

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL



# **Interacción entre el flujo turbulento y los procesos de erosión junto a estribos de puentes protegidos. Estudio experimental**

Graciela Beatriz Scacchi

**FICH**

FACULTAD DE INGENIERIA  
Y CIENCIAS HIDRICAS

**INTEC**

INSTITUTO DE DESARROLLO TECNOLÓGICO  
PARA LA INDUSTRIA QUIMICA

Tesis de Doctorado **2017**



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL  
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas  
Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química

# **INTERACCIÓN ENTRE EL FLUJO TURBULENTO Y LOS PROCESOS DE EROSIÓN JUNTO A ESTRIBOS DE PUENTES PROTEGIDOS. ESTUDIO EXPERIMENTAL**

**Graciela Beatriz Scacchi**

Tesis remitida al Comité Académico del Doctorado  
como parte de los requisitos para la obtención  
del grado de  
DOCTOR EN INGENIERIA  
Mención Recursos Hídricos  
de la  
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL

**2017**

Comisión de Posgrado, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Ciudad Universitaria, Paraje "El Pozo",  
S3000, Santa Fe, Argentina



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL  
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas  
Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química

# INTERACCIÓN ENTRE EL FLUJO TURBULENTO Y LOS PROCESOS DE EROSIÓN JUNTO A ESTRIBOS DE PUENTES PROTEGIDOS. ESTUDIO EXPERIMENTAL

**Graciela Beatriz Scacchi**

**Lugar de Trabajo:**

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas  
Universidad Nacional del Litoral

**Director:**

Carlos Marcelo García

UNC - CONICET

**Co-director:**

Mario Luis Amsler

INALI – CONICET - UNL

**Jurado Evaluador:**

Marcelo Horacio García

University of Illinois

Raúl Antonio Lopardo

Universidad Nacional de la Plata

Francisco Pedocchi

Universidad de la República

Carlos Vionnet

Universidad Nacional del Litoral

**2017**



## ACTA DE EVALUACIÓN DE TESIS DE DOCTORADO

En la sede de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral, a los veintisiete días del mes de julio del año dos mil diecisiete, se reúnen los miembros del Jurado designado para la evaluación de la Tesis de Doctorado en Ingeniería titulada *“Interacción entre el flujo turbulento y los procesos de erosión junto a estribos de puentes protegidos. Estudio experimental”*, desarrollada por la Mag. Graciela Beatriz SCACCHI, DNI N° 16.466.324. Ellos son: Dr. Francisco Pedocchi, Dr. Raúl Lopardo, Dr. Marcelo H. García y Dr. Carlos Vionnet.

Luego de escuchar la Defensa Pública y de evaluar la Tesis, el Jurado resuelve: *darla por aprobada con calificación sobresaliente (10) en virtud del excelente trabajo experimental desarrollado utilizando el estado del arte en técnicas de medición, complementadas con un profundo y adecuado análisis de resultados. Se destaca además que la presentación oral fue clara, precisa y concreta, demostrando un conocimiento superlativo del tema.*

Sin más, se da por finalizado el Acto Académico con la firma de los miembros del Jurado al pie de la presente. -----

.....  
Dr. Francisco Pedocchi

.....  
Dr. Raúl Lopardo

.....  
Dr. JOSÉ LUIS MACOR  
SECRETARIO DE POSGRADO.  
Dr. Marcelo H. García (x)

.....  
Dr. Carlos Vionnet

(x) El Dr. Marcelo H. García participó por video conferencia

Universidad Nacional del Litoral  
Facultad de Ingeniería y  
Ciencias Hídricas  
  
Secretaría de Posgrado

Ciudad Universitaria  
C.C. 217  
Ruta Nacional N° 168 - Km. 472,4  
(3000) Santa Fe  
Tel: (54) (0342) 4575 229  
Fax: (54) (0342) 4575 224  
E-mail: posgrado@fich.unl.edu.ar



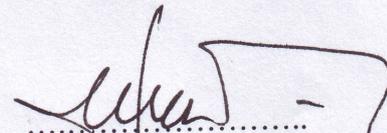
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL  
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas

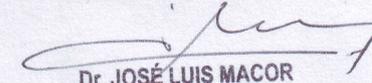
Santa Fe, 27 de Julio de 2017.

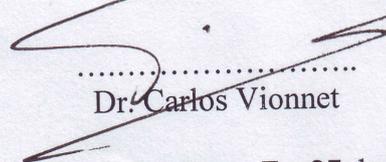
Como miembros del Jurado Evaluador de la Tesis de Doctorado en Ingeniería titulada *“Interacción entre el flujo turbulento y los procesos de erosión junto a estribos de puentes protegidos. Estudio experimental”*, desarrollada por la Mag. Graciela Beatriz SCACCHI en el marco de la Mención “Recursos Hídricos”, certificamos que hemos evaluado la Tesis y recomendamos que sea aceptada como parte de los requisitos para la obtención del título de Doctor en Ingeniería.

La aprobación final de esta disertación estará condicionada a la presentación de dos copias encuadradas de la versión final de la Tesis ante el Comité Académico del Doctorado en Ingeniería.

  
.....  
Dr. Francisco Pedocchi

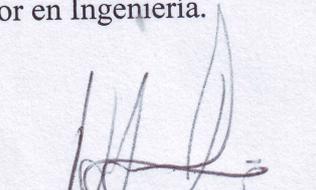
  
.....  
Dr. Raúl Lopardo

  
Dr. JOSÉ LUIS MACOR  
SECRETARIO DE POSGRADO.  
Facultad de Ingeniería y Cs. Hídricas  
Dr. Marcelo H. García (w)

  
.....  
Dr. Carlos Vionnet

Santa Fe, 27 de Julio de 2017.

Certifico haber leído la Tesis, preparada bajo mi dirección en el marco de la Mención “Recursos Hídricos” y recomiendo que sea aceptada como parte de los requisitos para la obtención del título de Doctor en Ingeniería.

