



## EVOLUCIÓN DEL LECHO Y FLUJO DURANTE EL DESARROLLO DE EROSIONES JUNTO A UN ESTRIBO PROTEGIDO

Graciela B. Scacchi<sup>(1)</sup>, Carlos M. García<sup>(2)</sup> y Mario L. Amsler<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup>Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) – Universidad Nacional del Litoral – Santa Fe. Argentina

<sup>(2)</sup>Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales - Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba. Argentina

<sup>(3)</sup>Instituto Nacional de Limnología - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

E-mail: gscacchi@fich1.unl.edu.ar; cgarcia2mjc@gmail.com; mamsler2003@yahoo.com.ar

### RESUMEN

En este trabajo se presentan resultados experimentales relacionados con la evolución temporal del lecho y del flujo durante el desarrollo de la erosión local junto a un estribo de puente protegido. Los datos experimentales se obtuvieron en un canal de sección rectangular, ubicado en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral, de 60 m de largo, 1.46 m de ancho y 1.00 m de profundidad. En el interior del canal, conformado por un lecho erosionable constituido por arena uniforme de diámetro medio 0.001 m, se ha colocado un estribo prismático de 0.30 m. de longitud, protegiendo el lecho cercano con una manta constituida por bloques adheridos a geotextil.

Se registraron, durante el desarrollo de las erosiones, series temporales de las tres componentes del vector velocidad utilizando un velocímetro acústico Doppler ADV. Las mediciones se realizaron, a 1 cm desde el nivel del lecho inicial en 3 puntos localizados en las inmediaciones del estribo. Sobre la base de las series temporales registradas se evaluó la evolución temporal, durante el proceso erosivo, de parámetros característicos del flujo como velocidades medias y energía cinética turbulenta.

### ABSTRACT

This paper presents experimental results showing the time evolution of the channel bed and flow, during the development of the local scour around a protected bridge abutment.

Experimental data were recorded in a rectangular channel, 60 m long, 1.46 m wide and 1.00 m deep, located in the Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral. A movable bed, consisting of uniform sand, has been placed in the channel. A prismatic abutment 0.30 m long has installed in the channel, protecting the nearby bed with a blanket composed of blocks attached to geotextile.

As the local scour developed, time series of the three flow velocity components were recorded using an acoustic Doppler velocimeter ADV. The measurements were performed at three locations around the abutments at 1 cm from the initial channel bed. Using the recorded time series, temporal evolution of the average velocity and turbulent kinetic energy values were evaluated and related to the bed scour development.

## **INTRODUCCIÓN**

Habitualmente se reconoce que la principal causa de destrucción de puentes se origina en los procesos erosivos que directamente afectan a sus fundaciones durante el pasaje de las crecidas (Cardoso y Fael 2009; Melville y Coleman, 2000). La importancia que tienen los puentes en el esquema de comunicaciones de un país, justifica los esfuerzos que se han venido haciendo durante gran parte del siglo XX y hasta la actualidad para comprender mejor los aspectos físicos involucrados en el desarrollo de los procesos erosivos que ocurren en secciones de ríos que los contienen, de modo tal de direccionar diseños cada vez más confiables y económicos.

No obstante ello, existen temas de vacancia en el conocimiento de los mismos, particularmente en los procesos erosivos junto a los estribos de puente. Este hecho se justifica en las propias características del proceso. En efecto, cuando el flujo se encuentra con el estribo se produce una contracción lateral del mismo y se generan distintas estructuras turbulentas que controlan el transporte de sedimentos en la vecindad de la fundación. Este fenómeno de carácter impermanente induce una marcada interacción entre las obras de infraestructura, el escurrimiento y el lecho deformable.

Para mitigar posibles daños por erosión, es habitual colocar sistemas de protección que fijan el lecho en las inmediaciones de los estribos de un puente. Entre las técnicas disponibles para prevenir el desarrollo de erosiones locales en esas regiones, han adquirido gran difusión los métodos directos o de acorazamiento; entre ellos el sistema constituido por bloques de cemento adheridos a geotextil constituye un ejemplo de aplicación bastante común en la práctica ingenieril.

Los resultados experimentales disponibles indican que la presencia de este tipo de protecciones, si bien inhiben el desarrollo de erosiones inmediatamente junto al estribo, no las elimina por completo, ya que estas tienen lugar a una cierta distancia desde el estribo (Morales et al., 2008; Cardoso y Fael, 2009; Reynares, 2010). En este contexto, comprender acabadamente los procesos físicos que generan este tipo de erosiones, requiere caracterizar el flujo turbulento que interactúa con el estribo, sus protecciones y el lecho, el cual evoluciona con el desarrollo de las erosiones.

