

Protección de estribos de puentes mediante el uso de muros guía

Guide walls as a countermeasure for bridge abutments

Marcela L. Reynares¹

Graciela B. Scacchi²

María Luisa Possi³

Mario I. Schreider⁴

¹Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina, mlreynares@gmail.com, reynares@fich.unl.edu.ar

²Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina, gracielasacchi@gmail.com

³Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina, mlpossi@gmail.com

⁴Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina, mschreider@gmail.com

Autor para correspondencia: Marcela L. Reynares, mlreynares@gmail.com, reynares@fich.unl.edu.ar

Resumen

En este trabajo se analiza, a partir de experimentos de laboratorio, la influencia que tienen sobre las erosiones resultantes junto a un estribo de puente la presencia de un muro guía conformado por pilotes, hincados a lo largo de una trayectoria determinada por un cuarto de elipse. Las tareas experimentales se realizaron en un canal de sección rectangular con fondo constituido por arena uniforme. El estribo representado fue prismático de paredes verticales. Se hicieron 17 ensayos, en los cuales se varió la transparencia (T), longitud y ubicación del muro guía, con el objeto de

contrastar las erosiones obtenidas junto al estribo con aquellas encontradas para el mismo estribo sin presencia de protección alguna. Los resultados sugieren que la máxima profundidad de erosión depende de los tres aspectos analizados. Se pudo observar la tendencia decreciente de las erosiones en la medida que la transparencia del muro disminuyó. Cuando los muros se dispusieron junto a la margen del canal, las reducciones en la máxima profundidad de erosión fueron significativas, incluso para la menor de las longitudes analizadas (47%). Cuando los muros se vincularon con la cara de aguas arriba del estribo (para $T = 0\%$), las erosiones se desarrollaron junto al extremo del muro, por lo que en la medida que se aumentó su longitud, las mayores profundizaciones del lecho se alejaron más del estribo. Para esta última localización, los muros transparentes ($T \sim 49\%$) condujeron a erosiones semejantes a la situación sin protección.

Palabras clave: estribo, puente, protección, muro guía, pilotes, erosión local.

Abstract

This paper analyzes, from laboratory experiments, the influence that the presence of a guide wall formed by piles, driven along a path determined by a quarter ellipse has over the resulting scours at a bridge abutment. The experimental tasks were carried out in a rectangular flume with a mobile bed formed by uniform sand. The abutment represented was prismatic with vertical walls. A total of 17 tests were carried out, in which the transparency, length and location of the guide wall were varied, with the purpose of contrasting the scours produced at abutment with those found for the same abutment without the presence of any scour countermeasure. The results show that the maximum scour depth depends on the three aspects analyzed. The decreasing tendency of the scour was observed as the transparency of the wall diminished. When the guide walls were arranged next to the wall flume, the reductions in the maximum depth of scour were significant, even for the smallest lengths analyzed (47%). When the guide walls were linked to the face upstream of the abutment (for $T = 0\%$), the scours developed near the end of the guide wall, so that as its length was increased, the greatest depths of the bed moved further away from the abutment. For this last location, the transparency of the guide wall ($T \sim 49\%$) led to erosions similar to the observed one when there was no guide wall.

Keywords: Abutment, bridge, scour countermeasures, guide wall, piers, local scour.

Recibido: 10/04/2019

Aceptado: 12/09/2019

Introducción

Los procesos erosivos que se desarrollan junto a las pilas y estribos de obras de sobrepaso fluviales pueden provocar el colapso de las mismas, impactando directamente en las actividades socioeconómicas de la región afectada.

Existen distintas medidas de intervención que tienen el propósito de mitigar o reducir las erosiones esperables junto a dichas estructuras. Algunas de ellas actúan de modo directo protegiendo el lecho, recubriéndolo en las inmediaciones de la estructura, de modo tal que resista las altas velocidades y tensiones de corte que transmite el flujo. Ejemplo de este tipo de protecciones son los enrocados, colchones rellenos y bloques de concreto adheridos a geotextil, entre otros (Melville & Coleman, 2000; Cardoso & Fael, 2009; Melville, Ballegooy, Coleman, & Barkdoll, 2006).

Para el caso particular de estribos de puentes, evidencias experimentales demuestran que si bien la presencia de un revestimiento del lecho inhibe el desarrollo de erosiones inmediatamente junto a la estructura, las mismas tienen lugar, pero en torno a la protección colocada y con magnitudes máximas que, en muchas ocasiones, resultan semejantes a las encontradas junto al estribo sin protección (Morales, Ettema, & Barkdoll, 2008; Reynares, Schreider, & Scacchi, 2014; Scacchi, 2017).

Otras alternativas de obras de protección que buscan mitigar los procesos erosivos son aquellas que emplean dispositivos cuyos diseños, tanto en geometría como en disposición, promueven una modificación de

la configuración del flujo que actúa en las inmediaciones de la estructura que se quiere proteger, atenuando su capacidad erosiva. Se pueden mencionar como ejemplos los collares, muros de encauzamientos, vanos sumergidos, pilas de sacrificio, etcétera.

Radice y Lauva (2012), y Radice y Davari (2014) evaluaron a partir de experimentos de laboratorio el efecto que introduce en el desarrollo de erosiones locales junto a estribos de pared vertical la presencia de diferentes elementos adosados a la cara de aguas arriba del estribo. Mediante este procedimiento se lograron reducciones máximas en las erosiones obtenidas del orden de 5% cuando se aumentó la rugosidad; sin embargo, las erosiones se incrementaron hasta un 6.5% respecto de la situación sin protección cuando se utilizó una ranura en el estribo sobre el nivel del lecho.

Los vanos sumergidos son dispositivos que surgieron como una medida de contrarrestar los procesos de erosión en cauces curvos (Odgaard & Kennedy, 1983), cuyo principio de funcionamiento se basa en la generación de corrientes helicoidales que se contraponen al flujo característico asociado con este tipo de morfologías. El empleo de tales dispositivos como sistema de protección en secciones de puentes cuenta con antecedentes tanto para pilas (Lauchlan, 1999) como para estribos (Johnson, Hey, Tessier, & Rosgen, 2001; Fathi & Zomorodian, 2017).

Johnson *et al.* (2001) trabajaron de manera experimental con un estribo de pared vertical ubicado en el valle de inundación y los vanos dentro del cauce principal. Mostraron que los vanos fuerzan efectivamente a las líneas de corriente a separarse del valle, reduciendo las velocidades en las cercanías del estribo y concentrándolas en el centro del cauce.

Entre los sistemas de protección contra la erosión que alteran la estructura del flujo en las inmediaciones de un estribo, los muros guía se presentan como uno de los más efectivos. Fathi, Zarrati y Salamatian (2011), a partir de un estudio experimental de estribos protegidos con muros guía de diferentes geometrías, demuestran que los muros de ala corta generan eficiencia mínima, mientras que los de pared elíptica larga, diseño basado en Maza-Alvarez (1989), tendrían la máxima eficiencia en la reducción de la erosión junto al estribo, con reducciones que alcanzan un 60%, en comparación con un estribo vertical desprotegido.

A pesar de los importantes estudios realizados en los últimos años sobre los procesos de erosión local junto a pilas y estribos, y las medidas destinadas a su mitigación, el tema aún sigue teniendo vigencia, lo cual

se manifiesta en la cantidad de puentes que se destruyen por fallas de sus bases de fundación.

La conveniencia de poder contar con sistemas de protección contra la erosión, que sean innovadores, eficientes, seguros y económicos condujo al objetivo del presente trabajo. Así, se analiza, a partir de una serie de experimentos de laboratorio, la eficiencia que tienen como medida de protección contra la erosión local junto a estribos de puentes muros guías conformados por pilotes cilíndricos hincados a lo largo de una trayectoria determinada por un cuarto de elipse. En particular, se evaluaron tres aspectos relacionados con el diseño hidráulico de los mismos, esto es, transparencia, longitud y posicionamiento relativo a la ubicación de un estribo prismático de pared vertical.

Diseño experimental

Los experimentos se llevaron a cabo en un canal de sección rectangular de 60 m de largo, 1.48 m de ancho y 1.00 m de profundidad (Figura 1a), perteneciente al Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) de la Universidad Nacional del Litoral (UNL), Santa Fe, Argentina. El canal posee un lecho erosionable, horizontal, de 22 m de longitud y 0.40 m de espesor, constituido por arena uniforme, con un diámetro medio de 0.001 m. A los 14 m de iniciado el tramo con fondo móvil se representa un estribo prismático con paredes verticales de vidrio de 0.3 m de longitud y 0.12 m de ancho (Figura 1b).

En la secuencia experimental realizada en el marco de la presente investigación, el muro guía se conformó mediante el hincado de pilotes de 0.02 m de diámetro, posicionados sobre una única traza posible, la cual fue un cuarto de elipse, cuyo eje menor coincide con la cara de aguas arriba del estribo, y el desarrollo longitudinal vincula el extremo exterior del estribo con la margen izquierda del canal, aguas arriba del mismo; este trayecto posee una longitud total de 0.74 m.