  
.....  
Ing. Mario Luis Amsler  
Codirector de Tesis

  
.....  
Dr. Carlos Marcelo García  
Director de Tesis

(w) El Dr. Marcelo H. García participó por video conferencia.

Universidad Nacional del Litoral  
Facultad de Ingeniería y  
Ciencias Hídricas

Secretaría de Posgrado

Ciudad Universitaria  
C.C. 217  
Ruta Nacional N° 168 - Km. 472,4  
(3000) Santa Fe  
Tel: (54) (0342) 4575 229  
Fax: (54) (0342) 4575 224  
E-mail: posgrado@fich.unl.edu.ar

## **DECLARACION DEL AUTOR**

Esta Tesis ha sido remitida como parte de los requisitos para la obtención del grado académico de Doctor en Ingeniería-Mención Recursos Hídricos, ante la Universidad Nacional del Litoral y ha sido depositada en la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas para que esté a disposición de sus lectores bajo las condiciones estipuladas por el reglamento de la mencionada Biblioteca.

Citaciones breves de esta Tesis son permitidas sin la necesidad de un permiso especial, en la suposición de que la fuente sea correctamente citada. Solicitudes de permiso para la citación extendida o para la reproducción parcial o total de ese manuscrito serán concebidos por el portador legal del derecho de propiedad intelectual de la obra.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a las siguientes personas e instituciones:

A mi Director, Carlos Marcelo García, por su guía constante y enriquecedora, siempre marcada por su confianza, predisposición, dedicación y gran generosidad.

A mi Co-Director, Mario Amsler, por confiar en mi capacidad de trabajo y por generar una instancia de discusión y análisis de gran valor.

A Sebastián Schmidt y Raúl Fortunato quienes brindaron su apoyo incondicional en la preparación de cada uno de los experimentos, sin los cuales la realización de este trabajo no hubiera sido posible.

A Nicolás Guillen y Antoine Patalano, ambos de la Universidad Nacional de Córdoba, por enseñarme los aspectos claves relacionados con la implementación de la técnica de velocimetría LSPTV.

A mis amigos y compañeros de trabajo Marcela Reynares y Mario Schreider, por el aliento y el apoyo que me brindaron en todo momento.

A la Universidad Nacional del Litoral, que a través del programa CAID (Curso de Acción para la Investigación y el Desarrollo) financió la presente investigación y a la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas en cuyo Laboratorio de Hidráulica pude trabajar sin ningún tipo de restricción.

Por último, vaya mi mayor agradecimiento a mi familia, en especial a mis hijas Carolina y Cándida, mi mamá Celia y a Martha, por la comprensión, aliento y cobijo, pero por sobre todas las cosas por la paciencia infinita que tuvieron para conmigo.

# INDICE GENERAL

<b>Capítulo I: Marco referencial del trabajo</b>	<b>1</b>
<b>I.1 Introducción</b>	1
<b>I.2 Antecedentes</b>	2
I.2.1 Máxima profundidad de erosión junto a estribos sin protección	3
I.2.2 Sistemas de protección contra la erosión local junto a estribos de puentes	6
I.2.3 Configuración del flujo en torno a estribos de puentes	16
<b>I.3 Motivación científica</b>	23
<b>I.4 Objetivos</b>	25
I.4.1 Objetivo general	25
I.4.2 Objetivos específicos	25
<b>I.5 Organización de la Tesis</b>	26
<b>Capítulo II: Metodología</b>	<b>27</b>
<b>II.1 Instalaciones experimentales</b>	27
II.1.1 Canal y circuito hidráulico	27
II.1.2 Material del lecho	29
II.1.3 Protección del lecho	30
<b>II.2 Técnicas y metodologías de medición</b>	30
II.2.1 Medición de velocidades del escurrimiento	31
II.2.1.1 Velocimetría Acústica Doppler (ADV)	31
II.2.1.2 Velocimetría por seguimiento de partículas a gran escala (LSPTV)	34
II.2.2 Medición del nivel de la superficie libre del agua	35
II.2.3 Medición de niveles del lecho	35
<b>II.3 Diseño experimental</b>	36
<b>II.4 Ensayos realizados</b>	38
<b>II.5 Mediciones realizadas</b>	42
<b>II.6 Implementación de las técnicas de velocimetría</b>	49
II.6.1 Velocimetría por seguimiento de partículas a gran escala (LSPTV)	49
II.6.2 Velocimetría acústica Doppler (ADV)	51

II.6.2.1 Presencia de partículas suspendidas en el flujo	51
II.6.2.2 Presencia de zonas de interferencia acústica	54
II.6.2.3 Resolución espacial y temporal de registro del instrumento	56
II.6.2.4 Tiempos de medición óptimos analizando la incertidumbre esperada en la determinación de parámetros turbulentos	62
II.6.2.5 Procesamiento de las señales de velocidad registradas con ADV	86
II.6.2.6 Evaluación de los niveles de ruido en las señales de velocidad registradas	93

## **Capítulo III: Caracterización del flujo no perturbado por la presencia del estribo y la protección** **97**

<b>III.1</b> Introducción	97
<b>III.2</b> Distribución transversal de velocidades y caudales	97
<b>III.3</b> Perfiles de velocidades medias y leyes de resistencia en la región central de la sección transversal del canal	99
<b>III.4</b> Parámetros y números adimensionales característicos del flujo no perturbado	104
<b>III.5</b> Relaciones universales de parámetros de la turbulencia	105

## **Capítulo IV: Evolución temporal de la erosión junto al estribo** **108**

<b>IV.1</b> Introducción	108
<b>IV.2</b> Evolución temporal de la erosión en algunas localizaciones específicas	108
IV.2.1 Estribo sin protección	108
IV.2.2 Estribo protegido	110
IV.2.3 Contraste entre la situación de estribo protegido y la de estribo sin protección	113
<b>IV.3</b> Evolución temporal de los contornos batimétricos durante el proceso erosivo	115
IV.3.1 Contornos batimétricos - Estribo sin protección	116
IV.3.2 Contornos batimétricos - Estribo protegido	119