En este trabajo, se presentan resultados experimentales preliminares relacionados con la evolución temporal del lecho y de los principales parámetros característicos del flujo, en las inmediaciones de un estribo prismático con protección durante el desarrollo de las erosiones. Se han considerado como elementos de contraste mediciones realizadas en la misma instalación experimental para el caso del estribo sin protección.

## **METODOLOGÍA**

### Dispositivos experimentales

Para la realización de las tareas experimentales se utilizó un canal de sección rectangular ubicado en la Nave II del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH), de 60 m de largo, 1.46 m de ancho y 1.00 m de profundidad (Fig.1). Este canal se caracteriza por tener paredes de vidrio a lo largo de los 30 m finales, lo cual permite

una adecuada visualización de los fenómenos que se representan. En dicho sector está conformado, en todo su ancho, un lecho erosionable de 20 m de longitud y 0.40 m. de espesor, constituido por arena uniforme de diámetro medio 0.001 m. A los 12 m de iniciado el tramo con fondo móvil se materializó, junto a la margen izquierda, un estribo prismático con paredes de vidrio, de 0.30 m. de longitud (en sentido transversal a la corriente principal) y 0.12 m. de ancho (en sentido de la corriente principal), que obstruye a la totalidad del tirante hidráulico (Fig. 1). Este canal está conectado a un circuito hidráulico cerrado, alimentado por dos bombas con una capacidad total de bombeo de 200 l/s.

Como sistema de protección se utilizaron mantas flexibles constituidas por bloques de concreto adheridos a geotextil. Cada bloque tiene forma prismática de sección cuadrada de 0.026 m de lado y 0.012 m de espesor. La separación entre bloques es de 0.003 m aproximadamente. (Figura 1). La manta se extendió 0.4 m desde el borde del estribo hacia el centro de la sección, en una dirección transversal a la del flujo principal. Presentó la misma distancia tanto hacia aguas arriba, como hacia aguas abajo del eje del estribo.

### Técnicas experimentales

Se registraron velocidades mediante el empleo de un Velocímetro Acústico Doppler (Downlooking probe), Vectrino-Nortek de 10 MHz de frecuencia acústica. Este instrumento mide las tres componentes de la velocidad en un pequeño volumen de control (6 mm de diámetro y altura variable entre 3 a 15 mm), localizado a 5 cm de la probeta. El rango de velocidades varía entre 0.01 m/s y 4 m/s, con una frecuencia de muestreo máxima de 200 Hz. El Vectrino posee un sensor de temperatura integrado a la probeta, parámetro necesario para calcular la velocidad del sonido. El velocímetro fue montado sobre un carro porta instrumental que, apoyado sobre las paredes del canal, permite movimiento en las tres direcciones principales.

Las mediciones del nivel del agua se hicieron mediante el empleo de un limnómetro. La evolución de los niveles del lecho junto al estribo, para la situación ensayada sin protección alguna, se llevó a cabo mediante una escala graduada, fija al vértice de la cara aguas arriba del mismo. Para las restantes localizaciones, alejadas del estribo, se utilizaron los datos de profundidad proporcionados por el Vectrino.

### Diseño experimental

Las tareas experimentales se realizaron en tres etapas, en las que las características hidráulicas en el flujo de aproximación se mantuvieron constantes.

En todos los casos, las condiciones erosivas fueron de agua clara, ya que la velocidad de corte del escurrimiento ( $u^*$ ) fue menor que la crítica de iniciación del movimiento ( $u^*_c$ , donde  $u^*/u^*_c = 0.8$ ).

En cada una de las etapas experimentales se realizaron las siguientes actividades:

Etapas I, (EI): Canal con fondo móvil y estribo sin protección. Se registró la evolución temporal en el punto de máxima erosión local junto al estribo (localización V en figura 2). Estos resultados sirven de contraste de los obtenidos en etapas siguientes.

También esta etapa tuvo por finalidad caracterizar el flujo de aproximación no perturbado por

la presencia del estribo. Para ello se midió un perfil de velocidades en una vertical ubicada en el punto medio de una sección transversal ubicada 6 metros aguas arriba del emplazamiento del estribo.

