el Tamiz 200 fue de 0.3% para la arena Biobío y de 1% para la arena Carampangue. Debido a esto no se realizaron ensayos Proctor, los cuales exigen que por lo menos un 12% de la masa de suelo sea limo y/o arcilla.

Se observa que la curva granulométrica del primer sedimento es más dispersa que la del segundo, considerando que la desviación estándar geométrica es mayor. Se dice que la distribución granulométrica es uniforme cuando

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{D_{84}}{D_{16}}} < 1.4 \quad (8)$$

Se concluye que la arena Carampangue es uniforme.

La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos de la compactación por golpes.

Tabla 2. Compactación de los sedimentos

Propiedad	Arena Biobío			Arena Carampangue		
	0	25	50	0	8	25
Nº de golpes	0	25	50	0	8	25
Energía específica (J/cm ³)	0	0.137	0.274	0	0.044	0.137
Densidad seca (g/cm ³)	1.56	1.50	1.58	1.60	1.54	1.65
Desviación estándar (g/cm ³)	0.01	0.03	0.07	0.02	0.03	0.02

En la Figura 6 se muestra la densidad seca y su dispersión en función de la cantidad de golpes.

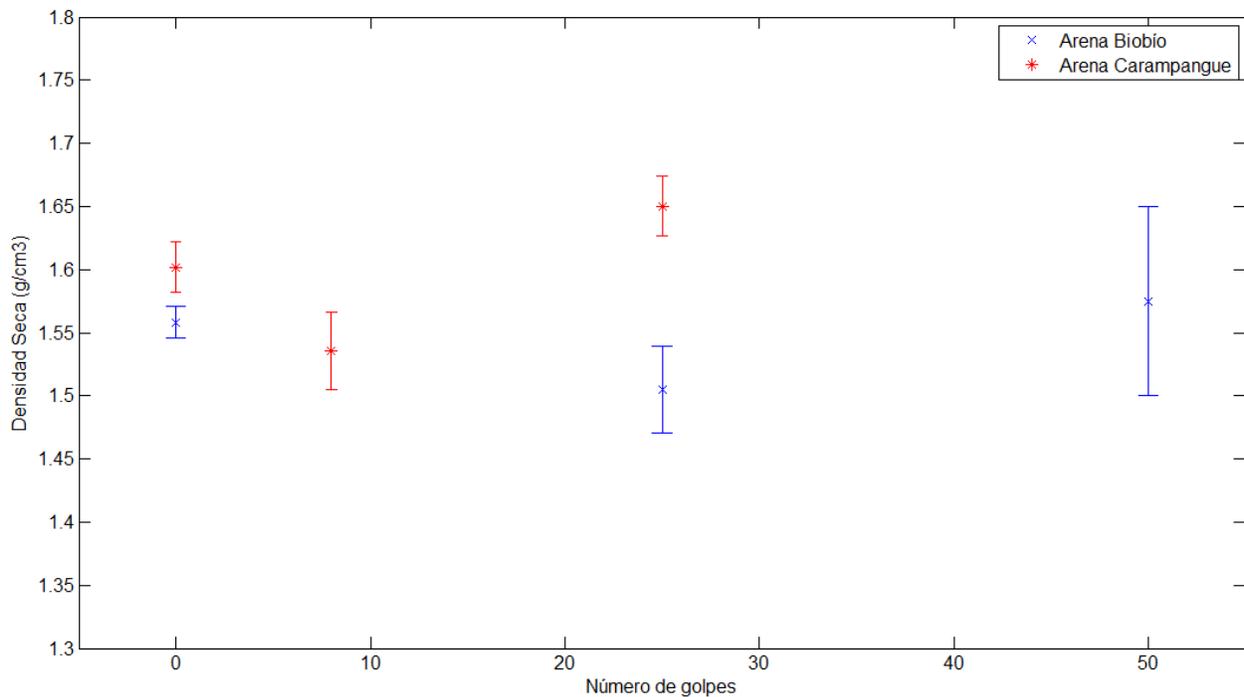


Figura 6. Densidad seca versus número de golpes

Se observan desviaciones estándar importantes en las densidades.