## **Capítulo V: Caracterización bidimensional del campo de flujo** **124**

<b>V.1</b> Introducción	124
-------------------------	-----

<b>V.2 Campo superficial del flujo</b>	124
V.2.1 Velocidades medias temporales	124
V.2.2 Vorticidad superficial	128
<b>V.3 Campo del flujo medio</b>	133
V.3.1 Velocidad media en la vertical	133
V.3.2 Caudales específicos	143
V.3.3 Energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical	150
<b>Capítulo VI: Caracterización tridimensional del campo del flujo</b>	<b>160</b>
<b>VI.I Introducción</b>	160
<b>VI.2 Evolución temporal de velocidades y parámetros de la turbulencia en localizaciones de interés</b>	161
<b>VI.3 Distribuciones de velocidades y parámetros de la turbulencia analizados en diversas secciones transversales</b>	169
VI.3.1 Distribución transversal de velocidades y parámetros de la turbulencia.	
Situación de estribo no protegido: ensayos EIV-EV	170
VI.3.1.1 Componente longitudinal de la velocidad, $\langle u \rangle$	170
VI.3.1.2 Componente vertical de la velocidad, $\langle w \rangle$	177
VI.3.1.3 Identificación de corrientes helicoidales en el plano “yz”	180
VI.3.1.4 Energía asociada a las fluctuaciones de velocidad, $k$	187
VI.3.1.5 Tensiones de Reynolds	192
VI.3.1.5.a Tensiones de Reynolds: Componente $-\rho \langle u'w' \rangle$	195
VI.3.1.5.b Tensiones de Reynolds: Componente $-\rho \langle u'v' \rangle$	200
VI.3.2 Distribución transversal de velocidades y parámetros de la turbulencia.	
Situación de estribo protegido: ensayos EVI-EVII-EVIII-EIX	205
VI.3.2.1 Componente longitudinal de la velocidad, $\langle u \rangle$	205
VI.3.2.2 Componente vertical de la velocidad, $\langle w \rangle$	212
VI.3.2.3 Identificación de corrientes helicoidales en el plano “yz”	218
VI.3.2.4 Energía asociada a las fluctuaciones de velocidad, $k$	224
VI.3.2.5 Tensiones de Reynolds	234
VI.3.2.5.a Tensiones de Reynolds: Componente $-\rho \langle u'w' \rangle$	234
VI.3.2.5.b Tensiones de Reynolds: Componente $-\rho \langle u'v' \rangle$	241
<b>Capítulo VII: Conclusiones</b>	<b>246</b>

<b>VII.1 Principales conclusiones del trabajo</b>	246
<b>VII.2 Consideración final</b>	251
<b>VII.3 Recomendaciones futuras</b>	254
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	256
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	261
<b>ANEXO 1: Guía práctica para realizar mediciones de velocidad en flujos turbulentos con ADV. Versión 2016</b>	269

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura I.1:</b> Representación de la interacción estribo-flujo turbulento-lecho-protección	2
<b>Figura I.2:</b> Configuración del flujo desviado en función de la longitud del estribo (Kandazamy, 1989)	6
<b>Figura I.3:</b> Protección con enrocado. Estribo de margen izquierda del puente de la R.P. N° 4 (Río Salado). Santa Fe. Argentina	7
<b>Figura I.4:</b> Protección con bloques de hormigón adheridos a geotextil. Aliviador Ruta Nacional 168. Santa Fe. Argentina	7
<b>Figura I.5:</b> Detalle de la extensión de la protección según Eve y Melville (2000)	10
<b>Figura I.6:</b> Recomendaciones de Melville y Coleman (2000) para protecciones de rip-rap en estribos ataludados	11
<b>Figura I.7:</b> Ancho “W” recomendado por Lagasse et al. (2001) para riprap en estribos	11
<b>Figura I.8:</b> Dispositivos experimentales empleados en Reynares (2009), Reynares et al. (2010), Piguini, et al. (2014) y Reynares et al. (2014). Ancho de escurrimiento en la sección contraída, B=2 m	14
<b>Figura I.9:</b> Topografía de lecho resultante de variar el ancho de una protección flexible (W) y el ancho de la sección de escurrimiento (B), manteniendo constante la longitud del estribo (L) y las condiciones hidráulicas junto al mismo (velocidad y tirante). Tomada de Reynares (2009)	15
<b>Figura I.10:</b> Configuración del flujo en torno a un estribo de puente (Tomado de Melville y Coleman, 2000)	17
<b>Figura I.11:</b> Disposición del vórtice primario (Kwan, 1988)	17
<b>Figura II.1:</b> Vista canal de ensayos	28
<b>Figura II.2:</b> Carro porta-instrumental	28
<b>Figura II.3:</b> Sistema de ejes coordenados “xy”	29
<b>Figura II.4:</b> Sistema de ejes coordenados “yz”	29
<b>Figura II.5:</b> Vista canal-estribo-protección	30
<b>Figura II.6:</b> Detalle de la protección	30