La configuración del instrumento adoptada para la medición de velocidades resultó de un análisis de sensibilidad, tal cual se señala en Herrero et al., (2007). Esto es:

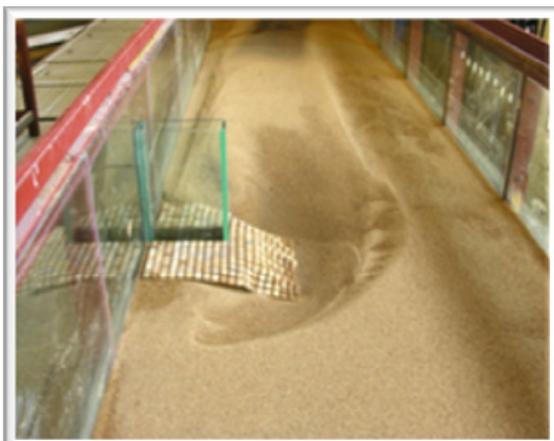
- Frecuencia de muestreo: 50 Hz
- Rango de velocidades: 30 cm/s
- Altura de volumen de medición: 7 mm
- Tiempo de medición: 5 minutos

Las series de velocidad registradas, tanto en esta Etapa como en las restantes, fueron corregidas por efecto del ruido Doppler teniendo en cuenta lo establecido en Garcia et al., (2005).

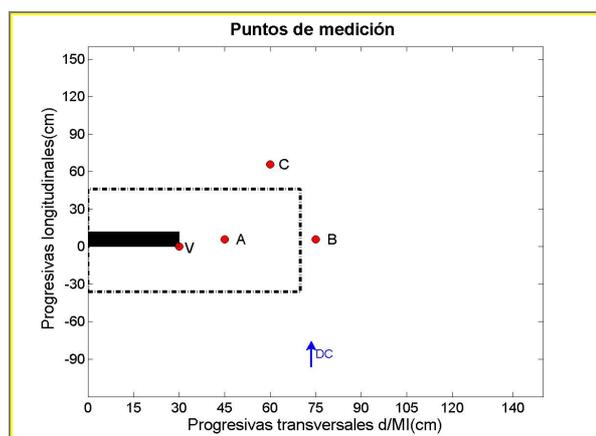
Etapa II, (EII): Canal con fondo protegido y estribo protegido. En esta etapa se midieron velocidades de flujo y posiciones del lecho durante el desarrollo de erosiones locales junto al estribo protegido. Con esta finalidad se repitió tres veces el mismo experimento. En cada uno de ellos se posicionó el velocímetro en una de tres localizaciones diferentes, definidas como A, B y C en fig. 2. El punto A se ubicó por encima de la protección, el B corresponde al sitio de la sección transversal de emplazamiento del estribo que experimentó las mayores erosiones, mientras que en las proximidades de la localización C tuvieron lugar las profundidades de erosión más importantes de todo el lecho.

En cada localización, se registraron series de velocidades en una posición ubicada 1 cm por encima del nivel del lecho original. La configuración del velocímetro adoptada para la medición de velocidades fue igual a la adoptada en la Etapa I. El tiempo de medición fue de 10 minutos.

En los puntos B y C se midió también la evolución del lecho durante el proceso erosivo. La duración de cada uno de estos experimentos fue de aproximadamente 5.5 días (8000 minutos).



**Figura1.-** Instalación experimental.



**Figura2.-** Puntos de medición

Etapa III, (EIII): Canal con fondo rigidizado en su configuración inicial y estribo protegido.

Esta etapa tuvo por objetivo medir velocidades del escurrimiento en los puntos seleccionados (A, B, C) para una situación compatible con el estado inicial, previo al desarrollo de las erosiones. En función de ello fue necesario rigidizar el lecho en las inmediaciones del estribo y la protección, manteniéndolo horizontal en toda la extensión del manto de arena y durante la totalidad de las mediciones correspondientes a esta Etapa. Esto fue realizado mediante el cernido de una muy delgada capa de cemento, en un área que abarca al sector del lecho susceptible de sufrir erosiones.

