

DOI: 10.24850/j-tyca-15-5-10

Artículos

Rugosidad e iniciación al movimiento de una protección flexible contra la erosión

Roughness and Initiation of motion on a new Flexible mattress protection to erosion

Agostina Gratton¹

Franco M. Francisca², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6965-9036>

Carlos M. García³

Andrés Rodríguez⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4110-6464>

Leticia Tarrab⁵, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5594-4848>

Gerardo Hillman⁶

¹Universidad Nacional de Córdoba (UNC), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Córdoba, Argentina, ing.agostinagratton@gmail.com

²Universidad Nacional de Córdoba (UNC), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales e Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología (IDIT) (UNC-CONICET), Córdoba, Argentina, franco.francisca@unc.edu.ar

³Universidad Nacional de Córdoba (UNC), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales e Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y



Tecnología (IDIT) (UNC-CONICET), Córdoba, Argentina,
carlos.marcelo.garcia@unc.edu.ar

⁴Universidad Nacional de Córdoba (UNC), Facultad de Ciencias Exactas,
Físicas y Naturales, Laboratorio de Hidráulica e Instituto de Estudios
Avanzados en Ingeniería y Tecnología (IDIT) (UNC-CONICET), Córdoba,
Argentina, andres.rodriguez@unc.edu.ar

⁵Universidad Nacional de Córdoba (UNC), Facultad de Ciencias Exactas,
Físicas y Naturales, Laboratorio de Hidráulica, Córdoba, Argentina,
leticia.tarrab@unc.edu.ar

⁶Universidad Nacional de Córdoba (UNC), Facultad de Ciencias Exactas,
Físicas y Naturales, Laboratorio de Hidráulica, Córdoba, Argentina,
gerardo.hillman@unc.edu.ar

Resumen

La erosión constituye uno de los problemas habituales de la hidráulica fluvial y costera. Existen numerosas tipologías para su control, desde estructuras discontinuas como espigones de variados tipos y continuas como enrocados, gaviones y colchonetas. En este trabajo describa una configuración de manta articulada flexible y superponible para el control de la erosión hidráulica. Se presentan los ensayos experimentales para evaluar rugosidad, comportamiento hidráulico y estabilidad al inicio de movimiento de la misma, demostrando su efectividad frente a alternativas como enrocados. Los resultados muestran que una manta de bloques constitutivos (de densidad $\rho = 1,92 \text{ Kg/m}^3$ y altura igual a 1 cm) con sus

respectivos conectores flexibles se comporta igual a un lecho de sedimentos ($\rho=1,65 \text{ Kg/m}^3$) de diámetro característico igual a 2 cm, en lo que respecta a su rugosidad y a su condición de iniciación al movimiento. Esto permite concluir que las protecciones flexibles desarrolladas para el control de la erosión presentan una alta efectividad, buen desempeño y menores volúmenes y costos asociados.

Palabras clave: erosión fluvial y costera, experimentación hidráulica, rugosidad, tensión de corte crítica

Abstract

Shore erosion is one of the typical problems of the river and coastal hydraulics. There are different typologies to control this problem, including discontinuous structures, such as breakwaters, and continuous structures as rip-rap, gabions, and mattresses. This paper describes a flexible and stackable articulated blanket configuration for hydraulic erosion control. The experimental tests include the characterization of roughness, hydraulic behavior, and stability of the articulated blanket. The results are compared with those expected for rock filling, a classical alternative for erosion control. The results show that the articulated structure developed in this work (density $\rho = 1.92 \text{ Kg/m}^3$ and height equal to 1 cm) behaves similarly to a bed of sediments ($\rho = 1.65 \text{ Kg/m}^3$) with a characteristic diameter equal to 2 cm. The results confirm that the flexible protection developed for erosion control presents high effectiveness, good performance, and lower volumes and costs.

Keywords: fluvial and coastal erosion, hydraulic experiments, roughness, critical shear stress

Recibido: 23/06/2022

Aceptado: 11/05/2023

Introducción

Para las protecciones contra la erosión hídrica en costas marinas y márgenes fluviales y marítimas existen hoy una variada cantidad de opciones que deben seleccionarse cuidadosamente considerando aspectos técnicos, económicos, ambientales y sociales. Una buena revisión de estado del arte se puede consultar en Fracassi (2018) para protección de márgenes de ríos y Kamphuis (2020) para costas sometidas a la acción de oleaje.

Dentro del tipo de soluciones tecnológicas, las protecciones pueden ser discontinuas (ej. espigones) o continuas. Estas últimas a su vez pueden ser rígidas o flexibles. Las de tipo rígido se han ido abandonando en su uso por su incapacidad de acompañar las deformaciones del suelo y su alto costo. Por ello han comenzado a utilizarse las de tipo continua y flexible, como las compuestas por elementos articulados, que presentan



alternativas como moldes rellenables (ECORASTER, 2022), unidades de concreto como BetonFlex (CORIPA, 2020), o concreto articulado (ECOMEX, 2022), entre otros. Una revisión de distintos tipos de protecciones de bloques de concreto flexible se presenta en Gratton (2008), y de variantes flexibles en MACAFERRI (2022), y recientemente en Nelson et al.(2023) En la bibliografía como Klaassen et al. (2005) y Pilarczyk (2000 y 2008), se observa que en general estos tipos son utilizados en márgenes o taludes fluviales donde la acción desestabilizante es principalmente debida a las tensiones de corte y fluctuaciones de presión generadas por las variaciones de las corrientes fluviales.

El diseño típico de una protección continua y flexible contempla una base consolidada, una geomembrana y una o más capas de elementos pesados y articulados. Un ejemplo de este tipo de análisis se realizó en 2005 en ocasión de estudiar las defensas en las costas del estuario del Río Grande, Tierra del Fuego, Argentina donde la gran carrera de marea, fuertes vientos y oleaje ocasional dificultaban la selección del tipo de defensa óptima (Francisca et al., 2005).

El objeto de este trabajo consiste en mostrar el comportamiento de una manta flexible, articulada y encastrable, capaz de generar estructuras de protección diversas. Se busca evaluar las principales características de las mismas para su posterior diseño hidráulico, incluyendo rugosidad, resistencia al flujo y estabilidad, y tensión de corte crítica para la iniciación al movimiento.

Sistema de protección

La protección presentada en este trabajo consta de unidades troncocónicas de concreto vinculadas entre sí con cuerdas sintéticas en una grilla ortogonal, que pueden funcionar como bicapa y apilarse en un número mayor de ser necesario (Figura 1). Este diseño es original y fue patentado en distintos países (ej. en Argentina INPI, 2007).

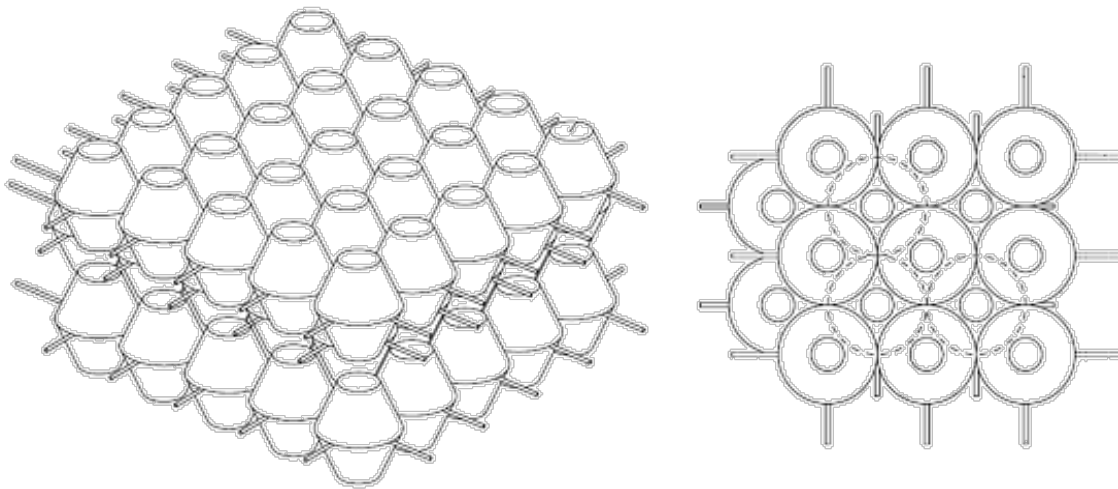


Figura 1. Esquema de colocación de las mantas flexibles de unidades de concreto troncocónicas: a) vista 3D, b) vista superior.