El transporte incipiente en cada muestra de sedimento se alcanzó en condiciones hidráulicas determinadas por el caudal y la sección transversal del canal, cuyo detalle se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Características de cada ensayo

Propiedad	Arena Biobío			Arena Carampangue		
	0	25	50	0	8	25
N° de golpes	0	25	50	0	8	25
Energía específica (J/cm ³)	0	0.137	0.274	0	0.044	0.137
Densidad seca (g/cm ³)	1.56	1.50	1.58	1.60	1.54	1.65
Ancho (m)	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
Profundidad (m)	0.20	0.20	0.20	0.15	0.15	0.15
Caudal (l/s)	85	94	91	60	65	63
Velocidad media (m/s)	0.354	0.392	0.379	0.333	0.361	0.350

Las figuras 7 y 8 muestran los perfiles de velocidades medidos y los ajustes según Yalin (1992) para cada nivel de compactación.

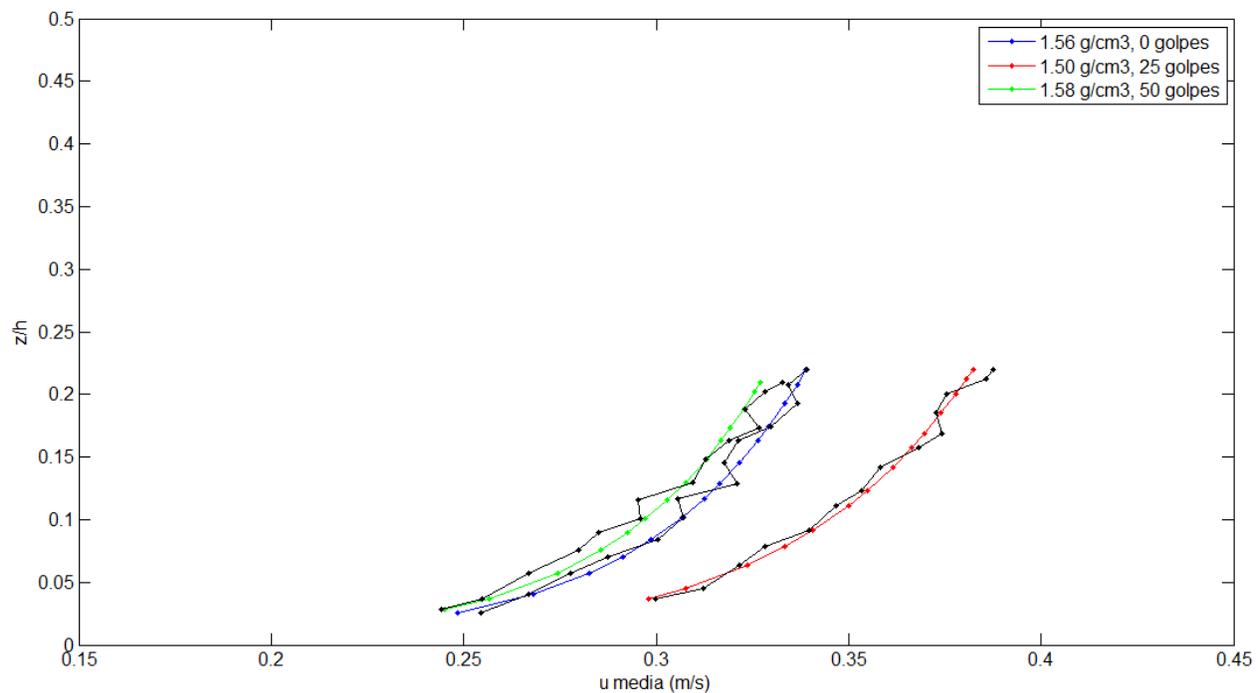


Figura 7. Perfiles de velocidades en arena Biobío