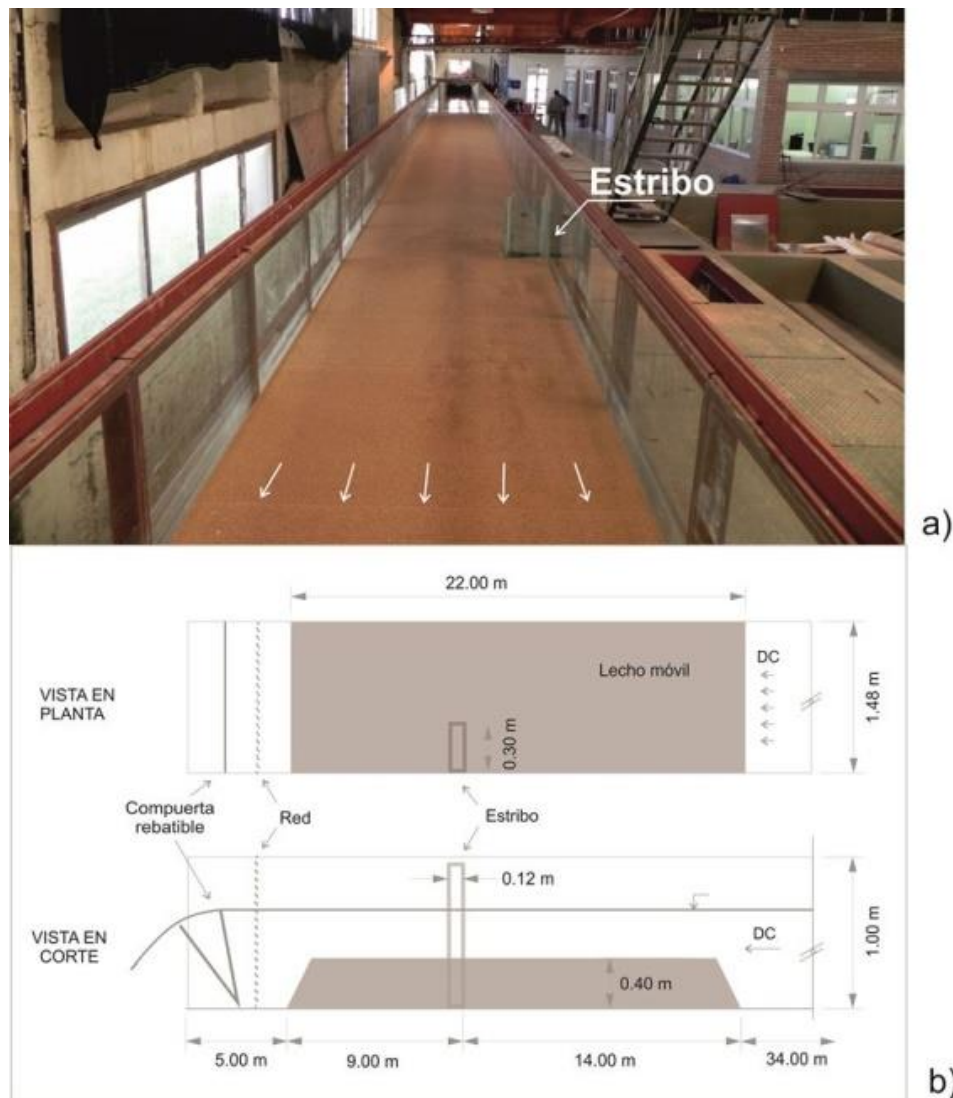


Figura 1. a) Foto del canal de ensayos; b) esquema con las dimensiones del canal.

Los experimentos desarrollados se agrupan en un ensayo de referencia (ER) y tres series experimentales. Tales series se diseñaron con el fin de analizar la influencia que tienen sobre la erosión local junto a un estribo la transparencia, longitud y localización de un muro guía.

Ensayo de referencia (ER). Tuvo por objeto evaluar las erosiones que se desarrollan junto al estribo seleccionado sin presencia de protección alguna. Ello constituye la situación patrón contra la cual comparar los resultados que se obtengan en las restantes experiencias realizadas.

Serie I. Se representaron muros que, sobre la base de un desarrollo longitudinal coincidente con la totalidad de la traza seleccionada (un cuarto de elipse), presentaron distintos grados de transparencia, logrados a partir de considerar diferentes separaciones entre pilotes, tal como se muestra en la Figura 2. Para cuantificar esta propiedad del muro se definió a la transparencia, T , como:

$$T(\%) = \left[1 - \frac{N_{\text{rodepilotesi}}}{N_{\text{rodepilotesmuro completo}}} \right] * 100 \quad (1)$$

Los valores de T considerados fueron de 0, 49, 73 y 86%.

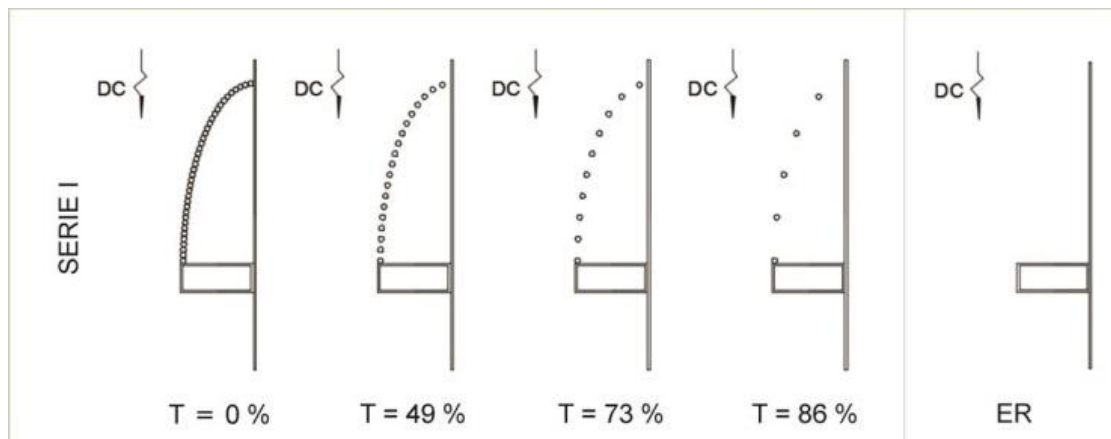


Figura 2. Configuración de los muros guía ensayados en las Serie I y Ensayo de referencia (ER).

Serie II. Se representaron distintas longitudes de muro (L), consideradas como un porcentaje respecto del desarrollo total del mismo. Tales muros estuvieron adosados a la pared del canal, respetando la traza seleccionada (el mismo cuarto de elipse), pero sin llegar a la cara aguas arriba del estribo. En esta serie se consideraron dos tipos de muros: uno impermeable (transparencia nula, Serie IIA) y otros con una transparencia próxima a 49% (Serie IIB).

Las longitudes de muro consideradas fueron equivalentes a 27, 51, 76 y 92% de la longitud total del cuarto de elipse para ambas transparencias adoptadas. Es importante mencionar que esta Serie II incluye también los experimentos que conforman la Serie I, correspondientes a transparencias de 0 y 49%, pues representan el 100% de la longitud de muro considerada (Figura 2 y Figura 3).

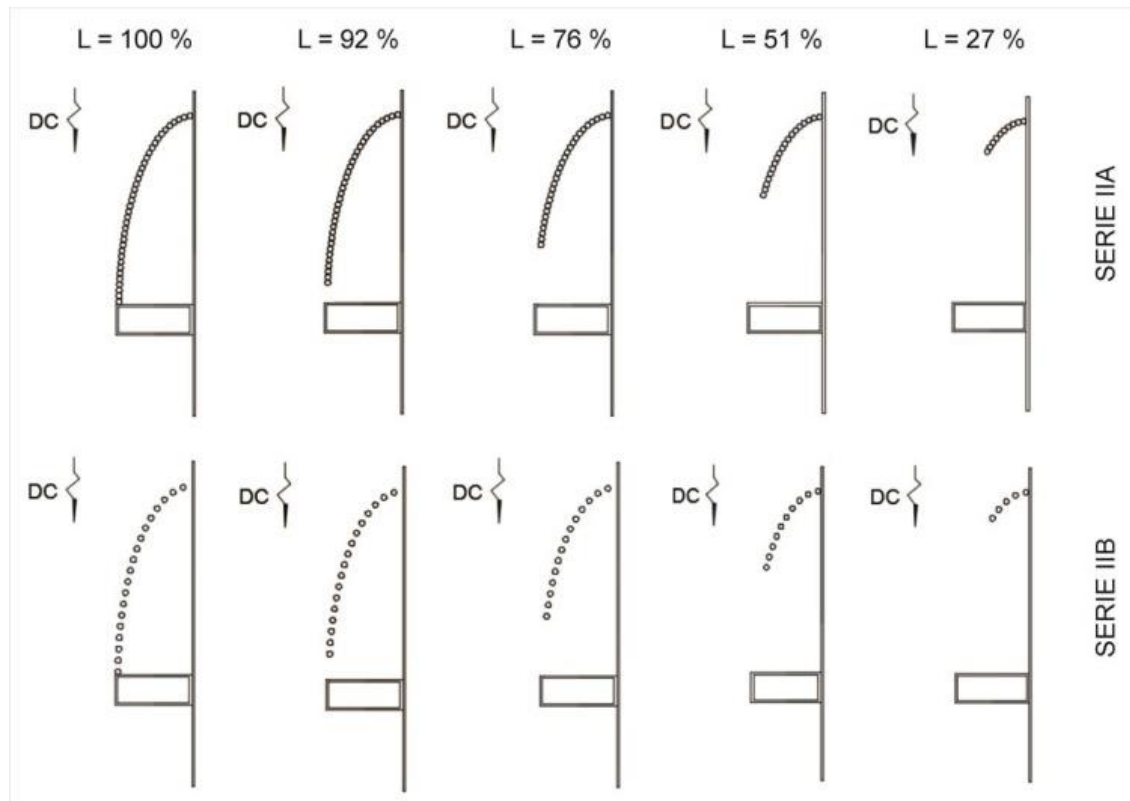


Figura 3. Configuración de los muros guía ensayados en la Serie II.

Serie III. En esta serie de experimentos se representaron los muros guía adosados a la cara de aguas arriba del estribo y no desde la pared del canal, tal como se hizo en los experimentos precedentes. Se analizaron L de 27, 51 y 100%, y se consideraron dos transparencias posibles, $T = 0\%$ y $T = 49\%$. La Figura 4 resume las características de los experimentos contemplados en esta Serie III. Se resalta que las longitudes consideradas se seleccionaron con base en los resultados alcanzados en la Serie II de experimentos.