La configuración del instrumento adoptada en esta instancia del estudio fue la misma que en la Etapa II.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

### ❖ Flujo de aproximación

Sobre la base de los perfiles de velocidad medidos en esta etapa I se caracterizó el flujo no perturbado por la presencia del estribo. En función de ello se determinó:

- Velocidad media en la vertical,  $U = 0.32$  m/s
- Tirante,  $h = 0.19$  m

La velocidad de corte estimada fue de 1.85 cm/s, la cual resultó del ajuste a los datos medidos del perfil logarítmico de velocidades (Fig. 3)

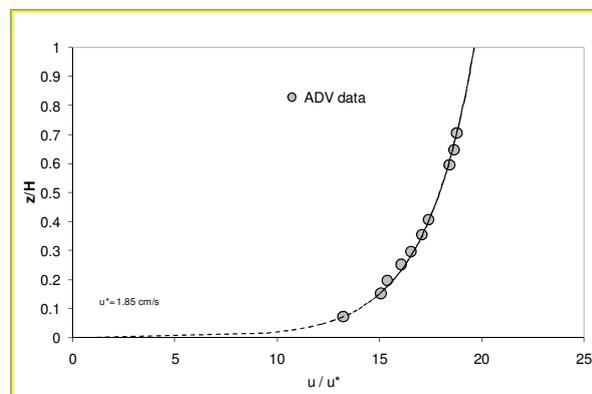


Figura3.- Perfil de velocidades. Flujo de aproximación

### ❖ Evolución del lecho

En función de las mediciones de la posición del lecho realizadas en los puntos B y C (EtapaII) se analizó la evolución de la profundidad de erosión en cada uno de ellos ( $y_e$ ), en relación a la máxima que se dio en cada sitio ( $y_{eMax}$ ), contrastando las tendencias evidenciadas con lo ocurrido en V (Etapa I). En la figura 4 se presentan dichos resultados. En el eje horizontal de dicha figura se volcaron los tiempos de medición, mientras que en el eje vertical la variable  $y_e/y_{eMax}$  correspondiente.

En esta figura se visualiza como las etapas detectadas en el crecimiento de las profundidades para los puntos de la EII se correlacionan con la evolución general del lecho identificada visualmente. En efecto, el proceso en la etapa II tiene su inicio en las inmediaciones de C. Al poco tiempo (30 a 50 minutos aproximadamente) se forma en el extremo aguas abajo de la protección un canal lateral, dando lugar en este sector a dos franjas de flujo de algún modo diferenciables. Con el paso del tiempo las erosiones “viajan” hacia aguas arriba, junto al costado de la protección. En figura 4 se observa cómo las profundizaciones comenzaron más violentamente en V (EI) que en C (EII), situación que se mantiene al menos durante los 10 minutos iniciales del proceso. Al cabo de dicho lapso la profundidad de erosión alcanzó en V un 20% de desarrollo respecto de la final relevada en dicho punto, mientras que en C sólo un 5%. A partir de dicho momento, y mientras las erosiones no tienen lugar al costado de la protección, las tasas de evolución del lecho en ambos sitios resultaron semejantes. Esta situación se ve alterada, por momentos, en función del aporte de sedimentos que proviene desde aguas arriba, cuando el lecho se erosiona en torno a la protección (Fig. 1). En la figura 4 se observa además que, una vez iniciado el proceso en B su tasa de cambio es más rápida que las correspondientes a V (EI) y C (EII). De este modo, transcurridos 500 minutos (6 % del tiempo total ensayado) tanto en V como en B el desarrollo de las erosiones, respecto del valor final medido, fue del 65% aproximadamente, mientras que en C sólo del 45%. Cuando la evolución del lecho al costado de la protección se atenúa, ésta se torna más intensa en el sector de máxima erosión para la situación de estribo protegido.

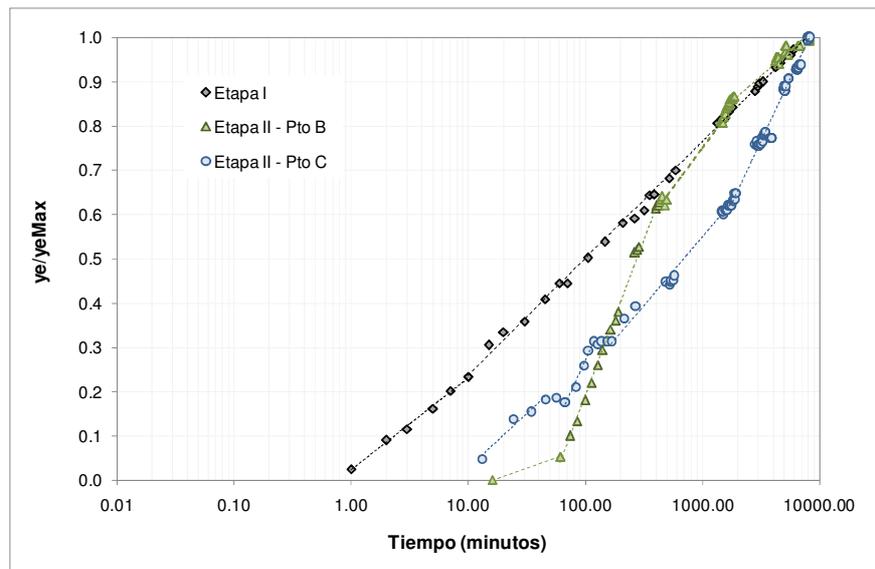


Figura4.- Evolución de la erosión en las localizaciones V(en Etapa I), B y C (en Etapa II).