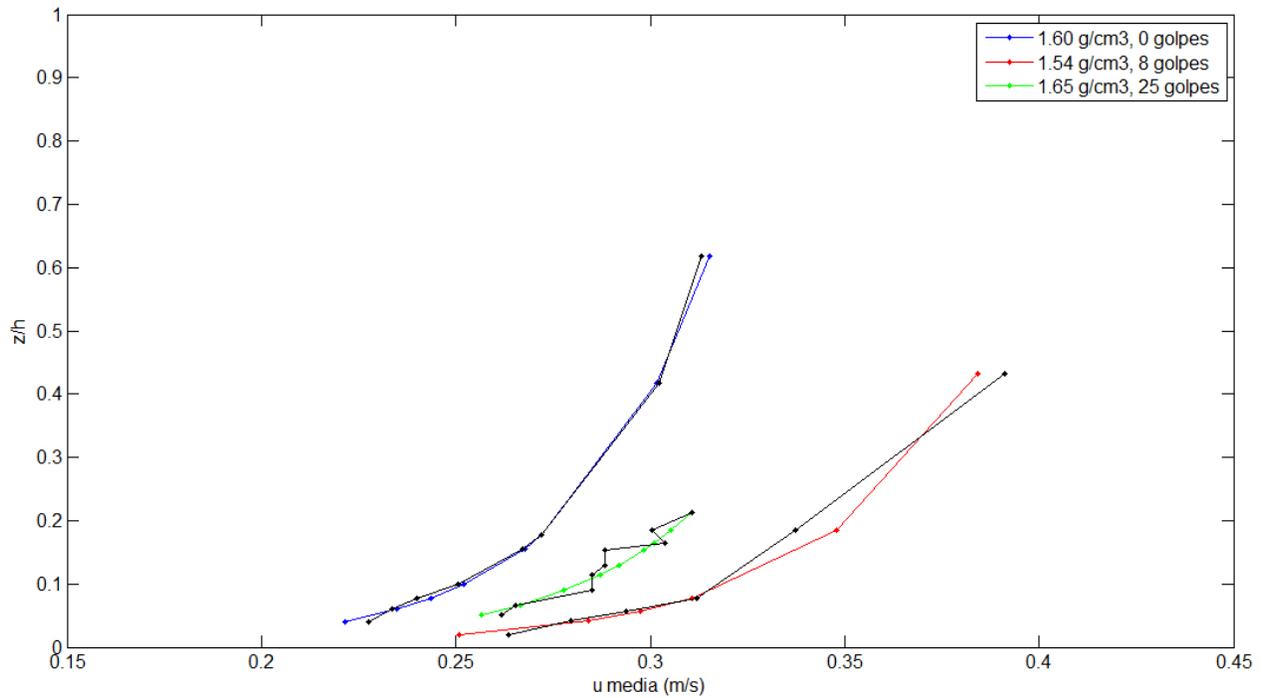


Figura 8. Perfiles de velocidades en arena Carampangue

En la Tabla 4 se presentan los resultados e índices de bondad de ajuste de la aproximación de los perfiles de velocidades.

Tabla 4. Características de cada ensayo

Propiedad		Arena Biobío			Arena Carampangue		
N° de golpes		0	25	50	0	8	25
Ajuste Log-Law	k_s (m)	0.0007	0.0007	0.0007	0.00036	0.00036	0.00036
	u^* (m/s)	0.0172	0.0194	0.0167	0.0141	0.0176	0.0156
	τ_b (Pa)	0.296	0.376	0.279	0.199	0.310	0.243
Régimen	Re^*	9.26	10.45	8.99	3.90	4.87	4.32
	B_s	9.61	9.60	9.61	8.81	9.16	8.99
Bondad de Ajuste	Eficiencia N-S	0.979	0.9833	0.9637	0.9922	0.9661	0.9134
	R^2	0.9799	0.9844	0.9795	0.9927	0.9683	0.9186
	Sesgo	0.0026	-5.29E-04	0.0031	0.0013	-0.0064	0.0027

La Figura 9 muestra la tensión de corte sobre el lecho para diferentes densidades.