<b>Figura II.7:</b> ADV Vectrino	32
<b>Figura II.8:</b> Reglas adosadas a las paredes del estribo	36
<b>Figura II.9:</b> Medición de profundidades con ADV Vectrino	36
<b>Figura II.10:</b> Distanciómetro laser	36
<b>Figura II.11:</b> Técnica de rigidización; a) implementación de la técnica en EIII; b) Conformación lecho EVI	38
<b>Figura II.12:</b> Representación de las dimensiones del estribo y protección utilizados	38
<b>Figura II.13:</b> Configuración ensayo EII; a) Condición inicial; b) Condición final	39
<b>Figura II.14:</b> Configuración ensayo EIII; a) Condición inicial; b) Condición final	39
<b>Figura II.15:</b> Configuración ensayo EIV	40
<b>Figura II.16:</b> Configuración ensayo EV	40
<b>Figura II.17:</b> Configuración ensayo EVI	41
<b>Figura II.18:</b> Configuración ensayo EVII	41
<b>Figura II.19:</b> Configuración ensayo EVIII	41
<b>Figura II.20:</b> Configuración ensayo EIX	41
<b>Figura II.21:</b> Localizaciones de medición en el ensayo EII	43
<b>Figura II.22:</b> Localizaciones de medición en el ensayo EIII	43
<b>Figura II.23:</b> Estribo sin protección. Ensayo EIV.- a) Cantidad de puntos medidos por vertical; b) tiempo de medición en cada punto por vertical	44
<b>Figura II.24:</b> Estribo sin protección. Ensayo EV. a) Cantidad de puntos medidos por vertical; b) tiempo de medición en cada punto por vertical	45
<b>Figura II.25:</b> Estribo protegido. Ensayo EVI. a) Cantidad de puntos medidos por vertical; b) tiempo de medición en cada punto por vertical	46
<b>Figura II.26:</b> Estribo protegido. Ensayo EVII. a) Cantidad de puntos medidos por vertical; b) tiempo de medición en cada punto por vertical	47
<b>Figura II.27:</b> Estribo protegido. Ensayo EVIII. a) Cantidad de puntos medidos por vertical; b) tiempo de medición en cada punto por vertical	48
<b>Figura II.28:</b> Estribo protegido. Ensayo EIX. a) Cantidad de puntos medidos por vertical; b) tiempo de medición en cada punto por vertical	49
<b>Figura II.29:</b> Vista de la pasarela a la cual se fijó la cámara y carro auxiliar	50
<b>Figura II.30:</b> Partículas utilizadas en la técnica LSPTV	50

<b>Figura II.31:</b> Grilla utilizada en la implementación de la técnica LSPTV	51
<b>Figura II.32:</b> ADV Vectrino y turbidímetro ubicados en el centro del canal, midiendo ambos a 10 cm respecto del fondo y separados entre sí una distancia aproximada de 2 m	53
<b>Figura II.33:</b> Calibración del turbidímetro que permite transformar unidades de FTU en concentración de talco en mg/l	53
<b>Figura II.34:</b> Evolución temporal del parámetro correlación reportado por el ADV Vectrino y la concentración de talco, medidos en forma conjunta	54
<b>Figura II.35:</b> Evolución temporal del parámetro SNR reportado por el ADV Vectrino y la concentración de talco medidos en forma conjunta	54
<b>Figura II.36:</b> Relación entre los valores del coeficiente de correlación y de la relación señal-ruido representados en las figuras previas	54
<b>Figura II.37:</b> Evolución de los valores de velocidad longitudinal, $\langle u \rangle$ , con la profundidad, durante el ensayo realizado para detectar zonas de interferencia acústica	56
<b>Figura II.38:</b> Evolución del parámetro SNR con la profundidad, durante el ensayo realizado para detectar zonas de interferencia acústica	56
<b>Figura II.39:</b> Evolución del parámetro correlación con la profundidad, durante el ensayo realizado para detectar zonas de interferencia acústica	56
<b>Figura II.40:</b> Perfiles de velocidades, $\langle u \rangle$ , medidos con frecuencias de registro de 50 Hz y 75 Hz	60
<b>Figura II.41:</b> Perfiles de varianzas de las señales de velocidad en la dirección longitudinal, $\langle u'^2 \rangle$ , medidos con frecuencias de 50 Hz y 75 Hz	60
<b>Figura II.42:</b> Perfiles de varianzas de las señales de velocidad en la dirección transversal, $\langle v'^2 \rangle$ , medidos con frecuencias de 50 Hz y 75 Hz	61
<b>Figura II.43:</b> Perfiles de varianzas de las señales de velocidad en la dirección vertical, $\langle w'^2 \rangle$ , medidos con frecuencias de 50 Hz y 75 Hz	61
<b>Figura II.44:</b> Perfiles de energía asociada a las fluctuaciones de velocidad, $k$ , obtenidos a partir de mediciones realizadas con frecuencias de 50 Hz y 75 Hz	61
<b>Figura II.45:</b> Perfiles de Tensiones de Reynolds, $-\langle u'w' \rangle$ , obtenidos a partir de mediciones realizadas con frecuencias de 50 Hz y 75 Hz	61
<b>Figura II.46:</b> Localización de las mediciones representativas del flujo no	65

perturbado

- Figura II.47:** Coeficientes de variación de las estimaciones de las tres componentes de velocidad,  $\langle u \rangle$ ,  $\langle v \rangle$ ,  $\langle w \rangle$ .  $z = 1\text{cm}$  66
- Figura II.48:** Coeficientes de variación de las estimaciones de las varianzas de las tres componentes de velocidad,  $\langle u'^2 \rangle$ ,  $\langle v'^2 \rangle$ ,  $\langle w'^2 \rangle$ .  $z = 1\text{cm}$  66
- Figura II.49:** Coeficientes de variación de las estimaciones de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad,  $k$ .  $z = 1\text{cm}$  67
- Figura II.50:** Coeficientes de variación de las estimaciones de las tensiones de Reynolds  $\langle u'w' \rangle$ .  $z = 1\text{cm}$  67
- Figura II.51:** Tensiones de Reynolds medias  $\langle u'v' \rangle$  y  $\langle v'w' \rangle$  como una función del tiempo.  $z = 1\text{cm}$  67
- Figura II.52:** Desvíos de las estimaciones de las tensiones de Reynolds  $\langle u'v' \rangle$  y  $\langle v'w' \rangle$  como una función del tiempo.  $z = 1\text{cm}$  67
- Figura II.53:** Coeficientes de variación de las estimaciones de las tres componentes de velocidad,  $\langle u \rangle$ ,  $\langle v \rangle$ ,  $\langle w \rangle$ .  $z = 11\text{cm}$  68
- Figura II.54:** Coeficientes de variación de las estimaciones de las varianzas de las tres componentes de velocidad,  $\langle u'^2 \rangle$ ,  $\langle v'^2 \rangle$ ,  $\langle w'^2 \rangle$ .  $z = 11\text{cm}$  68
- Figura II.55:** Coeficientes de variación de las estimaciones de la energía cinética turbulenta,  $k$ .  $z = 11\text{cm}$  68
- Figura II.56:** Coeficientes de variación de las estimaciones de las tensiones de Reynolds  $\langle u'w' \rangle$ .  $z = 11\text{cm}$  68
- Figura II.57:** Tensiones de Reynolds medias  $\langle u'v' \rangle$  y  $\langle v'w' \rangle$  como una función del tiempo.  $z = 11\text{cm}$  69
- Figura II.58:** Desvíos de las estimaciones de las tensiones de Reynolds  $\langle u'v' \rangle$  y  $\langle v'w' \rangle$  como una función del tiempo.  $z = 11\text{cm}$  69
- Figura II.59:** Localización de las mediciones representativas del flujo contraído y afectado por la capa de corte desprendida desde el estribo 70
- Figura II.60:** Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de la componente longitudinal del vector velocidad,  $\langle u \rangle$ , en diferentes localizaciones.  $z = 1\text{cm}$  70
- Figura II.61:** Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de la componente transversal del vector velocidad,  $\langle v \rangle$ , en diferentes