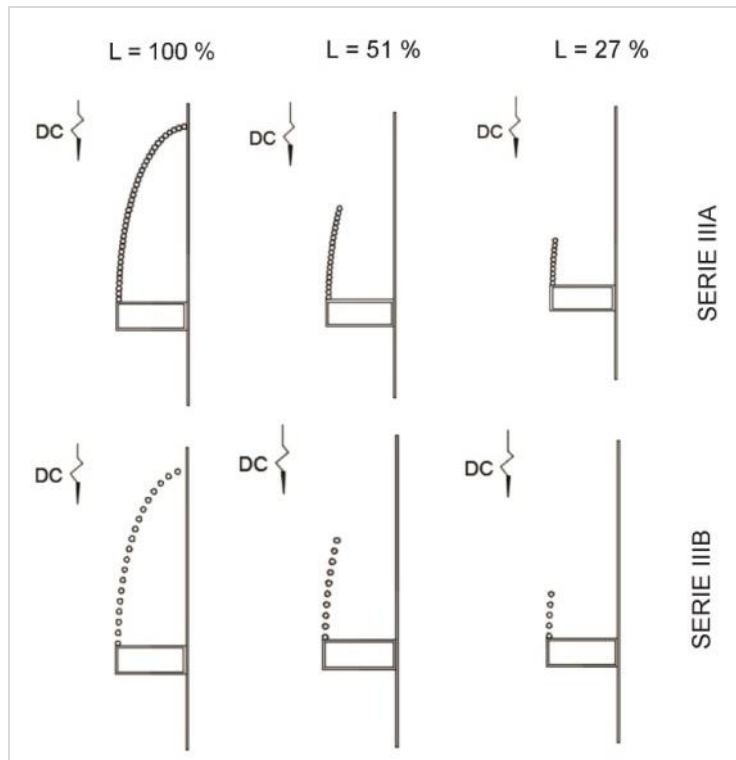


Figura 4. Configuración de los muros guía ensayados en las Serie III.

En la Tabla 1 se resumen las principales características de los dispositivos de protección representados en cada experimento. En dicha tabla se puede observar la cantidad de pilotes con que se conformó cada muro, al igual que su longitud (L) y transparencia (T). El nombre que recibe cada ensayo corresponde a una descripción de la configuración considerada. A modo de ejemplo, se menciona que el ensayo L100-T86 representa al experimento en el cual el muro guía disponía de una longitud de 100% y transparencia de 86%. En aquellos casos en los que el muro no completó el cuarto de elipse, se incluye la letra M o E al final del nombre: indican si se desarrollaron a partir de la margen (M) o desde el estribo (E). Nótese que en la Tabla 1, los experimentos "L100-T0" y "L100-T49", pertenecientes a la Serie I, se mencionan nuevamente en las series II y III (marcados con *), ya que se consideraron para el análisis de resultados correspondientes a ambas series.

Tabla 1. Resumen de los experimentos realizados.

Serie	Nombre del ensayo	Cantidad de pilotes	Longitud de muro (%)	Longitud efectiva (m)	T (%)
ER	ER	0	0	0.00	100
Serie I	L100-T86	5	100	0.10	86
	L100-T73	10	100	0.20	73
	L100-T49	19	100	0.38	49
	L100-T0	37	100	0.74	0
Serie IIA	L27-T0M	10	27	0.20	0
	L51-T0M	19	51	0.38	0
	L76-T0M	28	76	0.56	0
	L92-T0M	34	92	0.68	0
	L100-T0*	37	100	0.74	0
Serie IIB	L27-T50M	5	27	0.10	50
	L51-T47M	10	51	0.20	47
	L76-T50M	14	76	0.28	50
	L92-T50M	17	92	0.34	50
	L100-T49*	19	100	0.38	49
Serie IIIA	L27-T0E	10	27	0.20	0
	L51-T0E	19	51	0.38	0
	L100-T0*	37	100	0.74	0
Serie IIIB	L27-T50E	5	27	0.10	50
	L51-T47E	10	51	0.20	47
	L100-T49*	19	100	0.38	49

Todos los ensayos se hicieron con las mismas condiciones hidráulicas, definidas por un caudal de 0.0833 m³/s y un tirante en el flujo de aproximación de 0.191 m. Mediante el empleo de un velocímetro acústico Doppler, ADV, se midió un perfil de velocidades representativo del flujo de aproximación, no perturbado por la presencia del estribo. El ajuste logarítmico realizado a las velocidades obtenidas determinó una velocidad media en la vertical de 32.5 cm/s, y una velocidad de corte u^*a

= 1.75 cm/s, menor a la crítica de iniciación del movimiento derivada del diagrama de Shields (Vanoni, 1975), por lo que los procesos de erosión representados se corresponden con condiciones de agua clara.

La duración de todos los ensayos fue de 72 horas, tiempo en el cual se alcanza un 90% de profundidad de erosión de equilibrio (Coleman, Lauchlan, & Melville, 2003).

Al inicio de cada experimento se midió el campo superficial de velocidades mediante la técnica de velocimetría por seguimiento de partículas a gran escala (LSPTV, la cual consiste en el seguimiento de partículas sembradas en la superficie del flujo por medio de imágenes adquiridas con una cámara digital a intervalos regulares de tiempo (Patalano, García, & Scacchi, 2015).

Para la implementación de la técnica LSPTV se empleó una cámara Nikon Coolpix P100, con resolución de 640 x 480 píxeles, y una frecuencia de adquisición de 30 cuadros por segundo, que se operó desde un soporte fijado en forma horizontal a una pasarela elevada a 2.40 m sobre las paredes del canal. Como trazadores se utilizaron partículas de telgopor lastradas, de forma esférica, con un diámetro medio de 0.015 m. El procesamiento de los videos se hizo con los programas libres *PTVlab* y *RIVER (Rectification of Image Velocity Results)* (Patalano & García, 2016; Patalano, Brevis, García, Bleninger, & Rodríguez, 2013), los cuales permiten interpretar campos de velocidades a partir de imágenes y rectificar los resultados, respectivamente.

Finalizado cada experimento, se drenó el canal lentamente; se llevaron a cabo relevamientos de detalle del lecho resultante, y se tomaron exhaustivos registros fotográficos. Las mediciones de los niveles del lecho fueron con un distanciómetro marca Leica DISTO A5, instrumento que posee una precisión de 0.001 m.

Análisis de los resultados

En la Tabla 2 se presenta un resumen de los principales resultados alcanzados, donde se detalla la máxima profundidad de erosión observada (y_e), la erosión observada en la sección del estribo ($y_{e_{\text{estribo}}}$) y el volumen de sedimento erosionado (Vol) en cada experimento. Se ha incluido

también en la Tabla 2 la reducción verificada tanto por las erosiones como por el volumen, respecto de los valores obtenidos para dichas variables en el ensayo de referencia. Para ello se utilizaron las siguientes expresiones:

$$\% \text{ Reducción } ye = \frac{(ye_{Ref} - ye)}{ye_{Ref}} * 100 \quad (2)$$

$$\% \text{ Reducción } Vol = \frac{(Vol_{Ref} - Vol)}{Vol_{Ref}} * 100 \quad (3)$$

Donde:

ye_{Ref} : es la máxima erosión observada en el ensayo de referencia.

Vol_{Ref} , es el volumen del ensayo de referencia.

Tabla 2. Resumen de los principales resultados obtenidos en cada uno de los experimentos realizados.

Ensayo		ye (cm)	% red ye	ye _{estribo} (cm)	% red Ye _{estribo}	Vol (cm ³)	% red vol
ER		26.0	0	26.0	0	57 929	0
Serie I	L100-T86	24.9	4	24.9	4	55 973	3
	L100-T73	18.3	30	18.3	30	29 752	49
	L100-T49	15.0	42	15.0	42	21 705	63
	L100-T0	4.9	81	4.3	83	9 139	84
Serie IIA	L27-T0M	13.9	47	13.9	47	19 231	67
	L51-T0M	10.4	60	10.2	61	14 452	75
	L76-T0M	8.6	67	4.3	83	17 320	70
	L92-T0M	7.1	73	2.6	90	11 981	79
Serie IIB	L27-T50M	20.9	20	20.9	20	37 304	36
	L51-T47M	19.2	26	19.2	26	29 863	48
	L76-T50M	20.9	20	20.9	20	34 455	41

	L92-T50M	18.5	29	18.5	29	22 550	61
Serie IIIA	L27-T0E	21.5	17	21.2	18	50 627	13
	L51-T0E	14.0	46	5.3	80	19 836	66
Serie IIIB	L27-T49E	24.7	5	24.1	7	57 030	2
	L51-T49E	23.5	10	23.5	10	47 811	17

Incidencia de la transparencia de un muro guía en las erosiones junto al estribo

Para el presente análisis se consideraron los experimentos agrupados en la Serie I, donde se contemplan distintos grados de transparencia del muro guía (T).

En la figura 5 se presenta la variación de la reducción de la máxima profundidad de erosión (calculada con la Ecuación (2)), como una función de la transparencia del muro guía adoptado, expresadas en %.

Los resultados muestran que la máxima profundidad de erosión depende de la transparencia del muro guía. Si bien era esperable que la mayor reducción se logre con un muro sin transparencia, los resultados son alentadores respecto de transparencias menores. En efecto, cuando la transparencia fue nula, la reducción lograda en las erosiones es de 80%. Sin embargo, se desea resaltar que considerar una transparencia de 49% genera una reducción de 42% en la máxima profundidad de erosión.

En la Figura 5 se puede observar cómo la reducción es mínima o casi nula cuando el muro presentó transparencia de 87%. Esta tendencia lineal se representa por la línea de trazos en la figura. A medida que es menos transparente el muro, más cerca están los pilotes unos de otros, interfiriendo en la generación de estructuras que desencadenan los procesos de erosión local que afectan al estribo.