Algunas ventajas de las protecciones mencionadas, son que pueden apilarse en capas que tienen trabazón por la geometría que permite un

buen encastre, con lo cual se logra mayor una estabilidad sin incrementar el peso y tamaño de cada elemento. Adicionalmente, pueden construirse localmente con la consecuente disminución de los costos de transporte.

Geometría de los bloques

Cada bloque resistente del sistema es un volumen poliédrico formado por la superposición invertida de dos cuerpos tronco-cónicos. La Figura 2a muestra esquemáticamente la geometría de los bloques en cuestión y en la Figura 2b se puede observar la perspectiva del mismo. Los cuerpos que integra el bloque presentan una superficie inferior y superior de forma circular (Figura 2a), con diámetro D y d respectivamente, cuya relación es aproximadamente igual a dos; esto es: $D \approx 2d$. El ángulo entre la superficie cónica y la vertical es igual a 27° . En cuanto a la altura total del bloque H , es aproximadamente igual al diámetro central del mismo ($H \approx D$). De manera alternativa, para aplicaciones en superficies transitables se desarrollaron piezas cuyo cuerpo superior es tronco piramidal (Figura 2b).

Tanto el peso como el tamaño de los bloques son variables a determinar según el caso en que se pretenda utilizar este sistema. En general, la elección estará determinada por el tipo de margen a proteger, la disponibilidad de materiales (y sus costos de transporte) en el sitio, el

método constructivo, la posibilidad de colorarlo en multicapas, el tamaño del paño, etc.

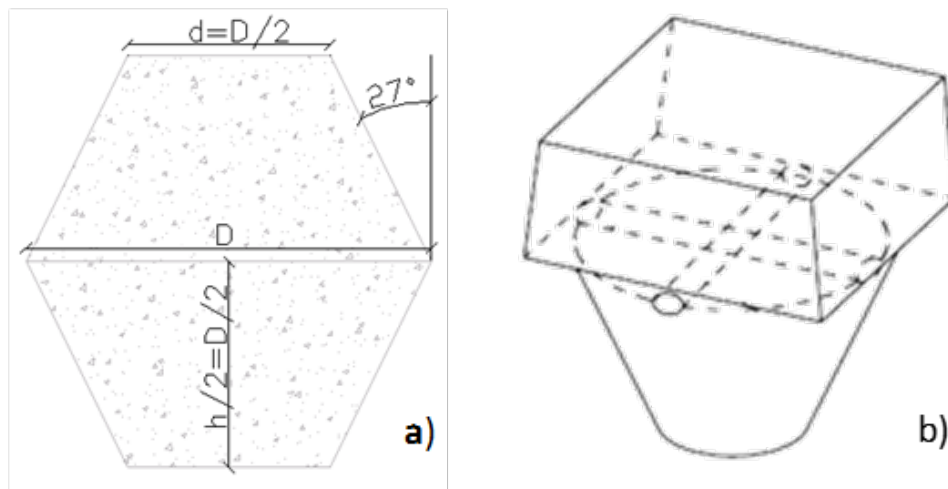


Figura 2. Geometría de los bloques. a) geometría original, b) geometría con cuerpo superior tronco piramidal para cubiertas transitables

Materiales y métodos

Los experimentos para caracterizar hidráulicamente el sistema de protección se dividieron en dos partes. La primera parte orientada a obtener el coeficiente de fricción de las mantas y la segunda para la determinación de la tensión de corte crítica al inicio de movimiento de las

mismas por deslizamiento y levantamiento. Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, y corresponden a experimentos en régimen permanente de un flujo turbulento con velocidades medias entre 0,5 m/s y 1,0 m/s, para obtener la estabilidad o iniciación de movimiento de las mantas flexibles. Se ensayó en un canal de vidrio de pendiente S variable de 14 m de longitud, 0,5 m de ancho, 0.9 m de alto. Los experimentos fueron con pendiente $S=0,1\%$, caudales Q en un rango de 0,07 m³/s a 0,0385 m³/s, aforados con vertedero triangular utilizando limnímetros de punta y tomas estáticas de presión. Las velocidades se midieron con un sensor ultrasónico ADV Sontek 3D a 50 Hz y con un equipo laser PIV Dantec 2DV, Figura 3.

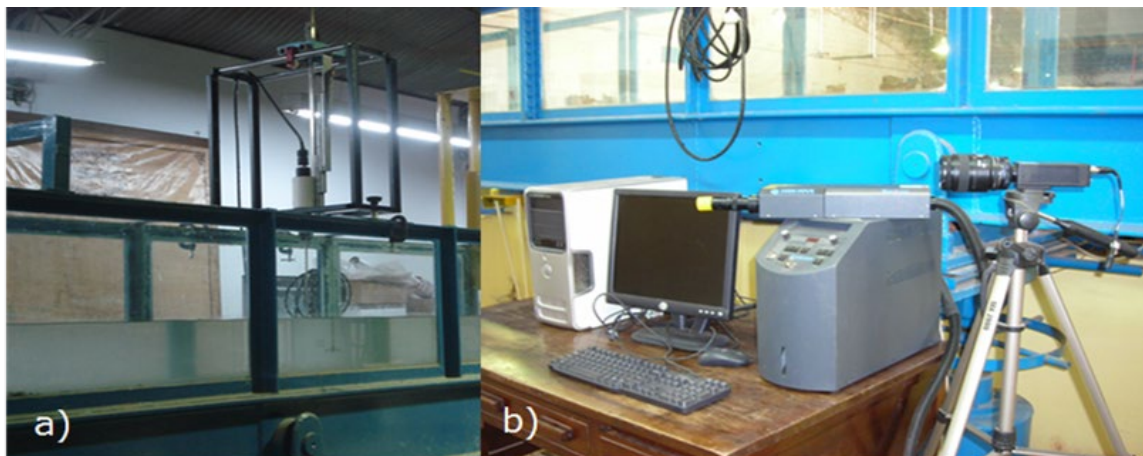


Figura 3. a) ADV Sontek 3D YSI y b) PIV Laser Dantec 2DV.

Para caracterizar hidráulicamente las mantas flexibles los experimentos se dividieron en:

1. Resistencia al escurrimiento:

- 1.1 con fondo de grava (para comparar con la de las mantas).
- 1.2 en un tramo de 2 m de longitud con fondo de mantas flexibles.

2. Tensión de corte crítica al movimiento de las mantas por levantamiento.

Las mantas ensayadas se muestran en la Figura 4. Éstas se construyeron cuidadosamente para cumplir las condiciones geométricas del diseño. La densidad fue de $\rho_s = 1,91 \text{ gr/cm}^3$.

Con el fin de evaluar la rugosidad de las mantas flexibles, se realizó una comparación con fondos de grava. Se utilizó grava con diámetro medio D_{50} de 20 mm, con una capa de fondo de 50 mm de espesor (Figura 5). En la Figura 6 se presenta un corte longitudinal y transversal del canal utilizado en los ensayos.

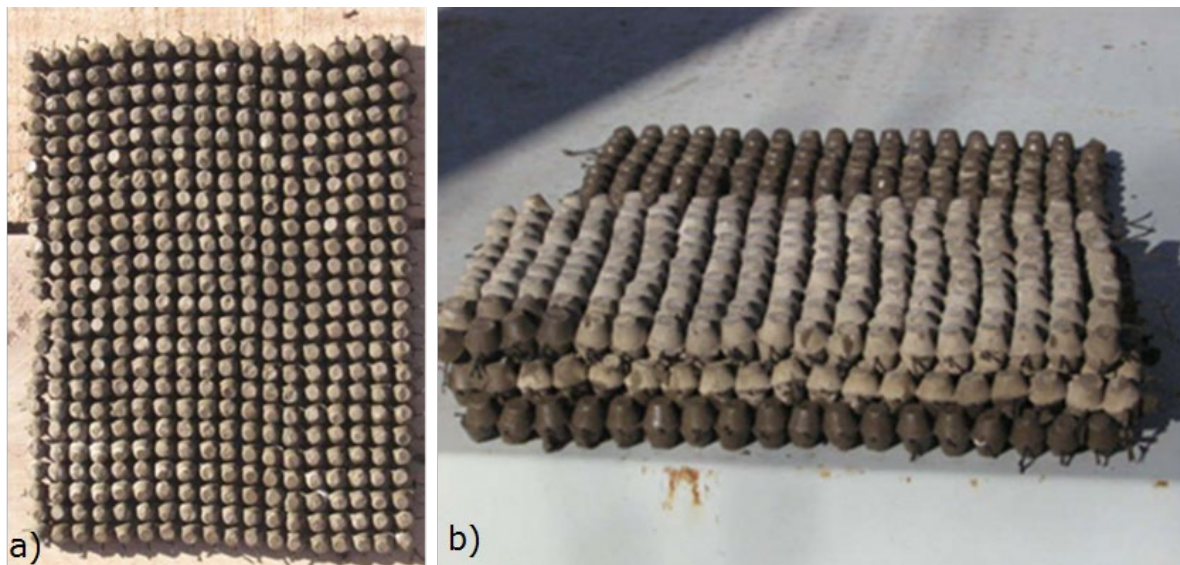


Figura 4. a) vista superior de una manta con elementos de 10 mm de altura y ancho y largo de 18 por 23 cm y b) tres capas apiladas.