localizaciones. $z=1\text{cm}$	70
<b>Figura II.62:</b> Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de la componente vertical del vector velocidad, $\langle w \rangle$ , en diferentes localizaciones. $z = 1\text{cm}$	71
<b>Figura II.63:</b> Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de la varianza de la componente longitudinal del vector velocidad, $\langle u'^2 \rangle$ , en diferentes localizaciones. $z = 1\text{cm}$	71
<b>Figura II.64:</b> Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de la varianza de la componente transversal del vector velocidad, $\langle v'^2 \rangle$ , en diferentes localizaciones. $z = 1\text{cm}$	71
<b>Figura II.65:</b> Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de la varianza de la componente vertical del vector velocidad, $\langle w'^2 \rangle$ , en diferentes localizaciones. $z = 1\text{cm}$	71
<b>Figura II.66:</b> Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad, $k$ , en diferentes localizaciones. $z = 1\text{cm}$	72
<b>Figura II.67:</b> Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de las tensiones de Reynolds $\langle u'w' \rangle$ en diferentes localizaciones. $z = 1\text{cm}$	72
<b>Figura II.68:</b> Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de las tensiones de Reynolds $\langle u'v' \rangle$ en diferentes localizaciones. $z = 1\text{cm}$	72
<b>Figura II.69:</b> Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de las tensiones de Reynolds $\langle v'w' \rangle$ en diferentes localizaciones. $z = 1\text{cm}$	72
<b>Figura II.70:</b> Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de la componente longitudinal del vector velocidad, $\langle u \rangle$ en diferentes localizaciones. $z = 11\text{cm}$	74
<b>Figura II.71:</b> Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de la componente transversal del vector velocidad, $\langle v \rangle$ , en diferentes localizaciones. $z = 11\text{cm}$	74
<b>Figura II.72:</b> Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las	

estimaciones de la componente vertical del vector velocidad, $\langle w \rangle$ , en diferentes localizaciones. $z = 11\text{cm}$	74
<b>Figura II.73:</b> Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de la varianza de la componente longitudinal del vector velocidad, $\langle u'^2 \rangle$ , en diferentes localizaciones. $z = 11\text{cm}$	74
<b>Figura II.74:</b> Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de la varianza de la componente transversal del vector velocidad, $\langle v'^2 \rangle$ , en diferentes localizaciones. $z = 11\text{cm}$	75
<b>Figura II.75:</b> Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de la varianza de la componente vertical del vector velocidad, $\langle w'^2 \rangle$ , en diferentes localizaciones. $z = 11\text{cm}$	75
<b>Figura II.76:</b> Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad, $k$ , en diferentes localizaciones. $z = 11\text{cm}$	75
<b>Figura II.77:</b> Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de las tensiones de Reynolds $\langle u'w' \rangle$ en diferentes localizaciones. $z = 11\text{cm}$	75
<b>Figura II.78:</b> Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de las tensiones de Reynolds $\langle u'v' \rangle$ en diferentes localizaciones. $z = 11\text{cm}$	76
<b>Figura II.79:</b> Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de las tensiones de Reynolds $\langle v'w' \rangle$ en diferentes localizaciones. $z = 11\text{cm}$	76
<b>Figura II.80:</b> Localización de las mediciones representativas del flujo aguas arriba del estribo	78
<b>Figura II.81:</b> Coeficientes de variación de las estimaciones de la componente longitudinal de velocidad, $\langle u \rangle$ . $z = 1\text{cm}$	79
<b>Figura II.82:</b> Coeficientes de variación de las estimaciones de la componente transversal de velocidad, $\langle v \rangle$ . $z = 1\text{cm}$	79
<b>Figura II.83:</b> Coeficientes de variación de las estimaciones de las varianzas $\langle u'^2 \rangle$ , $\langle v'^2 \rangle$ , $\langle w'^2 \rangle$ . $z = 1\text{cm}$	79
<b>Figura II.84:</b> Coeficientes de variación de las estimaciones de la energía asociada	