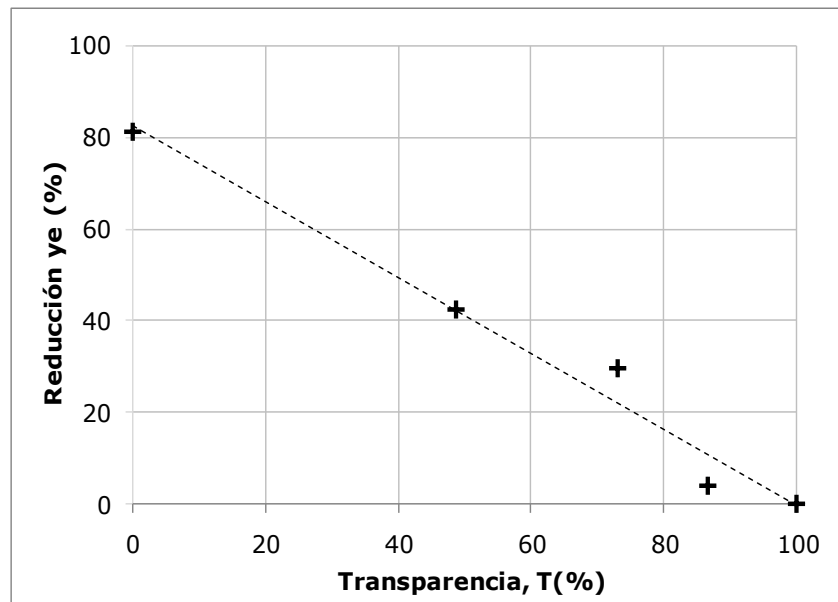


Figura 5. Reducción de la máxima profundidad de erosión en función de la transparencia del muro guía. Serie I.

La tendencia en la reducción del volumen erosionado en presencia del muro guía presenta algunos aspectos diferentes respecto de lo observado para las máximas profundidades de erosión. En la Figura 6 se muestra la variación de la reducción del volumen erosionado (Ecuación (3)) en relación con la transparencia del muro completo; ambas variables expresadas en %. Los datos se ajustan con una tendencia polinómica de segundo grado, representada por la línea de trazos en la figura.

El análisis conjunto de la Figura 5 y Figura 6 permite concluir que para una dada transparencia de muro, las reducciones en el volumen de sedimento erosionado fueron mayores que las disminuciones experimentadas por la máxima profundidad de erosión. A modo de ejemplo, se menciona que para una transparencia del muro de 49%, el volumen de sedimento removido se redujo en 63%; mientras que la erosión en un 42%. Para el caso de $T = 73\%$, la reducción del volumen es de 49%, mientras que la erosión se redujo en un 30%.

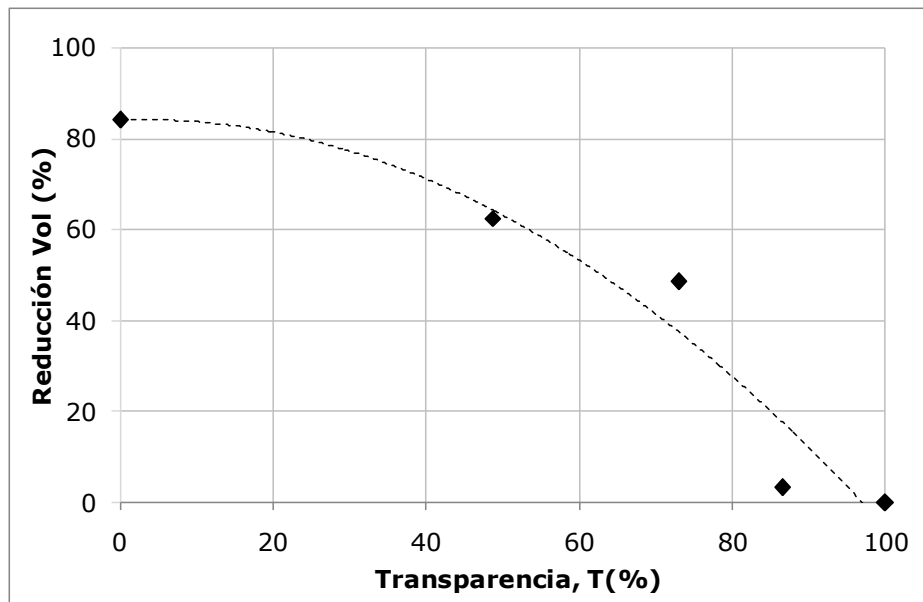


Figura 6. Reducción del volumen de sedimentos erosionado en función de la transparencia del muro guía. Serie I.

Cabe aclarar que en la Figura 6 los volúmenes estimados contemplaron las hoyas de erosión individuales que se desarrollaron en torno a los pilotes que conforman el muro, las cuales resultaron más evidentes para aquellas situaciones de transparencias elevadas, tal como puede visualizarse en la Figura 7. Pese a la presencia de estas erosiones locales junto a los pilotes, la disminución del volumen total fue significativa cuando se evaluaron muros con cierto grado de transparencia (49 y 73%). Para la mayor de las transparencias consideradas, $T = 83\%$, la máxima profundidad de erosión y el volumen de sedimentos removido fueron semejantes a los encontrados en la situación de referencia (ER, estribo sin muro), por lo que la presencia del muro prácticamente no influyó en estas variables.

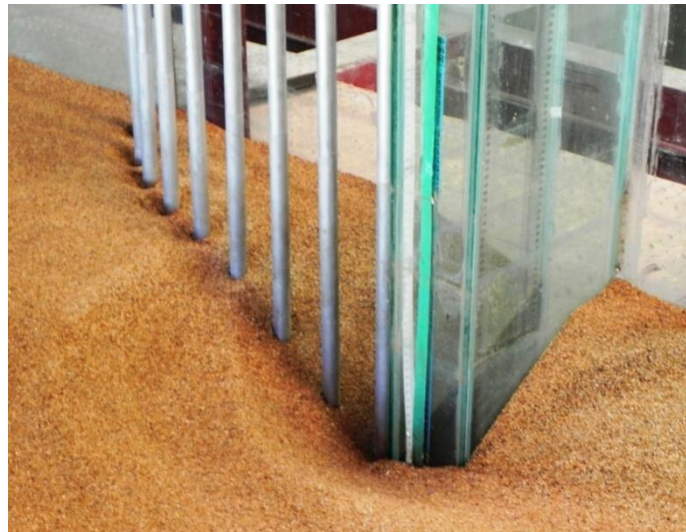


Figura 7. Configuración del lecho erosionado en torno al estribo y muro representado en el experimento L100-T73.

En la Figura 8 se pueden apreciar las morfologías del lecho obtenidas en los ensayos correspondientes a la Serie I y al ensayo de referencia (Figura 8e). Los relevamientos de detalle realizados, una vez finalizado cada experimento, muestran que en la medida que se va incrementado la transparencia del muro, la configuración del lecho y las erosiones resultantes se asemejan cada vez más a la situación de referencia. Con la disminución de transparencia, las hoyas de erosión local presentaron menor profundidad y resultaron más alargadas en el sentido del escurrimiento, pudiéndose identificar en la situación de menor transparencia un canal de escasa profundidad que acompaña a la trayectoria del muro guía y se extiende hacia aguas abajo, superando la sección contraída (Figura 8a).

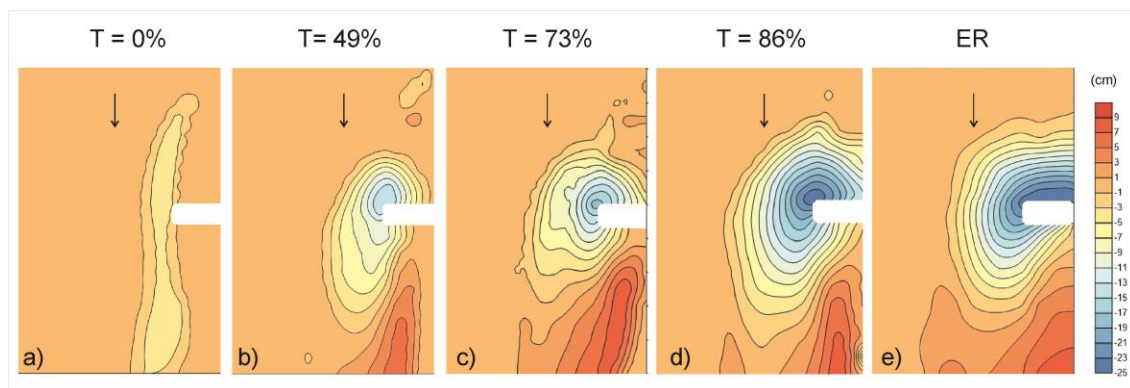


Figura 8. Lechos resultantes de la Serie I de experimentos y ER: a) L100-T0; b) L100-T49; c) L100-T73; d) L100-T86; e) ER.

Resulta de interés destacar el análisis de las erosiones obtenidas en la misma sección de emplazamiento del estribo, la estructura que se pretende proteger. Para ello se presenta la Figura 9, donde se contrastan los perfiles transversales del lecho, en coincidencia con la sección transversal delimitada por la cara de aguas arribas del estribo, obtenida al ensayar cada uno de los muros contemplados en la Serie I de experimentos realizados.

En Figura 9 puede verse como, en todos los casos analizados, el sector de máximas profundizaciones se localizó en correspondencia con el extremo exterior del estribo (Progresiva = 30 cm de la Figura 9). Se observó que las profundidades de erosión fueron mínimas cuando el muro se conformó con una transparencia nula, reafirmando el hecho de que tales dispositivos constituyen una eficaz medida de protección contra la erosión local junto a estribos de puente (Lagasse, Zevenbergen, Schall, & Clopper, 2001; Maza-Alvarez, 1989).

Resulta interesante destacar que cuando se analizan erosiones asociadas con la presencia de muros con mayores transparencias, $T = 49\%$ y $T = 73\%$, las profundidades de erosión fueron significativamente menores a las relevadas en el ER, presentando reducciones del orden de 30% (Tabla 2).

Por último, cuando se ensayó la configuración con la mayor transparencia ($T = 87\%$), la respuesta erosiva fue muy similar a la del ensayo de referencia, perdiendo el muro con tal transparencia casi toda efectividad a la hora de reducir las erosiones junto al estribo.