Figura 5. Vista desde aguas abajo del fondo de grava $D_{50} = 20$ mm

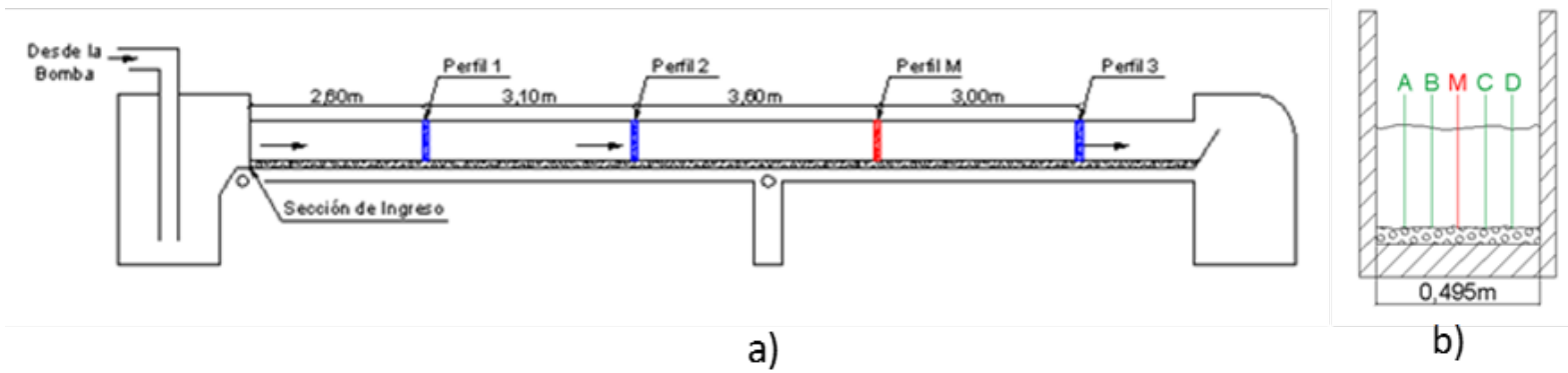


Figura 6. Ensayos con fondo de grava: a) corte longitudinal del canal y ubicación de los perfiles verticales de velocidad horizontal medidos, b) corte transversal en el perfil M donde se observa rugosidad compuesta (paredes de vidrio y fondo de grava). Se midieron 5 perfiles en la sección.

Para un flujo uniforme el factor de sección de Manning es:

$$AR^{2/3} = \frac{nQ}{\sqrt{S}} \quad (1)$$

Luego, de la expresión (1) se deduce que para una determinada condición de n , Q y S existe sólo una profundidad posible para mantener un flujo uniforme. Esta profundidad es la llamada profundidad normal, que es constante en cada sección del canal. Las condiciones de ensayo fueron caudal $Q = 0,0385 \text{ m}^3/\text{s}$, el tirante normal $h = 17,8 \text{ cm}$, la pendiente del

canal $S=1,0^0/00$ el área mojada $A = 0,089 \text{ m}^2$, el perímetro mojado $P_w = 0,856 \text{ m}$ y el radio hidráulico $Rh = 0,104 \text{ m}$

Para estimar la rugosidad compuesta n_{equiv} se utilizó la ecuación de Hortón (1933):

$$n_{equiv} = \left[\frac{\sum_1^i (P_i n_i^{1.5})}{\sum_1^i P_i} \right]^{2/3} \quad (2)$$

donde n_i es el coeficiente de Manning del perímetro mojado P_i .

Por otro lado, se tiene que:

$$n_{equiv} = \frac{AR^{2/3}S^{1/2}}{Q} = 0,0161 \quad (3)$$

Combinando las ecuaciones (2) y (3), con $i=3$, $n_{vidrio} = 0,01$ (determinado experimentalmente en el canal) y despejando n_{fondo} se obtuvo un coeficiente de Manning para la grava $n_{grava1} = 0,0204$

Para flujo uniforme y siendo g la aceleración de la gravedad se puede relacionar los dos parámetros de rugosidad más comúnmente utilizados en la práctica para el estudio de flujos en canales abiertos son el coeficiente de fricción de Manning n , y la altura de rugosidad equivalente k_s . Mediante la ecuación (4) de Manning-Strickler (Govers et al., 2007) se calculó el valor de ks_{grava1} de $0,0204 \text{ m}$.

$$n = \frac{k_s^{1/6}}{8g^{1/2}} \quad (4)$$

Evaluación de iniciación al movimiento

Las condiciones de iniciación de movimiento de la manta se realizaron mediante el criterio de Shields (Shields, 1936) el cual ha sido extensamente validado para fondos móviles (Miedema, 2010). Una modificación a la curva de Shields fue propuesto por Brownlie (1981) que permite calcular el valor de la tensión de corte crítica adimensional τ_c^* mediante la ecuación 5.

$$\tau_c^* = 0,22 R_{ep}^{-0.6} + 0,06 e^{(-17,77 R_{ep}^{-0.6})} \quad (5)$$

donde, el número de Reynolds de la partícula R_{ep} es definido como (e.g. Garcia 2008):

$$R_{ep} = \frac{\sqrt{GgD}D}{\nu} \quad (6)$$

siendo G la gravedad específica del sedimento sumergido,



$$G = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \quad (7)$$

donde: g la gravedad, ρ la densidad del agua, ρ_s la densidad del sedimento, D el diámetro medio del sedimento, y ν la viscosidad cinemática del fluido.

En el diagrama se observan tres curvas que permiten determinar para diferentes valores de τ^* y R_{ep} , si el sedimento de fondo se encuentra en estado de iniciación de movimiento y, si el modo de transporte que prevalece es la suspensión o el arrastre por el fondo.

La tensión de corte en el fondo puede ser calculada como:

$$\tau_b = \rho C_f V^2 \quad (8)$$

donde C_f es el coeficiente de fricción y V es la velocidad media del flujo. La velocidad media debajo de la compuerta se obtiene dividiendo el caudal por la sección de paso (ancho del canal por abertura de la misma).

En este caso el coeficiente de fricción se calculó a partir de la altura de rugosidad k_s utilizando la formulación presentada en el estudio experimental de Rajaratnam *et al.* (1990):

$$C_f = 0,0065 + 0,025 \left(\frac{k_s}{D_c} \right) \quad (9)$$

donde D_c es el espesor de la contracción del flujo, que en este trabajo corresponde a la apertura de la compuerta.

Con lo cual, reemplazando (9) en (8) y se pudo obtener de la siguiente manera la tensión de corte adimensional:

$$\tau^* = \frac{\tau_b}{\rho g G D} \quad (10)$$

Los ensayos para determinar la iniciación de movimiento se configuraron con lechos de tres tipos de gravas y flujo uniforme. Para las condiciones de flujo uniforme aún con el máximo caudal ($0,07 \text{ m}^3/\text{s}$) y la máxima pendiente del canal ($S=1\%$) no se alcanzaron tensiones de corte adimensionales τ^* mayores a la tensión crítica ($0,057$). El segundo tipo de experimento permitió aumentar las velocidades y tensiones de corte mediante la contracción generada por el descenso de una compuerta ubicada a $8,00 \text{ m}$ desde el inicio del canal (Figura 7). La compuerta operó en descarga libre (no ahogada).