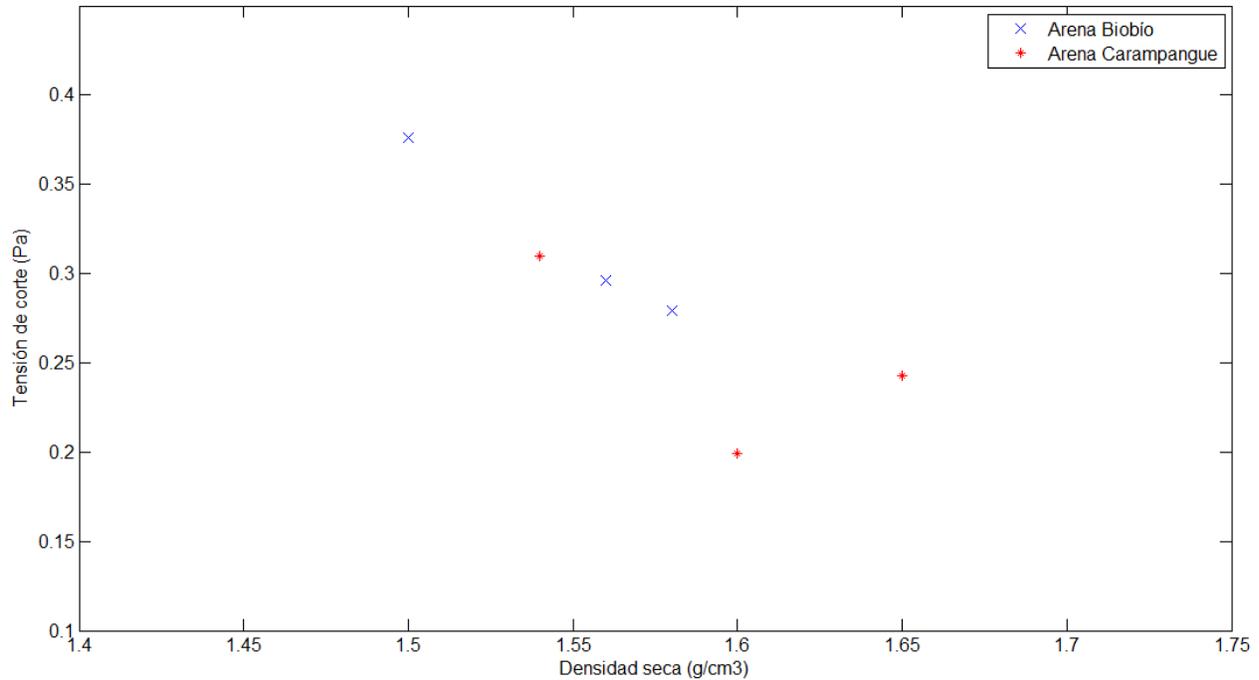


Figura 9. Tensión de corte sobre el lecho versus densidad seca

En general, a mayor densidad seca disminuye la tensión de corte crítica. Probablemente, esto se deba a la disminución de la rugosidad superficial que pudiera causar la compactación, que ha sido observada por Parker *et al.* (1995).

La Tabla 5 presenta los adimensionales de tensión de corte y Reynolds del grano para cada nivel de compactación.

Tabla 5. Adimensionales de Tensión de corte y Reynolds

Adimensional	Arena Biobío			Arena Carampangue		
Densidad seca (g/cm³)	1.56	1.50	1.58	1.60	1.54	1.65
Re^*	9.26	10.45	8.99	3.90	4.87	4.32
τ^*	0.0251	0.0319	0.0236	0.0354	0.0552	0.0434

Para clarificar la dispersión de las tensiones de corte obtenidas para cada nivel de compactación, la Figura 10 muestra los resultados de la Tabla 5 comparados con datos usados por Shields (1936).