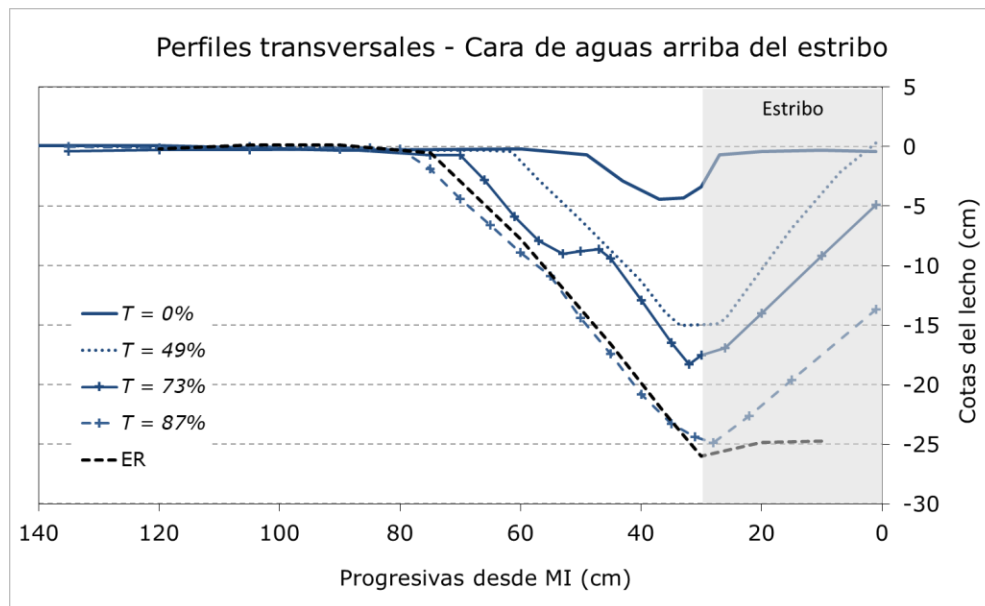


Figura 9. Perfiles transversales de la sección coincidente con la cara de aguas arriba del estribo. Serie I de experimentos.

Mediante la técnica de seguimiento de partículas a gran escala (LSPTV) fue posible analizar el campo superficial de velocidades para las distintas configuraciones de muro ensayadas. A modo de ejemplo, en la Figura 10 se presenta una comparación de las líneas de corriente al inicio de los experimentos L100-T0, L100-T49 y ER.

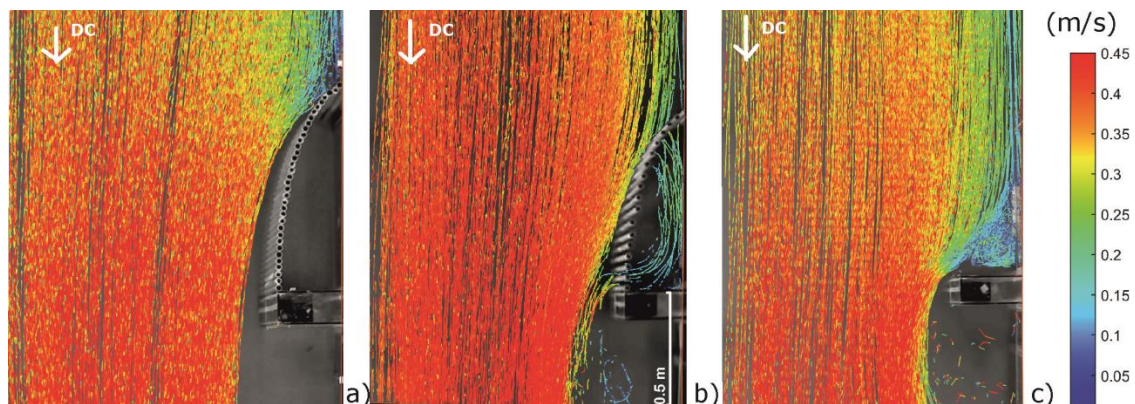


Figura 10. Comparación de las líneas de corriente en los experimentos: a) L100-T0, b) L100-T49 y c) ER.

La Figura 10a muestra con claridad cómo la presencia del muro guía con transparencia nula orienta de forma gradual al escurrimiento, el cual se observa de manera ordenada en la sección de máxima contracción, con una distribución uniforme en la misma. Un aspecto particular que se aprecia es la separación progresiva del flujo respecto de la posición del muro, con su máximo alejamiento en las inmediaciones del estribo.

La Figura 10b demuestra cómo, a medida que el muro adquiere transparencia, una porción del flujo ingresa al sector delimitado por la presencia del muro, el cual es interceptado por el estribo, imponiéndole una dirección casi paralela a su eje. Este flujo se ve interferido de manera directa por la presencia de los pilotes, pudiendo afectar así las erosiones resultantes junto al estribo. Tal comportamiento resulta menos marcado a medida que el muro ensayado fue más transparente.

Análisis de la erosión junto al estribo con muros guía de diferentes longitudes vinculados con la pared de margen izquierda del canal de ensayos

En este apartado se analizarán los resultados obtenidos de los experimentos que constituyeron la Serie II. El diseño de esta serie surge de la evaluación del campo superficial de velocidades observado en la Serie I, donde se evidencia un desprendimiento de las líneas de corriente del muro guía desde el comienzo de su desarrollo (Figura 10a). A continuación se analizan los resultados alcanzados en experimentos donde se ensayaron muros más cortos, con el fin de evaluar su capacidad de orientar el flujo en su aproximación al estribo sin necesidad de cubrir la totalidad del cuarto de elipse.

En la Figura 11 se representan en abscisas la longitud del muro expresada en porcentaje (%) respecto de la longitud total del cuarto de elipse; y en ordenadas, la reducción de la máxima profundidad de erosión, respecto de la situación de referencia (estribo solo), en porcentaje (%).

Los datos consignados en la Figura 11 demuestran que la reducción de la máxima profundidad de erosión es una función tanto de la longitud como de la transparencia del muro.

Los resultados derivados de los ensayos involucrados en la Serie IIA demostraron que la máxima profundidad de erosión se vincula

fuertemente con la longitud del muro guía. Esta afirmación se basa en el hecho de que a medida que se incrementó la longitud del muro, las reducciones de la máxima profundidad de erosión fueron mayores, ajustándose con una tendencia polinómica de segundo grado, representada por la línea de trazos azul en la figura. No obstante ello, las reducciones de la máxima profundidad de erosión fueron de consideración incluso para la menor de las longitudes evaluadas (27% de la longitud total), en la que reducción de la erosión máxima fue de 47%.

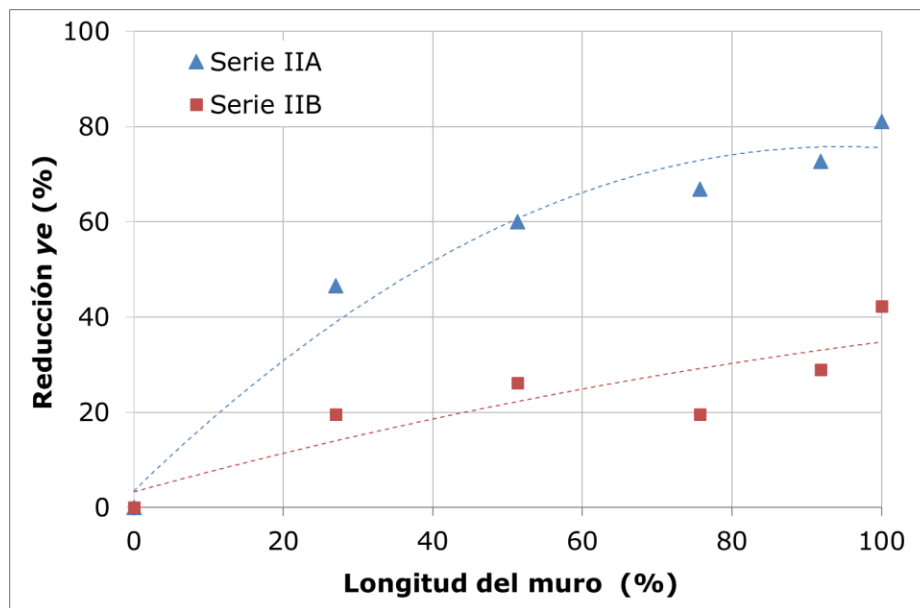


Figura 11. Reducción de la máxima profundidad de erosión en función de la longitud del muro guía para la Serie IIA ($T = 0\%$) y Serie IIB ($T \sim 49\%$).

Los resultados derivados de la serie de experimentos IIB ($T \sim 49\%$) demuestran que la dependencia que tiene la reducción de la máxima profundidad de erosión con la longitud del muro se debilita a medida que se consideran muros permeables (ajuste polinómico de segundo grado, representado con línea de trazos roja en la Figura 11). Tal como se observa en la figura, la reducción de la máxima profundidad de erosión fue de 42% (L100-T49), aproximadamente la mitad de la obtenida entre los ensayos de la serie IIA para igual longitud de muro. La Figura 11 permite señalar que para lograr el mismo efecto reductor de la máxima profundidad de erosión deben considerarse muros de mayor desarrollo longitudinal, en la medida que la permeabilidad de los muros sea mayor.

A modo de ejemplo, se señala que la reducción de la máxima profundidad de erosión para un muro de 50% de transparencia y con un desarrollo longitudinal coincidente con la traza total del cuarto de elipse considerado, fue semejante a la encontrada cuando se ensayó un muro con transparencia nula y un desarrollo que abarca 27% de la máxima longitud ensayada. Resulta de interés señalar que para la concreción del primero de estos muros se hincaron un total de 19 pilotes, mientras que en el segundo de ellos, el número fue tan sólo de 10 (Tabla 1), implicando un costo de obra menor.