Los ensayos se realizaron colocando en el fondo del canal, en un tramo determinado, sedimentos de diferentes características granulométricas. Después de los ensayos con los sedimentos, se colocaron las mantas desarrolladas en dos configuraciones diferentes y se repitió la metodología para determinación de iniciación de movimiento. La Tabla 1 presenta una síntesis de las configuraciones ensayadas. Las mantas cubrieron una longitud de 2 anchos del canal centradas abajo de la

compuerta. Las mismas fueron colocadas a partir de la progresiva 7,5 m desde el inicio del canal.

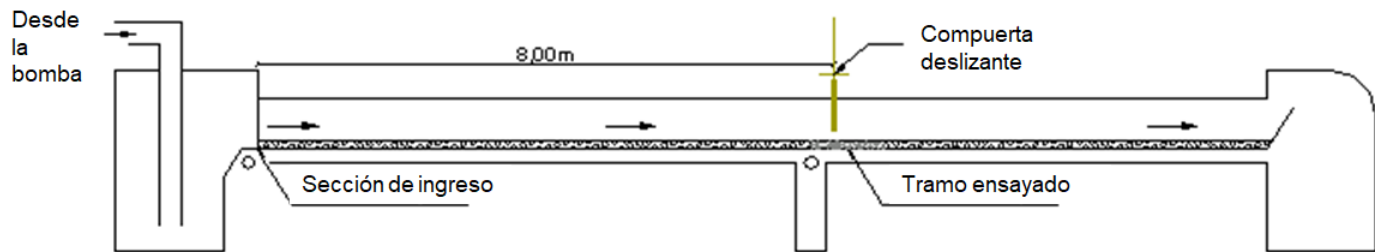


Figura 7. Esquema del canal y posición de la compuerta (prog. 8 m).

Para corroborar la representatividad de los resultados de los experimentos para cada material de fondo, cada ensayo fue realizado dos veces y en todos los casos ambos ensayos arrojaron el mismo resultado.

Tabla 1. Materiales y configuraciones utilizados en los ensayos de iniciación de movimiento.

ENSAYO	MATERIAL	D_{50} (mm)
1	Grava	20,0
2	Piedra Triturada	12,5
3	Grancilla	6,0
4	Mantas colocadas en capa simple	
5	Mantas colocadas en capa doble	

- D_{50} = Diámetros medios



Resultados

Perfiles de velocidad con ADV y fondo de grava

Se realizaron perfiles de velocidad en 4 progresivas (Figura 6b) a fines de determinar la uniformidad del flujo y el k_s de la grava. Tomando series de tiempo de 90 s en cada punto con el ADV a 25 Hz. El caudal fue $Q = 0,0385 \text{ m}^3/\text{s}$. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 8.

Entre las progresivas 6 m (perfil 2) y 10 m (abajo del perfil M), se observó flujo uniforme desarrollado. La longitud de transición necesaria para que la capa límite turbulenta alcance el tirante normal fue cercana a los 6 m. Con lo que se verifica que la progresiva de la sección en que se realizaron las mediciones fue correcta.

Si se compara el perfil de velocidades obtenido (Figura 8) con la distribución teórica de velocidades logarítmicas en un canal con flujo uniforme turbulento e hidráulicamente rugoso:

$$\frac{V}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{y}{k_s} \right) + 8,5 \quad (11)$$



donde u^* es la velocidad de corte, κ es la constante de Von Karman (igual a 0,4) y k_s la altura efectiva de la rugosidad de las mantas. A partir de la ecuación (11) se obtuvo el valor de $ks_{grava2} = 0,0180$ m y a mediante la ecuación (4) se obtuvo un $n_{grava2} = 0,0209$. La diferencia fue del orden del 2% en n con respecto a los valores obtenidos con la formulación de la rugosidad equivalente.

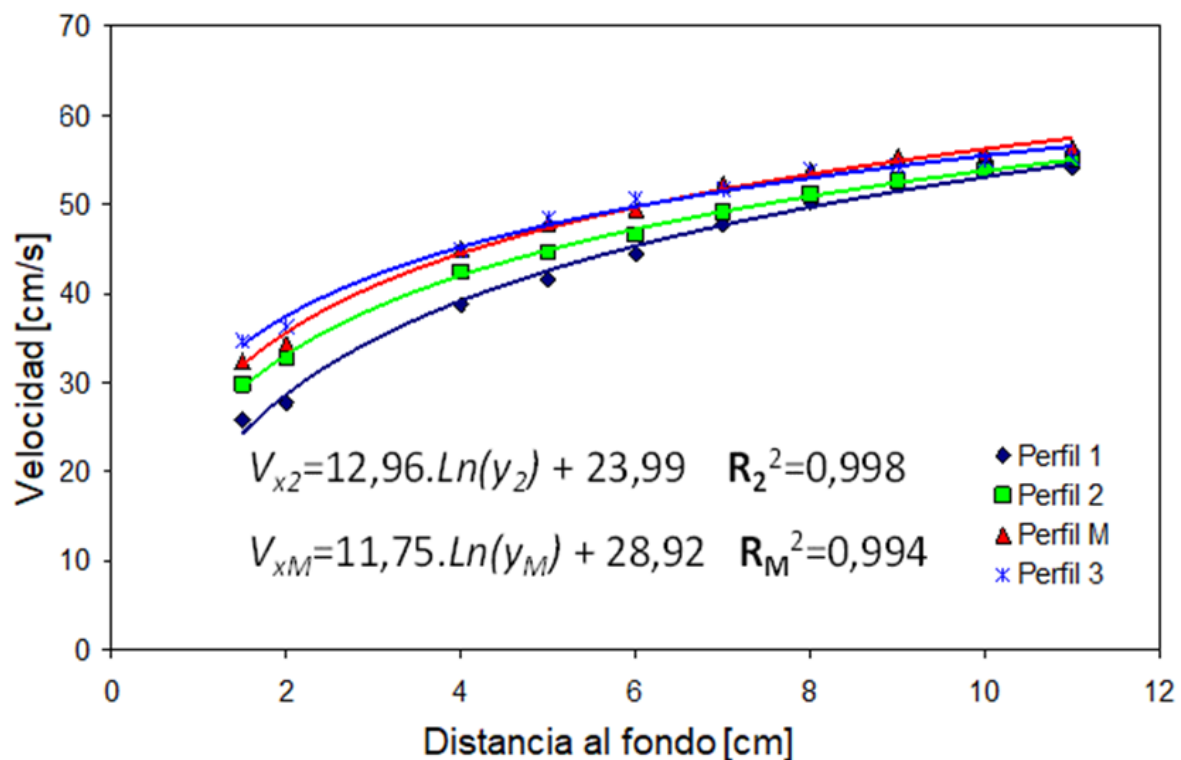


Figura 8. Perfiles de velocidad sobre el fondo de grava en secciones a lo largo del canal, en función de la distancia al fondo y .

Rugosidad inducida por las mantas

Una vez verificada la condición de flujo uniforme en el canal experimental, se ensayó el modelo del sistema de protección con el fin de conocer la rugosidad que el mismo induce. Para determinar los coeficientes de altura de rugosidad k_s y n de Manning que caracterizan la rugosidad inducida por el sistema de protección se utilizaron tres alternativas. Las mismas consistieron en un cálculo teórico y la determinación a partir de dos mediciones independientes de velocidad mediante un instrumento acústico Doppler (ADV) y la técnica de velocimetría de imágenes de partículas (PIV). La ventaja del último, respecto del ADV, radica en que permite realizar mediciones de velocidad a distancias muy próximas al fondo y en la superficie libre del flujo. Las mediciones de PIV se realizaron para las mismas condiciones de flujo uniforme que con ADV ($Q = 0,0385 \text{ m}^3/\text{s}$), a una frecuencia de 1 Hz y durante 60 segundos.

Para el cálculo teórico con la formulación del n equivalente se aplicaron las ecuaciones básicas de la hidráulica, tal como se procedió para el caso del fondo de grava (ecuaciones 2,3 y 4). Los resultados obtenidos arrojaron un coeficiente de Manning para las mantas $n_{manta1} = 0,0205$ y altura de rugosidad $ks_{manta1} = 0,0186 \text{ m}$.