a las fluctuaciones de velocidad, $k$ . $z = 1\text{cm}$	79
<b>Figura II.85:</b> Coeficientes de variación de las estimaciones de las tensiones de Reynolds $\langle u'w' \rangle$ , $\langle u'v' \rangle$ , $\langle v'w' \rangle$ . $z=1\text{cm}$	79
<b>Figura II.86:</b> Velocidades medias verticales, $\langle w \rangle$ , como una función del tiempo. $z = 1\text{cm}$	79
<b>Figura II.87:</b> Desvíos de las estimaciones de las velocidades medias verticales, $\langle w \rangle$ , como una función del tiempo. $z = 1\text{cm}$	80
<b>Figura II.88:</b> Coeficientes de variación de las estimaciones de las componentes longitudinal y transversal de velocidad, $\langle u \rangle$ y $\langle v \rangle$ . $z = 13\text{cm}$	81
<b>Figura II.89:</b> Coeficientes de variación de las estimaciones de las varianzas $\langle u'^2 \rangle$ , $\langle v'^2 \rangle$ , $\langle w'^2 \rangle$ . $z = 13\text{cm}$	81
<b>Figura II.90:</b> Coeficientes de variación de las estimaciones de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad, $k$ . $z = 13\text{cm}$	81
<b>Figura II.91:</b> Coeficiente de variación de las estimaciones de las tensiones de Reynolds $\langle u'w' \rangle$ , $\langle u'v' \rangle$ , $\langle v'w' \rangle$ . $z = 13\text{cm}$	81
<b>Figura II.92:</b> Velocidades medias verticales, $\langle w \rangle$ , como una función del tiempo. $z = 13\text{cm}$	82
<b>Figura II.93:</b> Desvíos de las estimaciones de velocidades medias verticales, $\langle w \rangle$ , como una función del tiempo. $z=13\text{cm}$	82
<b>Figura II.94:</b> Localización de las mediciones representativas del flujo aguas abajo del estribo	82
<b>Figura II.95:</b> Coeficientes de variación de las estimaciones de las componentes longitudinal y transversal de la velocidad, $\langle u \rangle$ y $\langle v \rangle$ . $z = 1\text{cm}$	83
<b>Figura II.96:</b> Coeficientes de variación de las estimaciones de las varianzas, $\langle u'^2 \rangle$ , $\langle v'^2 \rangle$ , $\langle w'^2 \rangle$ . $z = 1\text{cm}$	83
<b>Figura II.97:</b> Coeficientes de variación de las estimaciones de la energía asociada a la fluctuaciones de velocidad, $k$ . $z = 1\text{cm}$	83
<b>Figura II.98:</b> Velocidades medias $\langle w \rangle$ como una función del tiempo. $z = 1\text{cm}$	84
<b>Figura II.99:</b> Desvíos de las estimaciones de velocidades medias $\langle w \rangle$ como una función del tiempo. $z = 1\text{cm}$	84
<b>Figura II.100:</b> Tensiones medias $\langle u'v' \rangle$ , $\langle u'w' \rangle$ , $\langle v'w' \rangle$ como una función del tiempo. $z=1\text{cm}$	84

<b>Figura II.101:</b> Desvíos de las estimaciones de las tensiones $\langle u'v' \rangle$ , $\langle u'w' \rangle$ , $\langle v'w' \rangle$ como una función del tiempo. $z=1$ cm	84
<b>Figura II.102:</b> Coeficientes de variación de las estimaciones de las componentes longitudinal y transversal de la velocidad, $\langle u \rangle$ y $\langle v \rangle$ . $z=13$ cm	85
<b>Figura II.103:</b> Coeficientes de variación de las estimaciones de las varianzas $\langle u'^2 \rangle$ , $\langle v'^2 \rangle$ , $\langle w'^2 \rangle$ . $z=13$ cm	85
<b>Figura II.104:</b> Coeficientes de variación de las estimaciones de la energía asociada a la fluctuaciones de velocidad, $k$ . $z=13$ cm	85
<b>Figura II.105:</b> Coeficientes de variación de las estimaciones de las tensiones de Reynolds $\langle u'v' \rangle$ , $\langle v'w' \rangle$ . $z=13$ cm	85
<b>Figura II.106:</b> Velocidades medias $\langle w \rangle$ como una función del tiempo. $z=13$ cm	86
<b>Figura II.107:</b> Desvíos de las estimaciones de las velocidades medias $\langle w \rangle$ como una función del tiempo. $z=13$ cm	86
<b>Figura II.108:</b> Tensiones medias $\langle u'w' \rangle$ como una función del tiempo. $z=13$ cm	86
<b>Figura II.109:</b> Desvíos de las estimaciones de las tensiones medias, $\langle u'w' \rangle$ , como una función del tiempo. $z=13$ cm	86
<b>Figura II.110:</b> Ejemplo de señales de velocidad del flujo con presencia de valores extremos anómalos	87
<b>Figura II.111:</b> Localizaciones en las cuales se registraron señales de velocidad para evaluar métodos de detección, remoción y reemplazo de valores anómalos	88
<b>Figura II.112:</b> Comparación entre espectros de energía derivados de mediciones de velocidades con 25, 50, 75, 100 y 125 Hz. Flujo no perturbado. $z=10.7$ cm. Componente longitudinal $\langle u \rangle$	96
<b>Figura II.113:</b> Comparación entre espectros de energía derivados de mediciones de velocidades con 25, 50, 75, 100 y 125 Hz. Flujo no perturbado. $z=1$ cm. Componente longitudinal $\langle u \rangle$	96
<b>Figura III.1:</b> Localización de verticales y distribución vertical de puntos medidos para caracterizar el flujo no perturbado	98
<b>Figura III.2:</b> Definición de variables utilizadas en el cálculo de la velocidad media en la vertical	98
<b>Figura III.3:</b> Distribución transversal de velocidades medias en la vertical, $U$ , en el canal de ensayos para el flujo no perturbado	99