Este comportamiento se observa también cuando se analiza la morfología del lecho obtenida en cada uno de los experimentos de la Serie II, tal como se muestra en la Figura 12, en la cual se presentan fotografías de los lechos resultantes de cada experimento, sobre las cuales se han superpuesto las líneas de nivel en el sector erosionado, con una equidistancia de 0.02 m. En la figura 12, columna izquierda, se tienen los resultados correspondientes a la Serie IIA de experimentos, donde la primera imagen (Figura 12a) muestra la mayor longitud de muro considerada; y la última (Figura 12e), la correspondiente a la menor longitud ensayada ($L = 27\%$); mientras que la columna de la derecha muestra las mismas longitudes de muro, pero con un grado de transparencia próximo a 49%.

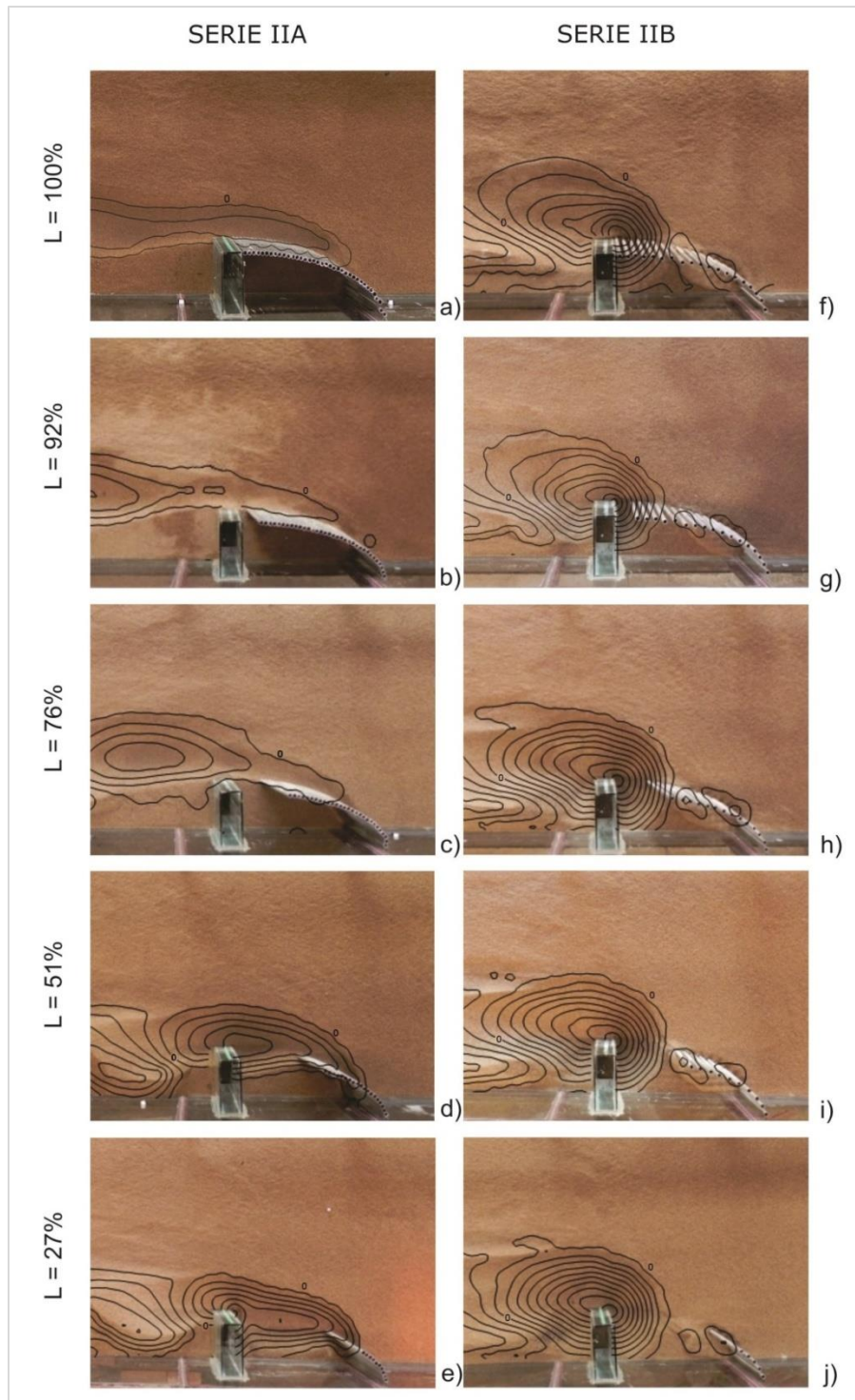


Figura 12. Morfología del lecho resultante en cada uno de los ensayos de la Serie II.

La Figura 12 demuestra que cuando se ensayaron muros sin transparencia (Serie IIA), la morfología del lecho erosionado presenta un patrón particular de acuerdo con la longitud del muro considerado. En aquellas situaciones en que éste fue relativamente largo, los descensos del lecho se localizaron desde aguas arriba del estribo, acompañando la traza del muro seleccionado, hasta aguas abajo de la sección de emplazamiento de la contracción, donde se identifican las mayores erosiones. La forma en planta del sector erosionado en tales situaciones fue alargada, con aspecto de surco. Se destaca que el sector comprendido entre el muro guía, el estribo y la margen izquierda no sufrió erosiones.

Cuando el muro tuvo una longitud de 51% (Figura 12d), las máximas profundidades de erosión tuvieron lugar en las inmediaciones del estribo, próximas al vértice de aguas arriba. Si bien la hoya de erosión resulta más profunda, persiste el alargamiento de la misma en el sentido del escurrimiento. Un comportamiento semejante se observa para la longitud de muro más corta ensayada ($L = 27\%$, Figura 12e), pero con un incremento de las máximas profundidades en la cara de aguas arriba del estribo.

La conformación del lecho resultante en los ensayos que constituyen la Serie IIB indican que la longitud del muro guía no tendría una influencia significativa sobre la geometría del sector erosionado cuando el muro presentó cierto grado de transparencia ($T \sim 49\%$). Las fosas de erosión adquieren una geometría cónica, compatible con la forma típica de las hoyas de erosión local junto a un estribo solo (Figura 8), localizándose las máximas profundidades junto a la cara de aguas arriba del estribo. En esta serie, todas las hoyas se ubicaron en el mismo sector, y tuvieron semejantes anchos y extensiones en el sentido del escurrimiento.

Con el fin de visualizar la configuración del flujo en torno al estribo protegido, se confeccionó la Figura 13, donde se muestran las trayectorias de las líneas de corriente superficiales relevadas en cada uno de los experimentos de la Serie II. Puede observarse cómo el espaciamiento entre pilotes permite el ingreso del flujo en el sector interno del muro guía, dando lugar a la aparición de flujo descendente y transversal junto a la cara de aguas arriba del estribo. Esta configuración de flujo tridimensional induce el desarrollo de la hoya de erosión junto al estribo, a pesar de la existencia del muro guía.

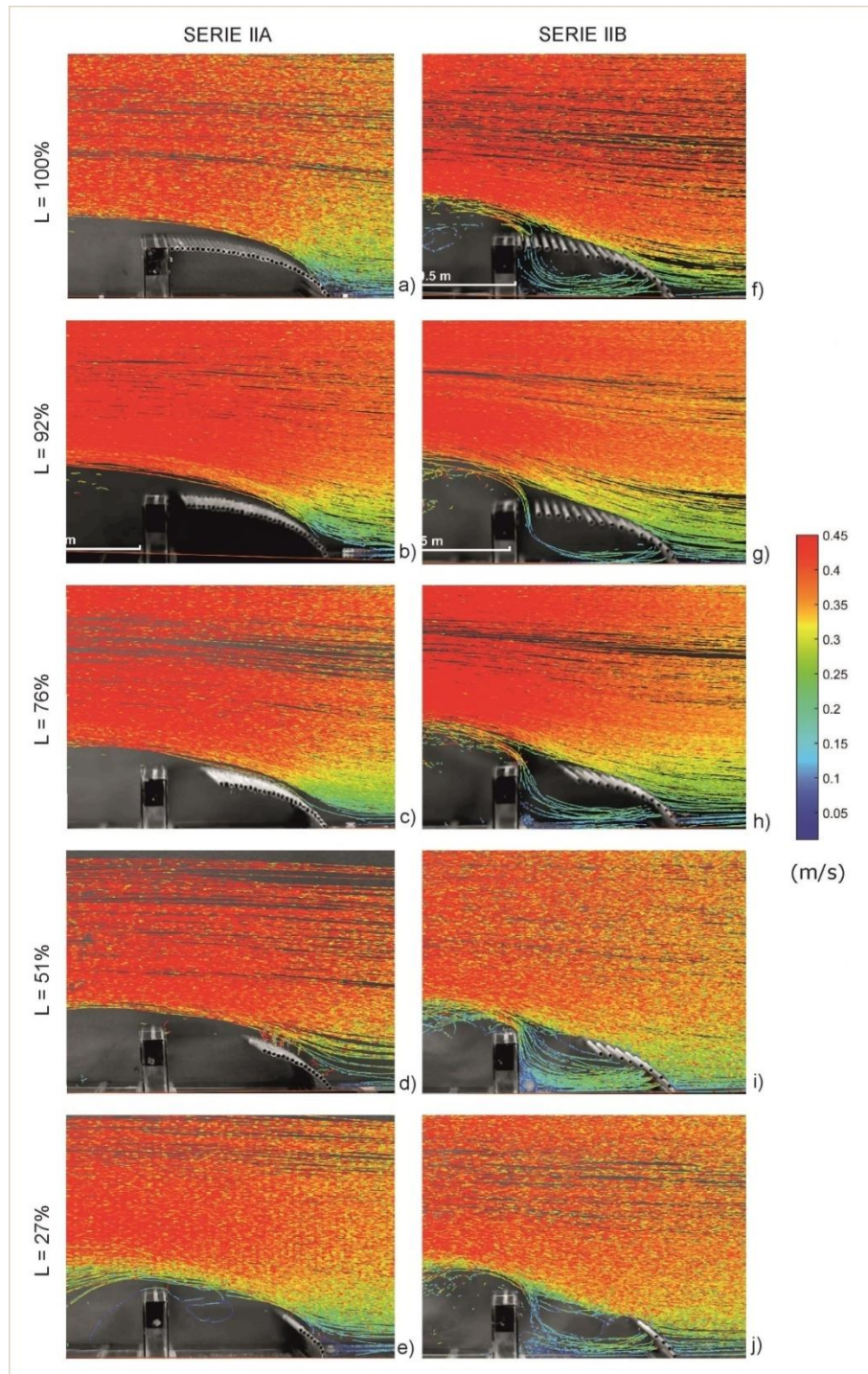


Figura 13. Trayectorias de las líneas de corriente en cada uno de los ensayos de la Serie II.