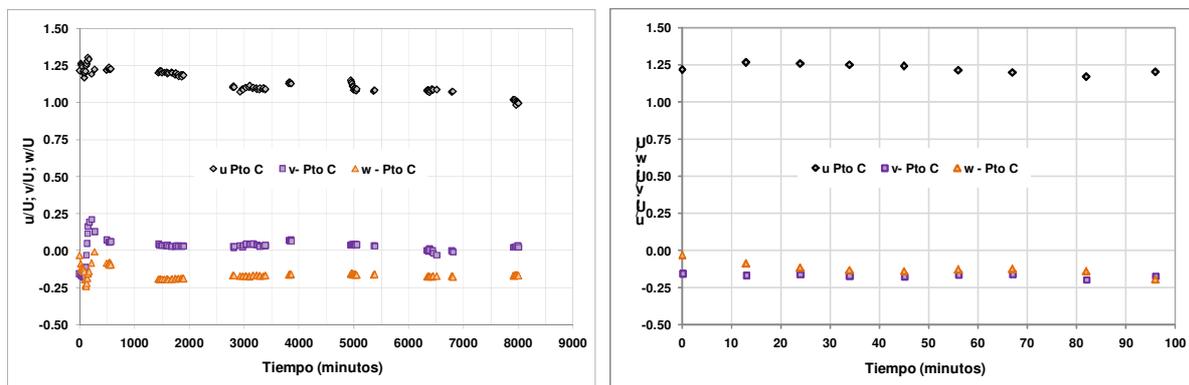
### ❖ Evolución del flujo

A partir de las series de velocidades medidas se analizó la evolución de las velocidades y de la energía cinética turbulenta, TKE (calculadas en base a series de tiempo de 10 minutos de duración), a medida que se desarrollaban las erosiones en las inmediaciones de la protección.

En la figura 5 se presenta la evolución temporal de las tres componentes de la velocidad del flujo, adimensionalizadas con la velocidad media del flujo de aproximación, correspondientes al punto C, durante el desarrollo de las erosiones (Etapa II).

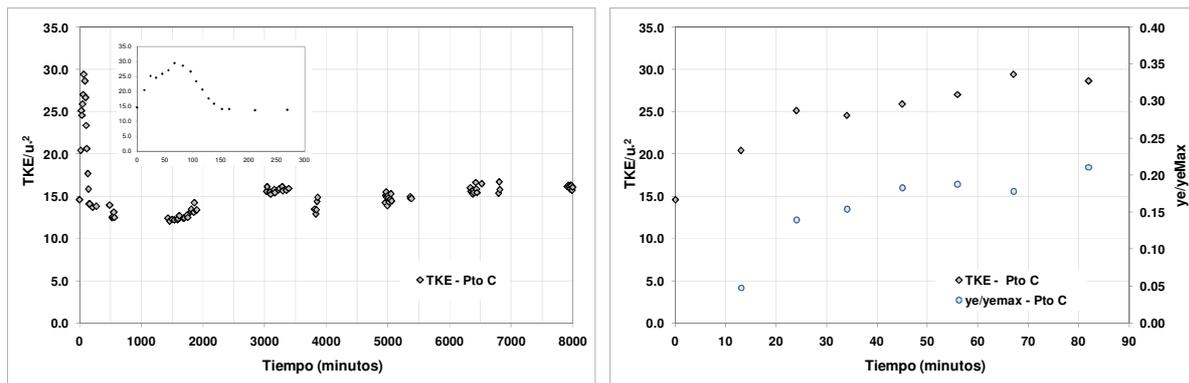
En la figura 5.a se visualiza la tendencia decreciente a lo largo de todo el proceso demostrada por la componente longitudinal de la velocidad,  $u$ , la que hacia el final del experimento alcanza un valor, aproximadamente, 25 % menor al inicial.

Sin embargo resulta interesante destacar como durante los primeros minutos ( $\sim 90$  minutos) no se evidenciaron variaciones estadísticamente significativas, para ninguna de las componentes, tal cual se observa en la figura 5.b. Tanto la componente transversal,  $v$ , como la vertical,  $w$ , experimentan cambios de cierta consideración entre los 100 y 250 minutos de transcurrido el ensayo. Superado dicho intervalo, prácticamente se mantienen.