Posteriormente, se realizaron mediciones de perfiles de velocidades del flujo en un tramo del canal revestido con las mantas en un tramo entre

las progresivas 8 y 10,8 m (Figuras 9 y 10). En la Figura 10 se observan los tres perfiles seleccionados ubicados en las progresivas $P1=8,7$, $P2=9,5$ y $P3=10,3$ m, las cuales se encuentran a 0,6, 1,4 y 2,2 m respectivamente desde el comienzo del tramo revestido con mantas.



Figura 9. a) Sistema de protección colocado sobre fondo rugoso de gravas, visto desde agua abajo, (*foto del caso de fondo levemente ondulado naturalmente*), b) los experimentos fueron con mantas apoyadas en un fondo plano de madera.

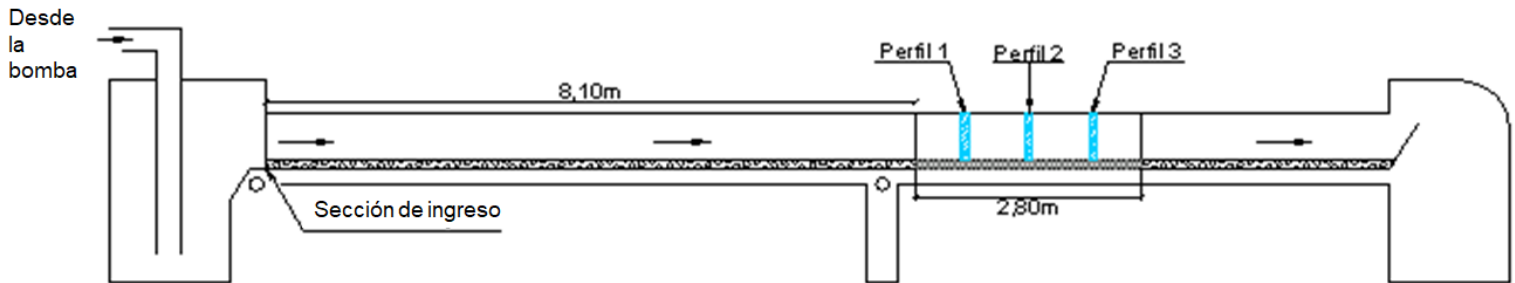


Figura 10. Corte longitudinal del canal y tramo revestido por mantas para ensayos de rugosidad

A partir de los perfiles de velocidad medidos con ADV y PIV, es posible verificar si los resultados en el canal experimental concuerdan con los teóricos calculados. Los perfiles de velocidad obtenidos mediante ambas técnicas se muestran en la Figura 11. La diferencia entre las velocidades que se obtuvieron con ADV y PIV es del 2,5%.

En el caso del ADV la curva que mejor se aproximó a la distribución logarítmica es la correspondiente a la vertical ubicada en el medio del tramo donde se ubicaron las mantas, y a una distancia de 9,50 m desde aguas arriba del canal en la vertical 2. Cabe mencionar que la vertical M de las mediciones realizadas previamente con fondo de grava, donde se constató la mejor distribución logarítmica de velocidades, se ubicaba a 9,30 m desde aguas arriba del canal, muy próximo al perfil 2.

De forma similar al caso de fondo con gravas a partir de la ecuación (11) se obtuvo una altura de rugosidad equivalente $ks_{manta2} = 0,0198$ m (muy

próximo al ks_{manta1} antes calculado). A partir de esta altura, la rugosidad de Manning calculada con las ecuaciones (3 y 4) resulta $n_{manta2} = 0,0208$.

Este segundo resultado obtenido es muy similar al valor de n_{manta} que fue calculado previamente aplicando la ecuación de Manning, según los parámetros hidráulicos medios. La diferencia relativa entre ambos valores es del 1% y se considera que los resultados obtenidos son confiables según las mediciones realizadas con ADV. Mediante mediciones de velocidad con PIV se obtuvo una tercera estimación de la altura de rugosidad equivalente y del coeficiente de rugosidad de las mantas.

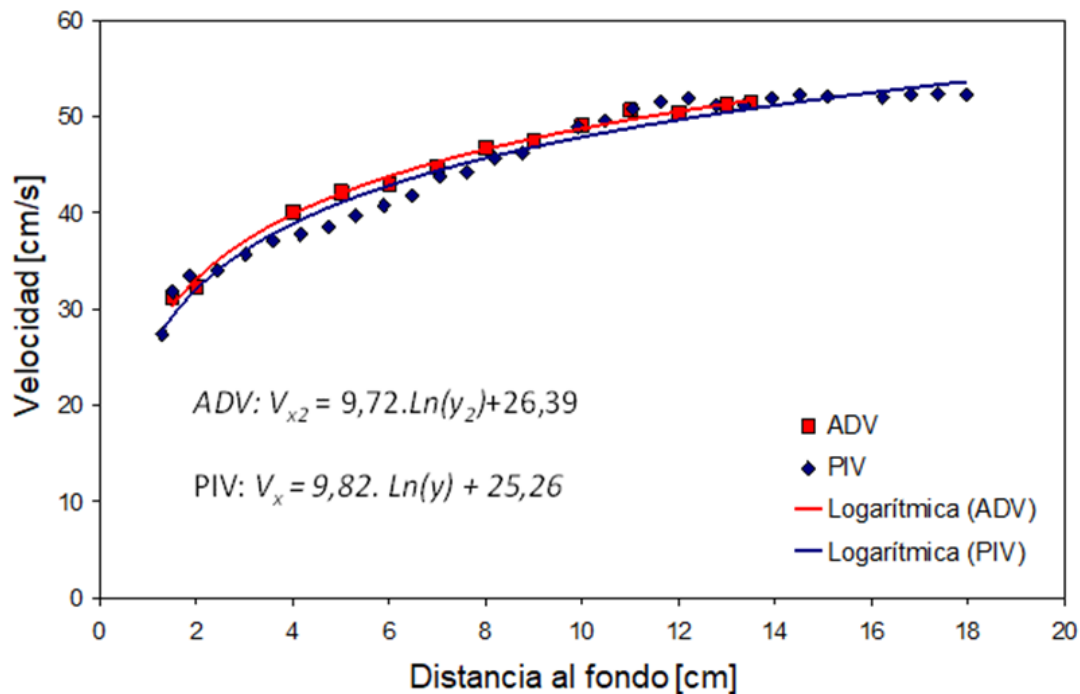


Figura 11. Perfiles de velocidad sobre fondo de manta.

Para las mediciones con PIV, la cámara digital se acomodó en la progresiva 9,80 medida desde aguas arriba del canal. No fue necesario sembrar el canal con trazadores artificiales. Esta progresiva se corresponde prácticamente con la del perfil 2 obtenido con el ADV. Respecto del láser, se ubicó en la misma progresiva apoyado en un soporte especial sobre la parte superior del canal experimental, apuntando al flujo desde la superficie libre. Un ejemplo del campo de velocidades obtenido se muestra la Figura 12. Conocido el campo de velocidades, pudieron extraerse distintos perfiles de velocidad para todo el ancho medido.

Siguiendo el mismo procedimiento, pero utilizando los perfiles de velocidad determinados con el PIV, se obtuvo una altura de rugosidad para las mantas $k_{Smanta3} = 0,029$ m y un coeficiente de rugosidad de Manning $n_{manta3} = 0,0213$. Los tres valores obtenidos para k_s y n de la manta fueron similares, con diferencias menores al 3,5%, adoptándose como valores representativos el promedio: $n_{manta} = 0,0209$ y $k_{Smanta} = 0,0225$.

Evaluación de condición de iniciación de movimiento

Se realizó el ensayo N° 1 (Tabla 1) para grava con $D_{50}=20$ mm y se determinó que el coeficiente de fricción C_f para las condiciones de ensayo era igual a 0,019. Posteriormente, se repitieron los ensayos para otros materiales granulares (piedra triturada con $D_{50} = 12,5$ mm y grancilla con $D_{50} = 6$ mm) determinándose sus condiciones de iniciación de movimiento (Figura 16). Esto permitió validar el uso del C_f obtenido, que resultó constante para todos los casos.