La Figura 13 demuestra que la configuración del flujo superficial en las inmediaciones del estribo protegido resulta similar para todos los ensayos de la Serie IIA ($T = 0\%$), con independencia de la longitud de muro considerada. Este comportamiento se justifica en el hecho de que el muro guía desvía y ordena el escurrimiento desde su inicio. En la medida que se consideran muros más cortos, las líneas de corriente se ven algo modificadas en las proximidades del estribo, acercándose al mismo, tal como se observa en la Figura 13 (d y e).

Para una longitud de 27% (Figura 13e), se puede observar que algunos trazadores ingresan al sector ubicado aguas arriba del estribo protegido por el muro guía. Las velocidades de estos trazadores son bajas respecto de las observadas en el resto de la sección transversal, evidenciando la poca circulación que posee el flujo en este sector. Los resultados descritos permiten afirmar que la presencia de muros guías con transparencia nula ($T = 0\%$) y diferentes longitudes demuestran un comportamiento compatible con el propósito original de un muro guía, ordenando el flujo y afectando la típica configuración tridimensional que promueve la erosión local junto al estribo. Este comportamiento resulta destacable aun para el muro con menor desarrollo longitudinal considerado.

Las configuraciones del flujo superficial relevadas en los ensayos pertenecientes a la Serie IIB que se muestran en la Figura 13 permiten visualizar la existencia de flujo a través del muro guía permeable, el cual, en su encuentro con el estribo, da lugar a la formación de las estructuras del flujo determinantes de las erosiones junto al mismo. Al mismo tiempo, la presencia de pilotes cercanos al estribo interfiere en dichas estructuras, afectando las erosiones finales junto al estribo. A medida que se consideran muros más cortos, dicha interferencia resulta menos efectiva, por lo que las erosiones resultantes se aproximan a las del ensayo de referencia.

Análisis de las erosiones junto al estribo con muros guía de diferentes longitudes vinculados con la cara de aguas arriba del estribo

Esta serie de experimentos se diseñó sobre la base de los resultados alcanzados en las series anteriores, donde se observó que no es necesario

un muro completo para alcanzar resultados favorables para el estribo desde el punto de vista de las erosiones. Dado que para las menores longitudes ensayadas se lograron reducciones que variaron entre 20 y 60% respecto de ER, es que se evaluaron estas mismas longitudes, pero con inicio de su desarrollo a partir de la cara de aguas arriba del estribo.

En la Figura 14 y Figura 15 se representan en abscisas la longitud del muro expresada en porcentaje (%) respecto de la longitud total del cuarto de elipse; y en ordenadas, la reducción de la máxima profundidad de erosión y el volumen de sedimento erosionado, respectivamente, en relación con la situación de referencia (estribo solo), en porcentaje (%).

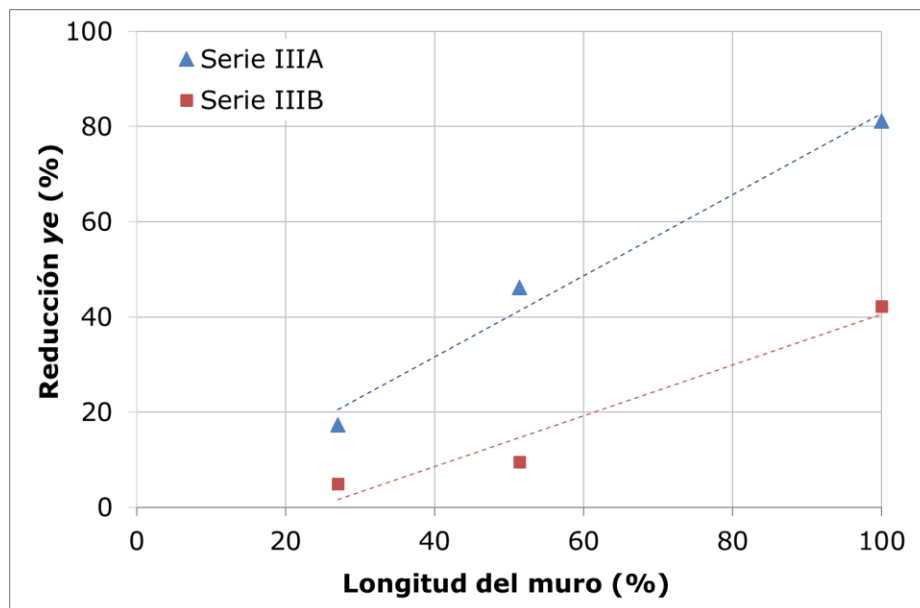


Figura 14. Reducción de la máxima profundidad de erosión en función de la longitud del muro guía para la Serie IIIA ($T = 0\%$) y Serie IIIB ($T \sim 49\%$).

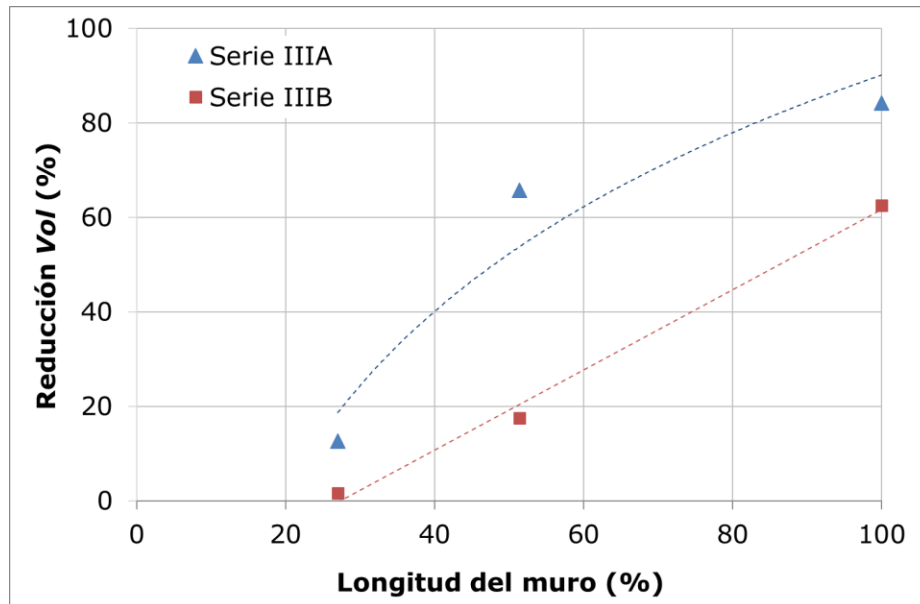


Figura 15. Reducción del volumen de sedimentos removido en función de la longitud del muro guía para la Serie IIIA ($T = 0\%$) y Serie IIIB ($T \sim 49\%$).

Los resultados alcanzados muestran un comportamiento muy ligado con la longitud de muro considerada. En efecto, para el caso de un muro de 51% de longitud, la reducción de la erosión alcanza un valor de 47% (Figura 14) y de 66% respecto del volumen (Figura 15) para transparencia nula. Los resultados demuestran que si se disminuye la longitud del muro, las disminuciones tanto de la máxima profundidad de erosión como del volumen de sedimento erosionado adquieren valores por debajo de 20%, siendo prácticamente nula cuando se consideró un muro con transparencia de 49%.

En la Figura 16 se muestran las topografías de los lechos resultantes correspondientes a la Serie III de experimentos, incorporando los ensayos correspondiente a un muro completo ($L = 100\%$) con las dos transparencias (0 y 49%).

Al observar la geometría y ubicación del lecho resultante en los experimentos pertenecientes a la Serie IIIA, se puede observar que la disposición del sector erosionado depende de la longitud del muro. En efecto, cuando el muro guía tuvo una longitud de 51%, la hoya de erosión se localizó aguas arriba, adquiriendo una geometría cónica con la máxima socavación ubicada en el extremo de aguas arriba del muro. El lecho recrece en el sentido del escurrimiento verificándose en la sección

estrechada erosiones de escasa magnitud, correspondiéndole una reducción de las erosiones junto al estribo del orden de 80%.

Cuando se ensayó el muro más corto ($L = 27\%$), la hoya de erosión se desarrolló junto a la cara de aguas arriba del estribo, contenida por el muro guía (Figura 16c), con máxima profundidad de erosión superior a las obtenidas para los muros de mayores longitudes consideradas en dicha serie.