**Figura 5.-** Evolución temporal de velocidades medias en C. a) Tiempo total b) Primeros 100 minutos.

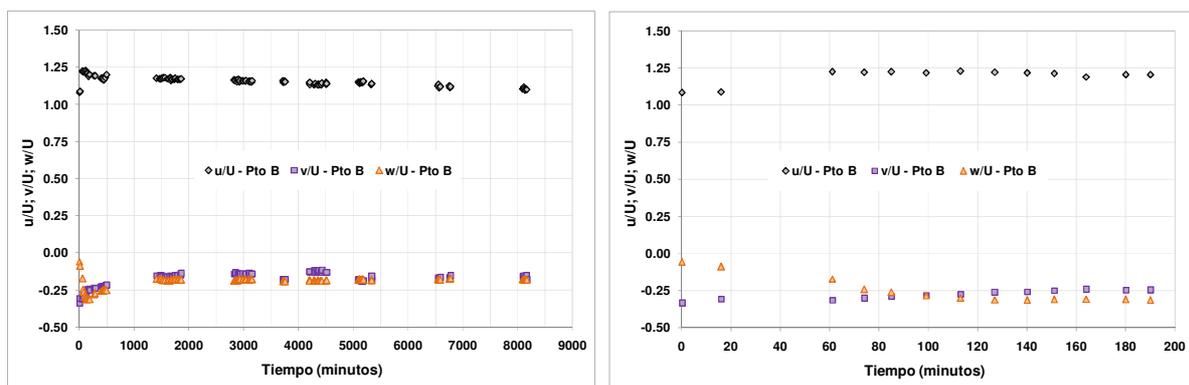
En la figura 6 se ha representado el comportamiento de TKE correspondientes al punto C, durante el desarrollo de las erosiones (Etapa II), adimensionalizada con el cuadrado de la velocidad de corte del flujo de aproximación,  $u_*^2$ , en función del tiempo transcurrido. Se destaca como este parámetro experimentó un incremento del orden del 100 % respecto de su valor inicial (Etapa III). Este aumento, a diferencia de lo ocurrido para el caso de las velocidades, tiene lugar durante los 90-100 minutos iniciales del proceso de erosión, tal cual se observa en la figura 6 (En la figura 6.b se representa en detalle el comportamiento descrito para TKE durante los primeros 90 minutos). Con el desarrollo de las erosiones al costado de la protección esta tendencia inicial se revierte, demostrando un brusco descenso en el valor del TKE (Fig. 6.a). Se han incluido, conjuntamente, el valor de las erosiones en el punto C correspondientes a cada tiempo.



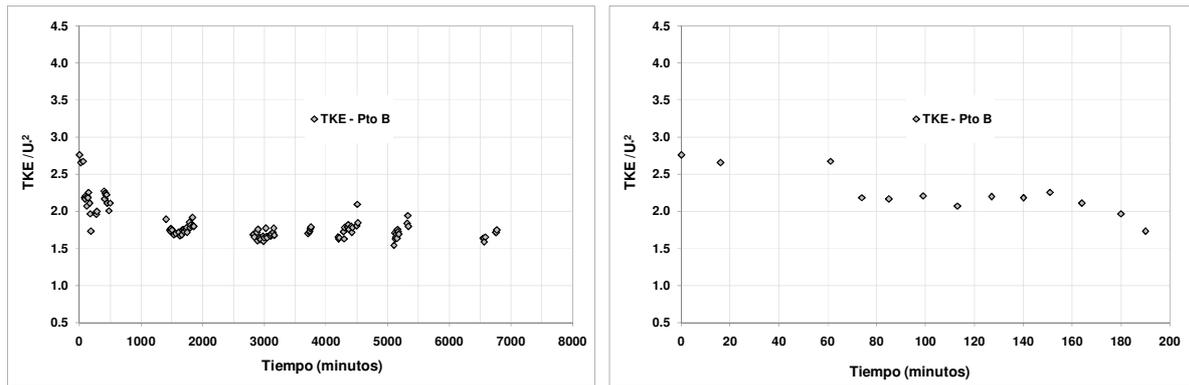
**Figura 6.-** Evolución temporal de TKE en C (Etapa II). a) Tiempo total b) Primeros 100 minutos.