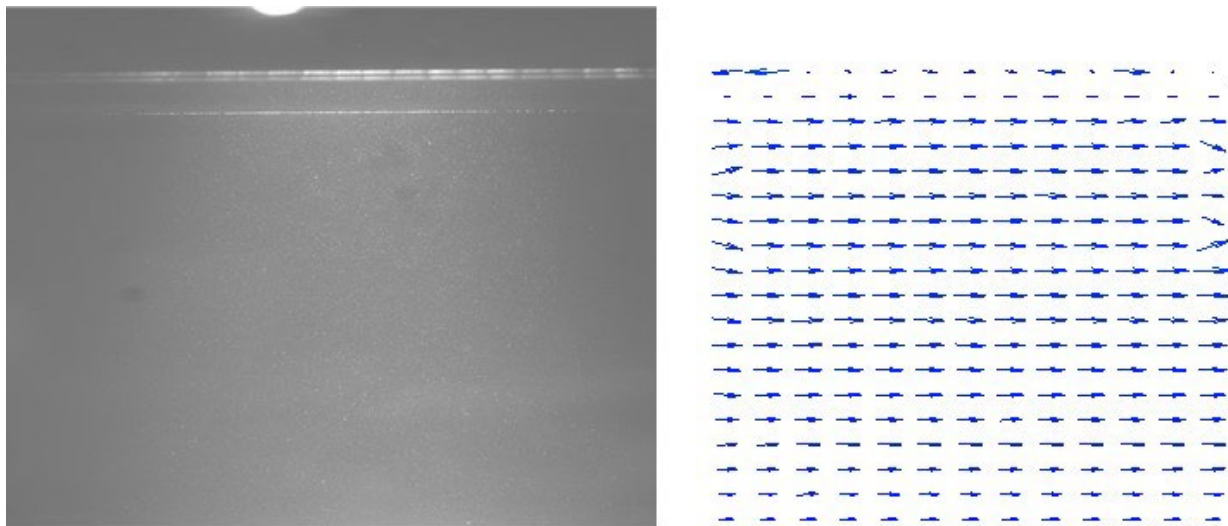


Figura 12. Plano vertical iluminado por el láser en el centro de la sección transversal de la progresiva 9,8 m (perfil 2) y campo bidimensional longitudinal de velocidades determinado mediante PIV ($V_{\text{máx}} = 51$ cm/s)

En primer lugar se procedió a evaluar la iniciación de movimiento con las mantas simples colocadas en el fondo del canal, tal como se muestra en la Figura 13. Las condiciones de ensayo iniciales se presentan en las Tablas 2 y 3, mientras que los resultados obtenidos para cada apertura de compuerta se muestran en la Tabla 4.



Figura 13. Tramo con mantas (capa simple con elementos de 10 mm de altura)

Tabla 2. Condiciones del flujo - ensayo de mantas: capa simple.

Condiciones de Flujo	
Q [m ³ /s]	0,0385
Profundidad inicial [m]	0,177
□ [Kg/m ³]	1000
□ [m ² /s]	0,000001

Tabla 3. Características obtenidas para las mantas.

Características de las mantas	
□ _s [Kg/m ³]	1,92
G (Mezcla)	0,92

En la Tabla 4 se observa que las mantas no presentaron cambio alguno para los ensayos 1, 2 y 3 (Figura 14a). A partir de allí, a medida que la compuerta se deslizó hacia abajo, las mantas comenzaron a deformarse. El intervalo temporal entre cada posición de compuerta fue de 4 min. En el ensayo 4, (apertura de compuerta de 9,2 cm), las mantas comenzaron a vibrar individualmente. En el ensayo 5, al incrementarse la velocidad del flujo las mantas comenzaron a levantarse (Figura 14b). A esta

apertura de la compuerta se observó la iniciación de movimiento de las mantas. En el ensayo 6, las mantas ubicadas más lejos de la compuerta se desprendieron y se observó socavación de la capa de grava de fondo (Figuras 14c y 14d).

Tabla 4. Condiciones del ensayo con capa simple en la sección de la compuerta.

Ensayo	D_c (m)	V (m/s)	Δp_b (Pa)	Condición	Froude	Reynolds
1	0,161	0,48	4,3	Fija	0,38	77280
2	0,144	0,53	5,4	Fija	0,45	76320
3	0,122	0,63	7,5	Fija	0,58	76860
4	0,092	0,84	13,3	Vibración	0,88	77280
5	0,085	0,91	15,5	Despegue	1,00	77350
6	0,079	0,97	18	Socavación	1,10	76630

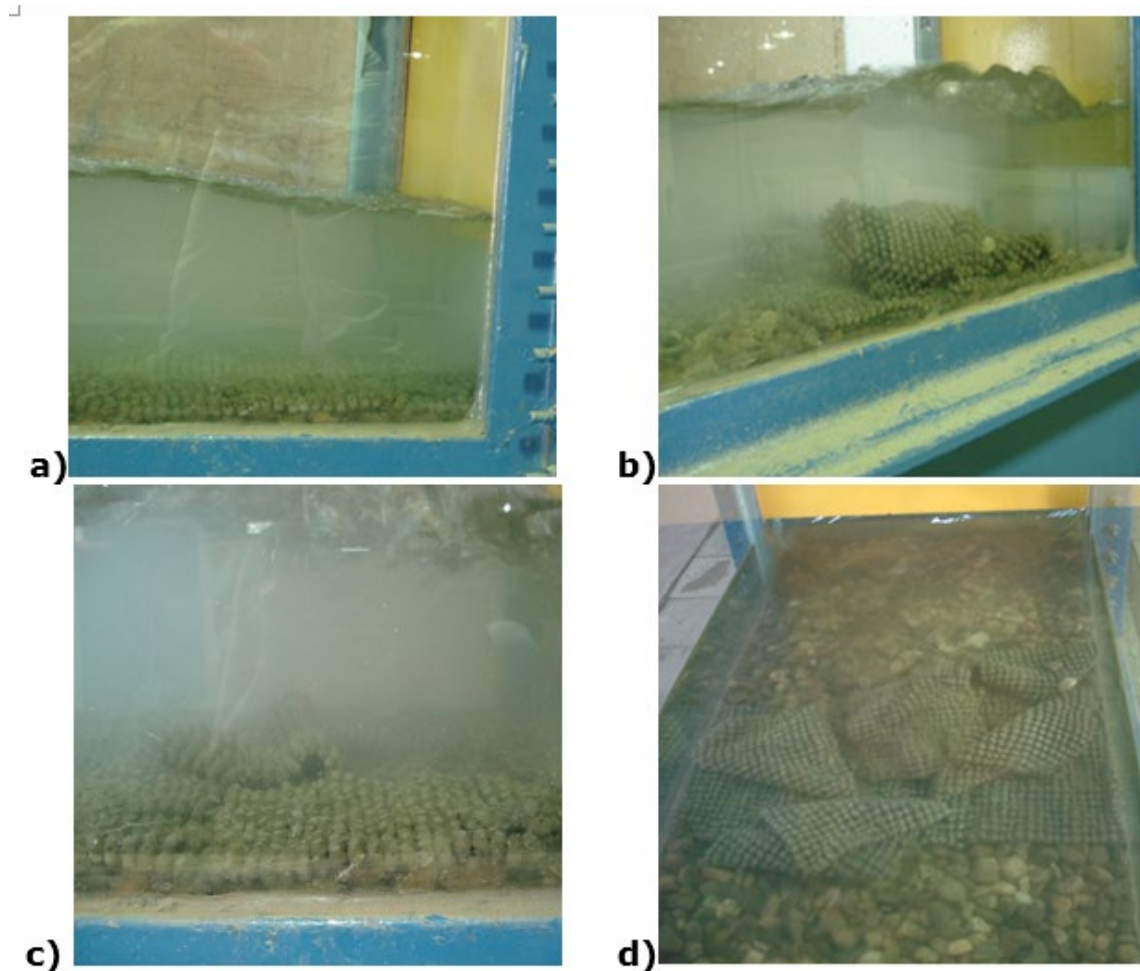


Figura 14. Etapas del ensayo de iniciación de movimiento realizado con mantas en capa simple, a) mantas en reposo, b) desprendimiento individual de mantas, c) desprendimiento general de mantas y socavación d) fin del ensayo

Se calculó el diámetro equivalente de los bloques vinculados de una manta, considerándolos como una partícula aislada de peso específico igual a la del cuarzo. Para ello, se realizaron iteraciones utilizando las

ecuaciones (5) y (10), siendo condición que el τ^*_c sea igual al τ^* adimensional calculado según el τ_b para el cual se produjo movimiento. Los resultados muestran que cada bloque de la manta con sus conectores flexibles equivale a una partícula de sedimento de 2 cm de diámetro. Tanto para las gravas de $D_{50}=20$ mm como para las mantas simples, la iniciación de movimiento se produjo para un mismo valor de apertura de compuerta ($D_c=8,5$ cm).