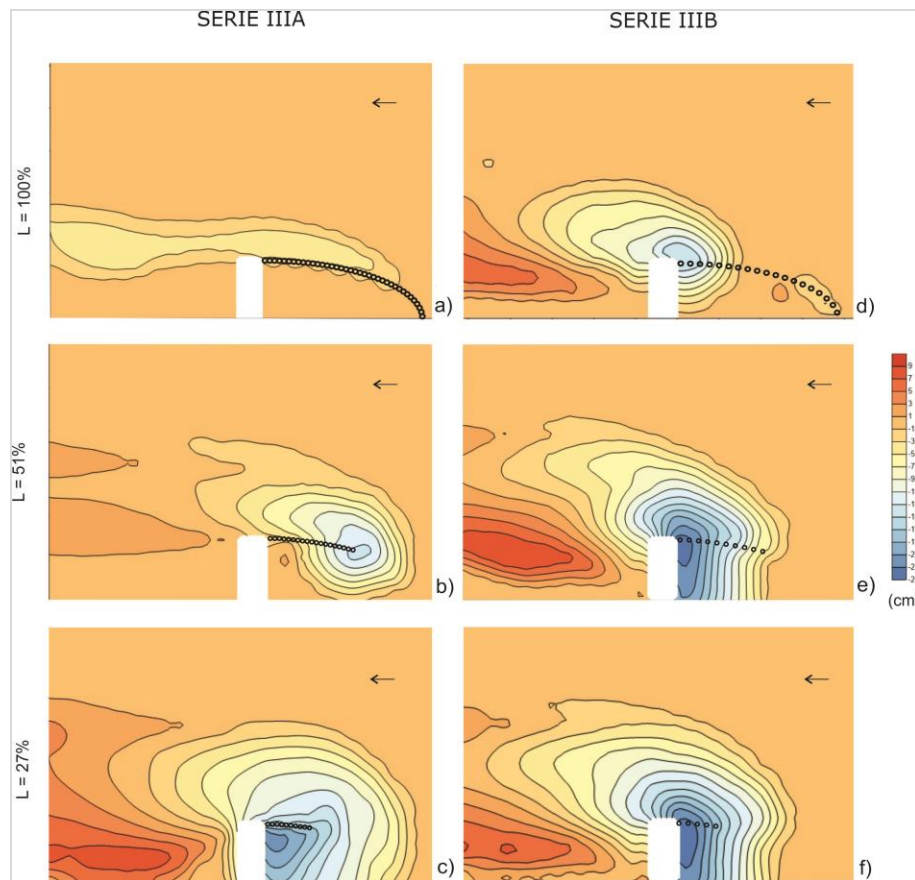


Figura 16. Lechos resultantes para la Serie III de experimentos.

La configuración del lecho obtenida en los ensayos de la serie IIIB fue semejante a la del ER, tal como se observa en la Figura 16 (d, e y f), indicando la escasa influencia que tiene la presencia del muro permeable en las erosiones desarrolladas.

Como conclusión de la Serie III de experimentos se puede mencionar que en aquellas situaciones en las que el muro guía se implanta junto al estribo, la extensión del muro resulta determinante en el logro

de reducciones significativas de la erosión junto al estribo. Esta afirmación resulta válida sólo para el caso de muros guías con transparencia nula.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en los experimentos realizados sugieren que los tres aspectos analizados influyen en los procesos de erosión que se desarrollan en las inmediaciones del estribo y el muro de protección. Las reducciones en las erosiones encontradas, respecto de la situación considerada como patrón (estribo sin presencia de protección alguna), son el resultado de una interacción dada entre los efectos asociados con cada uno de los aspectos analizados.

Las principales conclusiones alcanzadas se relacionan con las series experimentales que las determinaron:

Serie I. Análisis de la erosión junto al estribo protegido con diversos muros, todos con la misma longitud (coincidente con la traza total del cuarto de elipse), pero con transparencias variables. Los resultados encontrados sugieren que la máxima profundidad de erosión depende fuertemente de la transparencia del muro. Los muros con menores transparencias ensayados arrojaron los mayores niveles de protección del estribo contra el desarrollo de erosiones locales. En estos casos, el sector erosionado fue alargado, con las mayores profundidades de erosión localizadas aguas abajo de la sección de emplazamiento del estribo. En la medida que se consideraron muros más transparentes, la morfología de la hoya de erosión resultante tiende a la que se obtiene para el caso de estribo sin protección.

Si bien las mayores reducciones de las erosiones junto al estribo se obtienen cuando se emplean muros guía sin transparencia, se advierte que es posible lograr considerables niveles de protección del estribo utilizando estructuras con cierto grado de transparencia. Así lo indican los resultados obtenidos al ensayar un muro guía con transparencia de 49%, para el que la reducción de la máxima profundidad de erosión y del

volumen de sedimento erosionado en las inmediaciones del estribo fue de 42 y 63%, respectivamente.

Serie II. Análisis de la erosión junto al estribo protegido con muros de diferentes longitudes, vinculados con la pared de margen izquierda del canal de ensayos. Se identificó que el comportamiento de las erosiones fue diferente, ya sea que se consideren muros construidos con o sin transparencia. Pudo verificarse que cuando se emplean muros sin transparencia, la máxima profundidad de erosión está fuertemente condicionada por su longitud, obteniéndose menores profundizaciones a medida que se consideran muros de mayor desarrollo longitudinal. Se destaca que incluso para la menor de las extensiones de muro evaluadas (27% de longitud total), se observó una considerable reducción en la máxima profundidad de erosión (47% respecto del ensayo de referencia). Esta situación se justifica en la capacidad de reorientar y ordenar el flujo que demostraron tener los muros representados, aun para la menor de las longitudes evaluadas. Las magnitudes de las erosiones del lecho en las inmediaciones del estribo presentan una débil dependencia de la longitud del muro guía, cuando éste presenta algún grado de transparencia. Los resultados experimentales arrojaron morfologías del lecho erosionado semejantes entre las diversas experiencias realizadas, caracterizadas por la presencia de una hoya de erosión desarrollada junto al extremo del estribo.

El análisis del campo superficial del flujo relevado en esta secuencia experimental permitió identificar la existencia de una porción de flujo que atraviesa el contorno transparente que delimita los muros. Este flujo interactúa con el estribo, dando lugar a la formación de las diversas estructuras del flujo, determinantes de los procesos de erosión local junto al estribo, las cuales se ven obstruidas por la presencia de los pilotes constitutivos del muro cuando éstos se encuentran próximos al estribo, atenuándose así los procesos erosivos esperables.

Serie III. Análisis de la erosión junto al estribo protegido con muros de diferentes longitudes, vinculados con la cara aguas arriba del estribo. Los resultados derivados del empleo de muros guías no transparentes demuestran que cuando se consideran longitudes del muro relativamente grandes, las erosiones se alejan del emplazamiento del estribo, pues se desarrollan junto al extremo aguas arriba del muro. A medida que la longitud del muro guía disminuye, las erosiones se incrementan, tendiendo la conformación final del lecho a la que se obtiene en la situación de estribo no protegido.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional del Litoral, que financió, por medio de los cursos de acción para la investigación (CAI+D), el proyecto de investigación donde se desarrolló este trabajo. Al señor Sebastián Schmidt, por su apoyo técnico en la puesta a punto de los experimentos.

Referencias

- Cardoso, A. H., & Fael, C. M. S. (2009). Protecting vertical-wall abutments with riprap mattresses. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(6), 457-465.
- Coleman, S. E., Lauchlan, C. S., & Melville, B. W. (2003). Clear-water scour development at bridge abutments. *Journal of Hydraulic Research*, 41(5), 521-531.
- Fathi, A., Zarrati, A. R., & Salamatian, S. A. (2011). Scour depth at bridge abutments protected with a guide Wall. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 38, 1347-1354, doi: 10.1139/L11-096
- Fathi, A., & Zomorodian, M. (2017). Effect of submerged vanes on scour around a bridge abutment. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22, 2281-2289.
- Johnson, P. A., Hey, R. D., Tessier, M., & Rosgen, D. L. (2001). Use of vanes for control of scour at vertical wall abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(9), 772.
- Lagasse, P. F., Zevenbergen, L. W., Schall, J. D., & Clopper, P. E. (2001). Bridge scour and stream instability countermeasures (Report FHWA NHI 01-003). In: *Hydraulic Engineering Circular 23*. Fort Collins, USA: US Department of Transportation, Federal Highway Administration, National Highway Institute
- Lauchlan, C. S. (1999). *Pier scour countermeasures* (pp. 299-316) (PhD thesis). University of Auckland, School of Engineering, New Zealand.
- Maza-Alvarez, J. A. (1989). Design of groins and spur dikes. *Proceedings of the National Conference on Hydraulic Engineering* (pp. 14-18), New Orleans, Louisiana, USA.
- Melville, B., Ballegooy, S., Coleman, S., & Barkdoll, B. (2006). Countermeasure toe protection at spill-through abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(3), 235-245.

- Melville, B. W., & Coleman, S. E. (2000). *Bridge scour*. USA/Canada: Water Resources Publications, LLC.
- Morales, R., Ettema, R., & Barkdoll, B. (2008). Large-scale flume tests of riprap-apron performance at a bridge abutment on floodplain. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(6), 800-809.
- Odgaard, A. J., & Kennedy, J. F. (1983). River bend bank protection by submerged vanes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(8), 1161-1173.
- Patalano, A., Brevis, W., García, C. M., Bleninger, T., & Rodríguez, A. (2013). PTVlab, una herramienta gráfica para el procesamiento digital en velocimetría por seguimiento de partículas. *Tercer Simposio de Métodos Experimentales en Hidráulica*, Santa Fe, Argentina.
- Patalano, A., & García, C. M. (2016). *RIVeR - Towards affordable, practical and user-friendly toolbox for Large Scale PIV and PTV techniques*. St. Louis, USA: RiverFlow.
- Patalano, A., García, C. M., & Scacchi, G. (2015). Implementación de la técnica de PTV a gran escala (LSPTV) para caracterizar flujos a superficie libre en modelos físicos. *IV Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica*, La Plata, Argentina.
- Radice, A., & Lauva, O. (2012). On flow-altering countermeasures for scour at vertical-wall abutment. *Hydroengineering and Environmental Mechanics*, 59(3-4), 137-153.
- Radice, A., & Davari, V. (2014). Roughening elements as abutment scour countermeasures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(8), 1-7.
- Reynares, M., Schreider, M., & Scacchi, G. (2014). Dimensiones en planta de una protección de estribo y erosiones resultantes. *Tecnología y ciencias del agua*, 5(6), 83-101.
- Scacchi, G. (2017). *Interacción entre el flujo turbulento y los procesos de erosión local junto a estribos de puentes protegidos. Estudio experimental* (tesis de doctorado en Ingeniería-Mención Recursos Hídricos). Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.
- Vanoni, V. A. (1975). Chapter II. E-Sediment transportation mechanics-Initiation of motion. In: Vanoni, V. (ed.). *Sedimentation engineering*. Reston, USA: ASCE Library.