Un análisis similar se realizó a partir de las velocidades obtenidas en B y A (Etapa II). De la figura 7 surge que cuando las erosiones se hicieron presentes junto al costado de la protección, aún antes de que éstas alcancen a B (~60 min s/fig.4), las velocidades longitudinales,  $u$ , en este punto registraron un incremento del orden del 12 %, la componente  $w$ , del 500 %, sin demostrar cambios la velocidad transversal,  $v$ . Una vez iniciadas las erosiones en este sector, (a partir de ~60 min) nuevamente se identifica un intervalo de tiempo donde no se aprecian variaciones estadísticamente significativas (Fig. 7.b).

El comportamiento de la energía cinética turbulenta en B se presenta en la figura 8. La tendencia general decreciente de TKE queda en evidencia en la figura 8.a, demostrando valores para dicho parámetro, correspondientes a un estado de erosión próximo al equilibrio, un 40 % menores que los iniciales, previos al desarrollo de las mismas. La figura 8.b demuestra como TKE, también se mantiene durante un período de tiempo próximo a la hora, a pesar de descender los niveles del lecho en dicha posición.



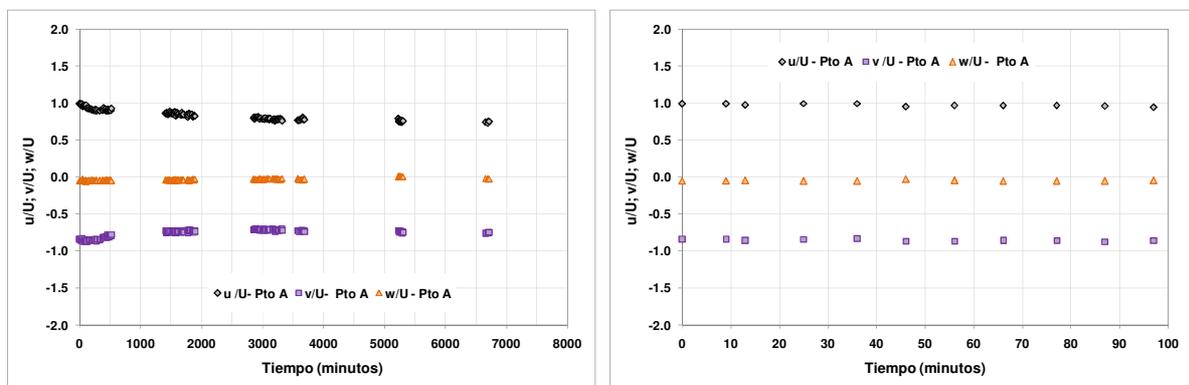
**Figura 7.-** Evolución temporal de velocidades medias en B. a) Tiempo total b) Primeros 200 minutos.



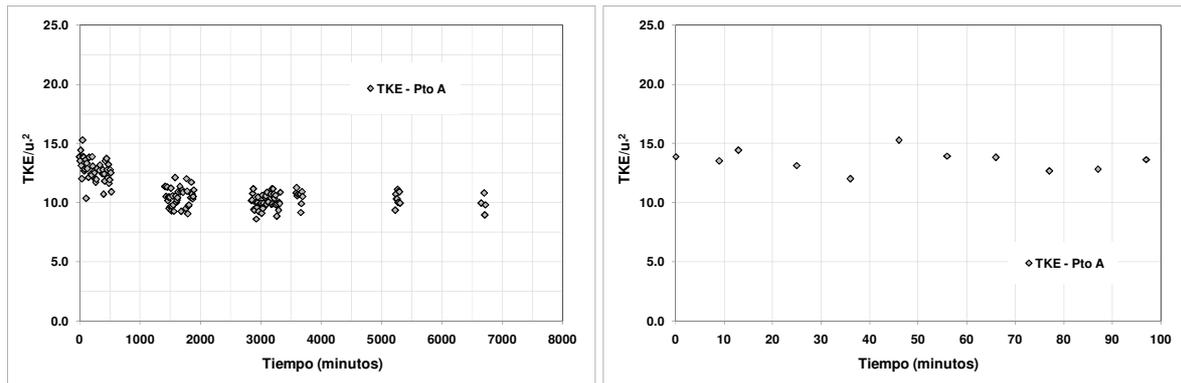
**Figura 8.-** Evolución de TKE en B (Etapa II). a) Tiempo total b) Primeros 200 minutos

En el punto A los resultados indicaron una tendencia decreciente para todas las variables referidas (Figura 9 y 10), siendo las reducciones obtenidas del orden del 25 % para el caso de  $u$ , mayores a los que se dieron para igual variable en B, mientras que TKE experimentó una disminución aproximada, correspondiente a los estados finales de la erosión, del 30 %, inferior al que se dio en B. Al igual que lo visto en C durante los primeros minutos (~ 90 minutos) no se evidenciaron variaciones estadísticamente significativas en ninguna de las variables analizadas, (Figuras 9.b y 10.b).