Los resultados obtenidos permiten afirmar que cada bloque con sus conectores flexibles equivale a una partícula de sedimento del doble de tamaño y con una densidad levemente mayor.

En el caso de la configuración con mantas dobles (superpuestas), se observó que el desprendimiento de la manta se produjo para una abertura de compuerta de 8,5 cm (punto 5 en Tabla 3). Esta misma condición fue la que produjo iniciación de movimiento para el caso de la manta simple (Figura 15). Por lo cual, en estos experimentos, la doble capa no mejoró sustancialmente la estabilidad porque el encastre (encaje entre elementos de la manta) no fue perfecto.

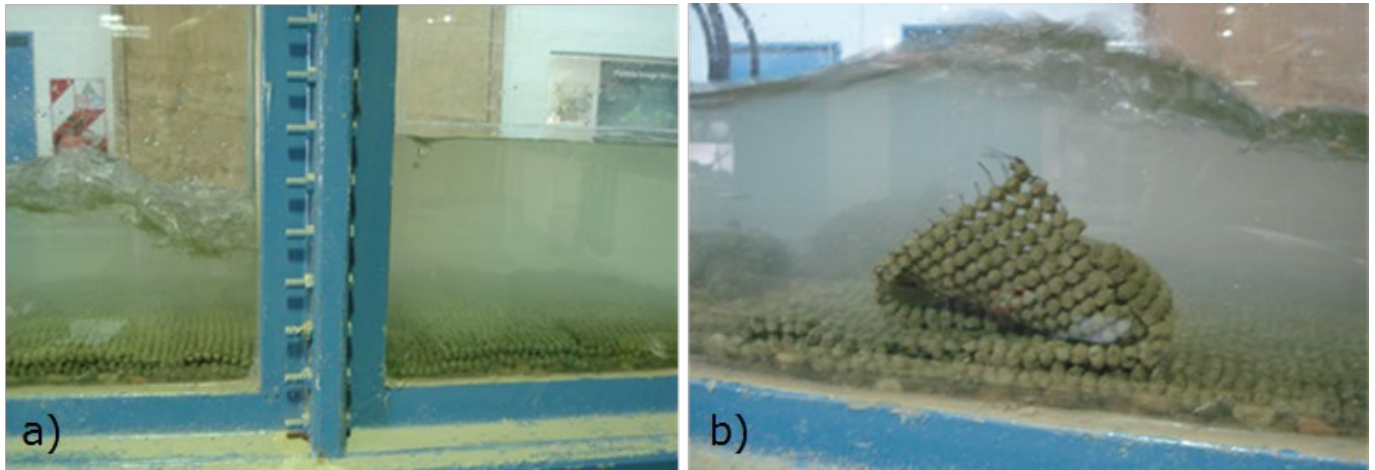


Figura 15. Ensayo de iniciación de movimiento de mantas en capa doble, a) vibración de las mantas y b) desprendimiento de capa superior de mantas e inmediato desprendimiento de la capa inferior.

Discusión de resultados

Debido a que el coeficiente de rugosidad de Manning promedio para la grava en el fondo del canal ($n_{grava} = 0,0206$) y las mantas desarrolladas en este trabajo ($n_{manta} = 0,0209$), a igualdad de condiciones hidráulicas (pendiente, caudal, área), el flujo que circula por un canal revestido con las mantas tendrá el mismo comportamiento hidráulico que si el fondo del mismo fuese cubierto con grava de un diámetro medio $D_{50} = 20$ mm. Es importante destacar que los resultados obtenidos mostraron que bloques

de 10 mm de altura presentaron una altura de rugosidad media de $ks_{\text{manta}} = 0,022$ m. Por lo tanto, un bloque de la manta con sus respectivos conectores flexibles equivale, desde el punto de vista de la rugosidad, a un grano de sedimento de diámetro igual o levemente mayor al doble de la altura del bloque.

Análisis de semejanza para la rugosidad

Los resultados obtenidos en el modelo pueden ser extrapolados a un prototipo para conocer el comportamiento de las mantas en un caso real. Con similitud geométrica entre el modelo y el prototipo, y asumiendo un modelo de Froude, resulta que la escala de rugosidad λ_n es igual a $\lambda_L^{1/6}$, siendo λ_L la escala de longitud entre el prototipo y el modelo. Conocida la altura de los bloques del modelo ($H_m = 10$ mm), en la Tabla 5 se proponen diferentes escalas de longitud y se calculan los valores de n de Manning correspondientes.

Tabla 5. Relación de semejanza entre coeficiente de rugosidad de Manning en modelo y prototipo para mantas con altura $H_m = 10$ mm.

L modelo H_m [m]	Escala de L $\square_L = L_p / L_m$	L prototipo H_p [m]	n modelo	Escala de n $\square_n = n_p / n_m = \square_L^{1/6}$	n prototipo
0,01	1	0,01	0,0205	1,000	0,021
0,01	10	0,1	0,0205	1,468	0,030
0,01	20	0,2	0,0205	1,648	0,034
0,01	50	0,5	0,0205	1,919	0,039
0,01	100	1	0,0205	2,154	0,044
0,01	200	2	0,0205	2,418	0,050

Comparación entre la estabilidad de sedimentos gruesos y las mantas

La Figura 16 muestra que todos los ensayos se ubican sobre la línea que define la situación crítica de movimiento. Además, se encuentran en el tramo $\square^*$ constante igual a 0,019 (Cf no dependiente de Reynolds). Se observa que las mantas sin costura tienen una estabilidad equivalente a una grava del doble de su diámetro. Las coordenadas del gráfico de Shields para la manta son: $Rep_{malla} = 11379$ y $\square^*_{malla} = 0,065$.

Análisis de semejanza para iniciación de movimiento

Los resultados obtenidos en el modelo reducido pueden ser extrapolados al prototipo para conocer el comportamiento del sistema de protección contra erosión de suelos en un caso real. Para esto debe verificarse la igualdad de tensiones de corte adimensional de modelo y prototipo. Esto se traduce en decir que el τ_c^* que da lugar a la iniciación de movimiento en el prototipo es igual a 0,057, Para que se cumpla debe considerarse el tipo de material y determinarse λ_D en función de las escalas de longitud λ_L y de gravedad específica λ_G , Si los materiales son los mismos $\lambda_G = 1$, Caso contrario, si el prototipo se elabora de un material distinto al del modelo puede usarse la Tabla 6, donde se determinó el tamaño que debe tener un bloque del prototipo del sistema de protección contra erosión si el mismo es elaborado en hormigón (H-24), para que el τ_c^* del prototipo sea igual a 0,057 (que es el determinado para el modelo). En este caso $D_m = 1$ cm y $G_m = 0,92$.

Tabla 6. Relación de semejanza entre el modelo y del prototipo.

Material	G <i>prototipo</i>	Escala G $I_G = G_m / G_p$	Escala L $I_L = L_m / L_p$	L <i>prototipo</i> [m]	Escala D $I_D = I_L / I_G$	D <i>prototipo</i> [m]
Cemento	0,92	1	1	0,01	1	0,01
			10	0,1	10	0,1
			20	0,2	20	0,2
			50	0,5	50	0,5
			100	1	100	1
			200	2	200	2
Hormigón	1,40	0,66	1	0,01	0,66	0,007
H-24			10	0,1	6,58	0,07
			20	0,2	13,16	0,13
			50	0,5	32,89	0,33
			100	1	65,79	0,66
			200	2	131,57	1,32