<b>Figura III.4:</b> Comparación entre la distribución porcentual transversal de caudales acumulados, medida en el flujo no perturbado, y la distribución uniforme	99
<b>Figura III.5:</b> Perfiles de velocidad representativos del flujo no perturbado	99
<b>Figura III.6:</b> Ajuste logarítmico del perfil de velocidades medido (VI)	104
<b>Figura III.7:</b> Ajuste logarítmico del perfil de velocidades medido (VII)	104
<b>Figura III.8:</b> Distribución vertical de $\frac{\langle u'^2 \rangle^{\frac{1}{2}}}{U_*}$ . Contraste entre el perfil teórico y el obtenido a partir de datos medidos con ADV. Perfil (VI)	106
<b>Figura III.9:</b> Distribución vertical de $\frac{\langle v'^2 \rangle^{\frac{1}{2}}}{U_*}$ . Contraste entre el perfil teórico y el obtenido a partir de datos medidos con ADV. Perfil (VI)	106
<b>Figura III.10:</b> Distribución vertical de $\frac{TKE}{U_*^2}$ . Contraste entre el perfil teórico y el obtenido a partir de datos medidos con ADV. Perfil (VI)	106
<b>Figura III.11:</b> Distribución vertical de $\frac{-\langle u'w' \rangle}{U_*^2}$ . Contraste entre el perfil teórico y el obtenido a partir de datos medidos con ADV. Perfil (VI)	106
<b>Figura III.12:</b> Distribución vertical de $\frac{\langle u'^2 \rangle^{\frac{1}{2}}}{U_*}$ . Contraste entre el perfil teórico y el obtenido a partir de datos medidos con ADV. Perfil (VII)	107
<b>Figura III.13:</b> Distribución vertical de $\frac{\langle v'^2 \rangle^{\frac{1}{2}}}{U_*}$ . Contraste entre el perfil teórico y el obtenido a partir de datos medidos con ADV. Perfil (VII)	107
<b>Figura III.14:</b> Distribución vertical de $\frac{TKE}{U_*^2}$ . Contraste entre el perfil teórico y el obtenido a partir de datos medidos con ADV. Perfil (VII)	107
<b>Figura III.15:</b> Distribución vertical de $\frac{-\langle u'w' \rangle}{U_*^2}$ . Contraste entre el perfil teórico y el obtenido a partir de datos medidos con ADV. Perfil (VII)	107
<b>Figura IV.1:</b> Localizaciones en donde se midió la evolución de la erosión con el tiempo durante el ensayo EII. Estribo sin protección	110
<b>Figura IV.2:</b> Evolución de la erosión, $Z_e$ , con el tiempo durante el ensayo EII en	

las localizaciones V, SP <sub>1</sub> y SP <sub>2</sub> de figura IV.1. Estribo sin protección	110
<b>Figura IV.3:</b> Localización del sector donde se inician las erosiones para el caso de estribo protegido. EIII	111
<b>Figura IV.4:</b> Ubicación del sector donde comienza el proceso erosivo. Imagen tomada durante el desarrollo de EIII. Estribo protegido. DC indica la dirección de la corriente principal	111
<b>Figura IV.5:</b> Conformación del lecho al finalizar el ensayo EIII. Fotografía tomada una vez que el canal fue drenado	111
<b>Figura IV.6:</b> Localizaciones en donde se midió la evolución de la erosión con el tiempo durante el ensayo EIII. Estribo protegido. La línea de puntos representa la posición de la protección al comienzo del proceso	112
<b>Figura IV.7:</b> Evolución de la erosión, $Z_e$ , con el tiempo durante el ensayo EIII en las localizaciones CP <sub>1</sub> y CP <sub>2</sub> de figura IV.6. Estribo protegido	112
<b>Figura IV.8:</b> Relación entre la profundidad de erosión medida en un determinado tiempo " $Z_e$ " y la existente al cabo de 6000 minutos de ensayo, $Z_{e6000}$ . Se incluyen los datos correspondientes al punto V (EII, Fig. IV.1) y al punto CP1 (EIII, Fig. IV.6)	114
<b>Figura IV.9:</b> Relación entre la profundidad de erosión medida en un determinado tiempo " $Z_e$ " y la existente al cabo de 6000 minutos de ensayo, $Z_{e6000}$ . Se incluyen los datos correspondientes al punto SP <sub>2</sub> (EII, Fig. IV.1) y al punto CP <sub>2</sub> (EIII, Fig. IV.6)	115
<b>Figura IV.10:</b> Mapa de contornos batimétricos. Estribo sin protección. EIV (tiempo de evolución de la erosión t=0min)	116
<b>Figura IV.11:</b> Mapa de contornos batimétricos. Estribo sin protección. EV (tiempo de evolución de la erosión t=2880min)	116
<b>Figura IV.12:</b> Perfiles del lecho. Ensayos EIV (t=0min) – EV (t=2880min). Sección transversal de progresiva longitudinal x=-60cm. Estribo sin protección	117
<b>Figura IV.13:</b> Perfiles del lecho. Ensayos EIV (t=0min) – EV (t=2880min). Sección transversal de progresiva longitudinal x=-40cm. Estribo sin protección	117
<b>Figura IV.14:</b> Perfiles del lecho. Ensayos EIV (t=0min) – EV (t=2880min). Sección transversal de progresiva longitudinal x=-20cm. Estribo sin protección	117
<b>Figura IV.15:</b> Perfiles del lecho. Ensayos EIV (t=0min) – EV (t=2880min).	