Se destaca que las variaciones más significativas en A se correspondieron con el estado erosivo durante el cual la tasa de cambio del lecho en las inmediaciones del punto C supera a la del punto B, es decir la cantidad de sedimento proveniente desde aguas arriba al sector de máxima erosión ha decaído sensiblemente (Fig. 4).



**Figura 9.-** Evolución temporal de velocidades medias en A. a) Tiempo total b) Primeros 100 minutos.



**Figura 10.-** Evolución de TKE en A (Etapa II). a) Tiempo total b) Primeros 100 minutos

## CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron resultados experimentales obtenidos a partir de una serie de ensayos de laboratorio, realizados con similares condiciones hidrodinámicas, a fin de analizar la evolución del lecho, y de los parámetros característicos de la turbulencia del flujo (velocidades medias y energía cinética turbulenta TKE), durante el desarrollo de erosiones en torno a un estribo prismático, protegido con mantas flexibles. Las variaciones del lecho en las localizaciones consideradas (puntos B y C de figura 2) fueron contrastadas con la evolución de la máxima profundidad de erosión junto al mismo estribo, pero sin la presencia de la protección (punto V). En función de ello se identificaron similitudes y diferencias entre ambos fenómenos. Las mediciones de velocidad permitieron establecer correlatos entre la evolución del lecho y patrones del flujo en las localizaciones seleccionadas. Salvo incrementos de poca significación, y temporalmente acotados, las velocidades medias en general disminuyen con el avance de las erosiones. Los valores de TKE evaluados demostraron también una tendencia decreciente en los tres puntos considerados. Se destaca el hecho particular evidenciado a partir de las mediciones en C que mostraron un aumento del orden del 100% para el TKE en los primeros momentos del proceso.

***Agradecimientos.** A la Universidad Nacional del Litoral, quien financió la presente investigación a través de los Cursos de Acción para la Investigación y el Desarrollo (CAI+D).*

*A los Sres. Sebastián Schmidt y Raúl Fortunato quienes tuvieron a su cargo las tareas de adecuación de los dispositivos experimentales utilizados.*

## REFERENCIAS

Cardoso, A. y Fael, C. (2009): "Protecting Vertical-Wall Abutments with Riprap Mattresses". J. Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 135, Issue 6, pp. 457-465.

García, C.M.; Cantero M.; Niño Y. y García, M. (2005). "Turbulence measurements with Acoustic Doppler Velocimeters". J.Hydr. Engrg. ASCE. 131, 1062-1073. ISSN: 0733-9429

Herrero H., Castro P., García C., Rodríguez A. (2007) "Guía Práctica Para Realizar Mediciones De Velocidad En Flujos Turbulentos Con ADV". XXI Congreso Nacional del Agua 2007. Tucumán, Argentina.

Melville y Coleman, (2000): "Bridge scour". Water Resources Publications, LLC.

Morales, R.; Ettema, R. y Barkdoll, B. (2008): "Large-Scale Flume Tests of Riprap-Apron Performance at a Bridge Abutment on Floodplain." J. Hyd.Eng., ASCE Vol. 134. N° 6. ISSN 0733-9429/2008/6-800-809.

Reynares, M. (2010): "Procesos erosivos locales en estribos protegidos de Puentes aliviadores". Tesis de Maestría en Ingeniería de los Recursos. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe. Argentina.



Instituto de Recursos Hídricos



Facultad de Ciencias Exactas y Tecnológicas



Universidad Nacional de Santiago del Estero



Instituto Nacional del Agua



Subsecretaría de Recursos Hídricos



Agencia Nacional de Promoción Cient. y Tec.



Gobierno Prov. de Santiago del Estero



Ministerio de la Producción



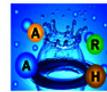
Secretaría del Agua



Secretaría de Desarrollo, Ciencia y Tecnología



Consejo Prof. de la Ingeniería y Arq.



Asociación Argentina de Recursos Hídricos



Asoc. Internacional de Invest. Hidroamb.



Comisión Regional del Río Bermejo



CORPORACION ARGENTINA TECNOLÓGICA s.a. INGENIERIA CIVIL E HIDRAULICA