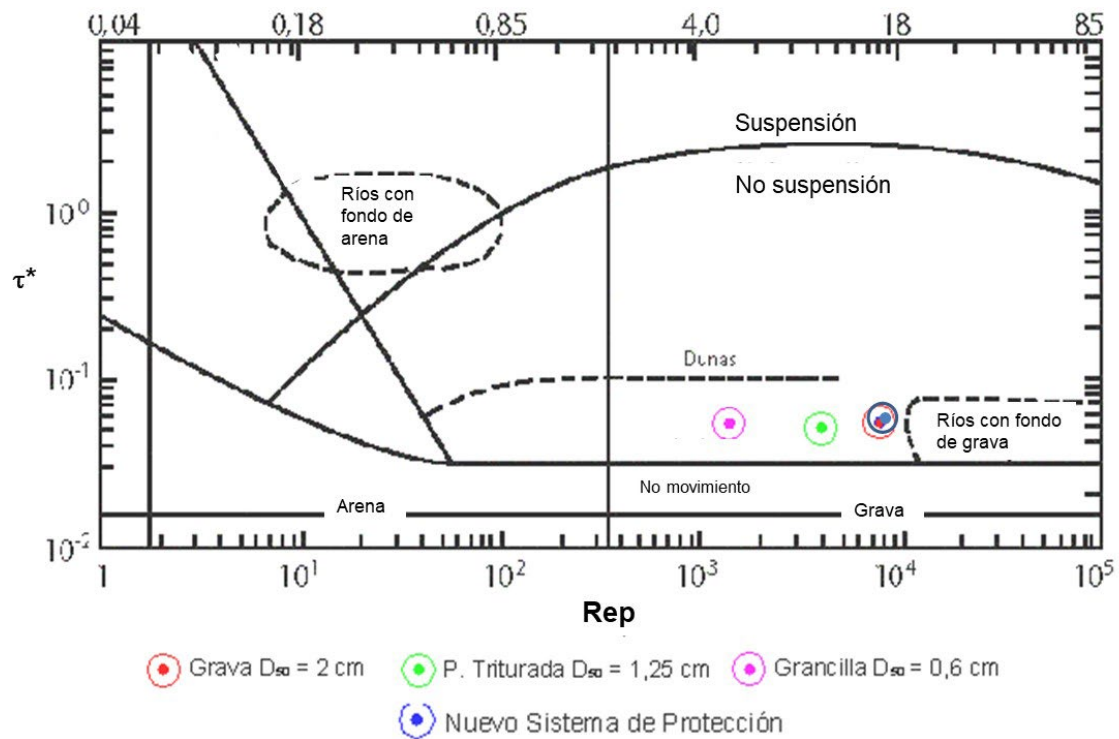


Figura 16. Representación de la condición de movimiento observada para los materiales granulares, en el diagrama de Shields Modificado.

Conclusiones

Se ensayaron gravas y mantas flexibles para determinar la rugosidad en condiciones de flujo permanente, uniforme y turbulento. Para estas condiciones es válida la ecuación de Manning y el uso de su coeficiente de resistencia n . El coeficiente de Manning de las mantas representativo de

la rugosidad inducida se estimó de diferentes maneras: a partir de los parámetros del flujo medio y a partir del ajuste de un perfil logarítmico de velocidades medido con ADV y PIV siendo su valor medio de $n=0,0208$ y de $k_s= 2,03$. Cada bloque del sistema de protección contra erosión propuesto con sus respectivos conectores flexibles equivale, desde el punto de vista de su comportamiento hidráulico, a una partícula de sedimento aislada de dimensión igual al doble de la del bloque.

Se determinó que la tensión de corte crítica (τ^*_c) para el modelo del sistema de manta (simple capa de 10 mm de altura) es igual a 0,057. Esta tensión de corte crítica se corresponde con la τ^*_c calculada para la grava de $D_{50} = 20$ mm. Esto permite concluir que un bloque constitutivo del sistema de protección en estudio (de densidad específica igual a 0,92 y altura igual a 1 cm) con sus respectivos conectores flexibles se comporta igual a una partícula de sedimento de cuarzo ($G=1,65$) de diámetro característico igual a 2 cm, frente a condiciones de iniciación de movimiento. Por lo cual, un bloque de la manta vinculado, equivale a una partícula de sedimento aislada del doble de su tamaño. Por otra parte, no se encontró mayor estabilidad en la configuración bicapa. El mismo resultado de $\tau^*_c = 0,057$ se obtuvo cuando se ensayó con una configuración de mantas superpuestas. La causa principal a la que se le adjudica este comportamiento es al hecho de que, si bien en la teoría los espacios interbloques de las mantas tienen la forma adecuada para que se encastran en ellos los bloques, en la práctica no se logró la superposición exacta entre mantas. Esto generó que la transmisión de

esfuerzos entre mantas superpuestas no sea eficiente, y que cada una responda individualmente a los efectos de la corriente.

Los resultados permiten ser extrapolados para prototipos de diferentes tamaños respecto del modelo, y elaborados con un material distinto al que se utilizó para la elaboración de las mantas del sistema de protección.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Laboratorio de Hidráulica de la FCEFyN de la UNC por las facilidades experimentales, apoyo de personal y financiación de los ensayos. También se menciona el valioso aporte del Ing, Juan Carlos Amuchástegui.

Referencias

- Amuchástegui, J., Francisca, F., García, M., & Rodriguez, A. (2011). Estructura Articulada para consolidación de suelos (para control de la erosión hídrica). *Revista Tecnología, Investigación y Gestión, CETA, UNC, Argentina*, 1(1), 8-9. ISSN 2525-0582.
- Brownlie, W. (1981). *Compilation of alluvial channel data: laboratory and field* (Technical Report KH-R-43B). Pasadena, California, USA: California Institute of Technology.
- CORIPA. (2020). BetonFlex®. Recuperado de <http://www.coripa.com.ar/novedad/94-betonflex-una-solucion-ecologica-e-ideal-para-proteccion-de-costas>



- ECOMEX. (2022). Concreto Articulado. Recuperado de <https://ecomex.com.mx/service/concreto-articulado/>
- ECORASTER. (2022). ECORASTER, el sistema de estabilización de superficies inclinadas. Recuperado de <https://www.ecoraster.com/es/aplicaciones/proteccion-contra-la-erosion>
- Fracassi, G. (2018). Defensas rivereñas con soluciones. San Pablo, Brasil: Maccaferri, Ed, Oficina de Textos.
- Francisca, F., Giovine, L., Rodriguez, A., Moya, G., Hillman, G., Pagot, M., & Corral, M. (2005). Protección de las Márgenes del Río Grande en Tierra del Fuego. Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente, (21), 59-69. ISSN 0326-1921.
- Garcia, M. (2008). Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling and Practice (ASCE Manual of Practice 110). USA.
- Govers, G., Giménez, R., & Van Oost, K. (2007). Rill erosion: exploring the relationship between experiments, modelling and field observations. Earth-Science Reviews, 84(3-4), 87-102.
- Gratton, A. I. (2008). Comportamiento hidráulico de un nuevo Sistema de protección contra erosión de suelos (Trabajo Final de Ingeniería Civil). Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Horton, R. E. (1933). Separate Roughness Coefficients for Channel Bottom and Sides. Engineering New Record, 111(22), 652-653.

- INPI - Instituto Nacional de la Propiedad Industrial. (2007). Patente compartida [Patent shared]. Autores: Dres, A. Rodríguez, F. Francisca y M. García (24.5% UNC y 24.5% CONICET) e Ing, J.C. Amuchástegui (51%). Título: Estructura articulada de desarrollo superficial para consolidación de suelos [Articulated structure for surface development for soil consolidation]. Código: P-070100955. Intellectual Property Agent: ETERRA Trade Mark & Patents y OIT UNC, Argentina.
- Kamphuis, J. W. (2020). Introduction to Coastal Engineering and Management (3ra ed., Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 16). Londres: World Scientific.
- Klaassen, G. J., Pilarczyk, K. W., & San, D. C. (2005). River bank erosion and mitigation strategies in Vietnam. En Van, A., & Van Beek, T. (Eds.), *Floods from Defence to Management* (pp. 269-279).
- MACCAFERRI. (2022). Colchones de bloques de concreto articulados. Recuperado de <https://www.maccaferri.com/mx/productos/colchones-de-bloques-de-concreto-articulados/>
- Nelson, L., Campbell, M., & Nelson, R. (2023). Stabilizing structural fills (Patente USA number 11555286).
- Miedema, S. A. (2010). Constructing the Shields curve, a new theoretical approach and its applications. En WODCON XIX, Beijing China.
- Pilarczyk, K. (2000). Geosynthetics and geosystems in hydraulic and coastal engineering. CRC Press.

- Pilarczyk, K. (2008). Alternatives for coastal protection. *Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 23, 181-188.
- Rajaratnam, N., & Wu, S. (1990). Circular Turbulent Wall Jets on Rough Boundaries. *Journal of Hydraulic Research*, 28(5), 581-589.
- Shields, A. (1936). Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. Mitteilung der Preussischen Versuchsanstalt fur Wasserbau und Schiffbau, Heft 26, Berlin.