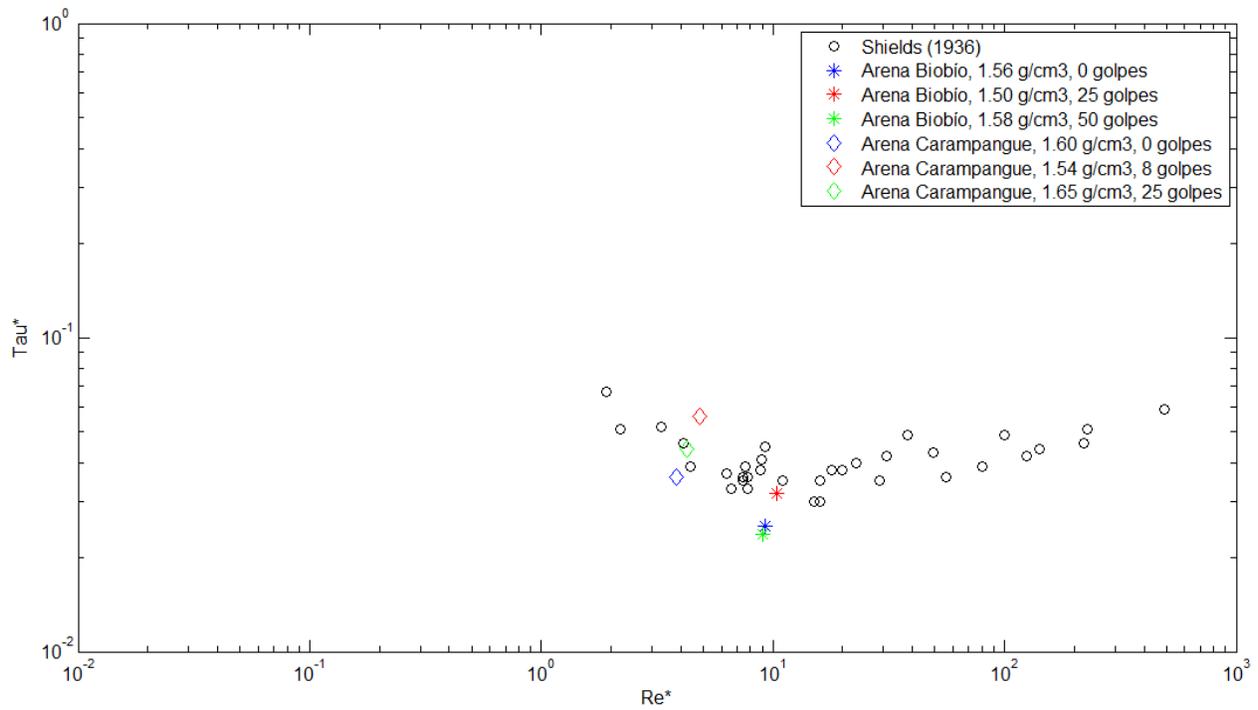


Figura 10. Diagrama de Shields con datos del presente estudio

Las diferencias entre tensiones de corte críticas para un nivel de compactación y otro se mantienen en el mismo orden de magnitud y presentan un comportamiento similar a lo expresado por Gaucher *et al.* (2010), en que se observan cambios en la tasa de erosión pero los valores de esfuerzo de corte en el umbral comprenden un rango muy estrecho.

4. CONCLUSIÓN

Se estudió en forma experimental el efecto de la compactación sobre el esfuerzo crítico en dos arenas de la Región del Biobío. Los ensayos se realizaron en un canal de laboratorio, donde se midieron velocidades con ADV. Los resultados preliminares indican que el efecto de la compactación sobre el esfuerzo crítico es menor. Aparentemente, se contrarresta el efecto de una mayor densidad relativa con la disminución de la rugosidad de la pared producto de la compactación.

REFERENCIAS

Buffington, J. M. 1999. The legend of A. F. Shields. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125, 376–387.

Buffington, J. M. y Montgomery, D. R. 1997. A systematic analysis of eight decades of incipient motion studies, with special reference to gravel-bedded rivers. *Water Resources Research*, 33, 1993-2029.

Gaucher, J., Marche, C. y Mahdi, T.-F. 2010. Experimental investigation of the hydraulic erosion of noncohesive compacted soils. *Journal of Hydraulic Engineering*, 136, 901-913.

Hjulström F. 1935. Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris. *Bulletin of Geological Institute of Uppsala*, 25, 219-527.

Nezu, I. y Nakagawa, H. 1993. *Turbulence in Open-Channel Flows*. International Association for Hydraulic Research, Rotterdam, Países Bajos.

Parker, G. 2005. *1D Morphodynamics of rivers and turbidity currents*. E-book.

Parker, D. B., Michel, T. G. y Smith, J. L. 1995. Compaction and water velocity effects on soil erosion in shallow flow. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 121, 170-178.

Shields, A. 1936. Anwendung der aehnlichkeitsmechanik und der turbulenzforschung auf die geschiebebewegung. *Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau*, 26.

Thompson, C. E. L., Amos, C. L., Jones, T. E. R. y Chaplin, J. 2003. The manifestation of fluid-transmitted bed shear stress in a smooth anular flume – a comparison of methods. *Journal of Coastal Research*, 19, 1094-1103.

Yalin, M. S. 1992. *River Mechanics*. Pergamon Press, New York, Estados Unidos.