Sección transversal de progresiva longitudinal $x=-06\text{cm}$ . Estribo sin protección	117
<b>Figura IV.16:</b> Perfiles del lecho. Ensayos EIV ( $t=0\text{min}$ ) – EV ( $t=2880\text{min}$ ).	
Sección transversal de progresiva longitudinal $x=0\text{cm}$ . Estribo sin protección	118
<b>Figura IV.17:</b> Perfiles del lecho. Ensayos EIV ( $t=0\text{min}$ ) – EV ( $t=2880\text{min}$ ).	
Sección transversal de progresiva longitudinal $x=12\text{cm}$ . Estribo sin protección	118
<b>Figura IV.18:</b> Perfiles del lecho. Ensayos EIV ( $t=0\text{min}$ ) – EV ( $t=2880\text{min}$ ).	
Sección transversal de progresiva longitudinal $x=20\text{cm}$ . Estribo sin protección.	118
<b>Figura IV.19:</b> Perfiles del lecho. Ensayos EIV ( $t=0\text{min}$ ) – EV ( $t=2880\text{min}$ ).	
Sección transversal de progresiva longitudinal $x=40\text{cm}$ . Estribo sin protección	118
<b>Figura IV.20:</b> Perfiles del lecho. Ensayos EIV ( $t=0\text{min}$ ) – EV ( $t=2880\text{min}$ ).	
Sección transversal de progresiva longitudinal $x=60\text{cm}$ . Estribo sin protección	119
<b>Figura IV.21:</b> Perfiles del lecho. Ensayos EIV ( $t=0\text{min}$ ) – EV ( $t=2880\text{min}$ ).	
Sección transversal de progresiva longitudinal $x=100\text{cm}$ . Estribo sin protección	119
<b>Figura IV.22:</b> Mapa de contornos batimétricos. Estribo protegido. EVI (tiempo de evolución de la erosión $t=0\text{min}$ ). La línea punteada representa la posición de la protección en el momento inicial del desarrollo de la erosión	120
<b>Figura IV.23:</b> Mapa de contornos batimétricos. Estribo protegido. EVII (tiempo de evolución de la erosión $t=100\text{min}$ ). La línea punteada representa la posición de la protección en el momento inicial del desarrollo de la erosión	120
<b>Figura IV.24:</b> Mapa de contornos batimétricos. Estribo protegido. EVIII (tiempo de evolución de la erosión $t=400\text{min}$ ). La línea punteada representa la posición de la protección en el momento inicial del desarrollo de la erosión	120
<b>Figura IV.25:</b> Mapa de contornos batimétricos. Estribo protegido. EIX (tiempo de evolución de la erosión $t=2880\text{min}$ ). La línea punteada representa la posición de la protección en el momento inicial del desarrollo de la erosión	120
<b>Figura IV.26:</b> Perfiles del lecho. Ensayos EVI ( $t=0\text{min}$ ) – EVII ( $t=100\text{min}$ ) – EVIII ( $t=400\text{min}$ ) – EIX ( $t=2880\text{min}$ ). Sección transversal de progresiva longitudinal $x=-60\text{cm}$ . Estribo protegido	121
<b>Figura IV.27:</b> Perfiles del lecho. Ensayos EVI ( $t=0\text{min}$ ) – EVII ( $t=100\text{min}$ ) – EVIII ( $t=400\text{min}$ ) – EIX ( $t=2880\text{min}$ ). Sección transversal de progresiva longitudinal $x=-40\text{cm}$ . Estribo protegido	121
<b>Figura IV.28:</b> Perfiles del lecho. Ensayos EVI ( $t=0\text{min}$ ) – EVII ( $t=100\text{min}$ ) –	

EVIII (t=400min) – EIX (t=2880min). Sección transversal de progresiva longitudinal x=-20cm. Estribo protegido	121
<b>Figura IV.29:</b> Perfiles del lecho. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (t=400min) – EIX (t=2880min). Sección transversal de progresiva longitudinal x=0cm. Estribo protegido	121
<b>Figura IV.30:</b> Perfiles del lecho. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (t=400min) – EIX (t=2880min). Sección transversal de progresiva longitudinal x=12cm. Estribo protegido	122
<b>Figura IV.31:</b> Perfiles del lecho. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (t=400min) – EIX (t=2880min). Sección transversal de progresiva longitudinal x=20cm. Estribo protegido	122
<b>Figura IV.32:</b> Perfiles del lecho. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (t=400min) – EIX (t=2880min). Sección transversal de progresiva longitudinal x=40cm. Estribo protegido	122
<b>Figura IV.33:</b> Perfiles del lecho. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (t=400min) – EIX (t=2880min). Sección transversal de progresiva longitudinal x=60cm. Estribo protegido	122
<b>Figura IV.34:</b> Perfiles del lecho. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (t=400min) – EIX (t=2880min). Sección transversal de progresiva longitudinal x=80cm. Estribo protegido	123
<b>Figura IV.35:</b> Perfiles del lecho. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (t=400min) – EIX (t=2880min). Sección transversal de progresiva longitudinal x=100cm. Estribo protegido	123
<b>Figura IV.36:</b> Perfiles del lecho. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (t=400min) – EIX (t=2880min). Sección transversal de progresiva longitudinal x=160cm. Estribo protegido	123
<b>Figura V.1:</b> Campo de velocidades medias superficiales. Estribo sin protección. Ensayo EIV (Tiempo de evolución de las erosiones t=0)	125
<b>Figura V.2:</b> Campo de velocidades medias superficiales. Estribo sin protección. Ensayo EV (Tiempo de evolución de las erosiones t=2880 min)	125
<b>Figura V.3:</b> Campo de velocidades medias superficiales. Estribo con protección. Ensayo EVI (Tiempo de evolución de las erosiones t=0 min)	126

<b>Figura V.4:</b> Campo de velocidades medias superficiales. Estribo con protección. Ensayo EVII (Tiempo de evolución de las erosiones t=100 min)	126
<b>Figura V.5:</b> Campo de velocidades medias superficiales. Estribo con protección. Ensayo EVIII (Tiempo de evolución de las erosiones t=400 min)	126
<b>Figura V.6:</b> Campo de velocidades medias superficiales. Estribo con protección. Ensayo EIX (Tiempo de evolución de las erosiones t=2880 min)	126
<b>Figura V.7:</b> Distribución transversal de máximas velocidades superficiales adimensionales $\frac{V_{xyS}}{U_a}$ y perfiles del lecho. Sección de progresiva longitudinal $\frac{x}{L} = 0.0$ . Ensayos EIV (t=0min) y EV (t=2880 min) para estribo sin protección y ensayos EVI (t=0min) y EIX (t=2880min) para estribo protegido	128
<b>Figura V.8:</b> Distribución transversal de máximas velocidades superficiales adimensionales $\frac{V_{xyS}}{U_a}$ y perfiles del lecho. Sección de progresiva longitudinal $\frac{x}{L} = 2.0$ . Ensayos EIV (t=0min) y EV (t=2880 min) para estribo sin protección y ensayos EVI (t=0min) y EIX (t=2880min) para estribo protegido	128
<b>Figura V.9:</b> Campo de vorticidad superficial. Estribo sin protección. Ensayo EIV (Tiempo de evolución de las erosiones t=0 min)	129
<b>Figura V.10:</b> Campo de vorticidad superficial. Estribo protegido. Ensayo EV (Tiempo de evolución de las erosiones t=2880 min)	129
<b>Figura V.11:</b> Campo de vorticidad superficial. Estribo protegido. Ensayo EVI (Tiempo de evolución de las erosiones t=0 min)	130
<b>Figura V.12:</b> Campo de vorticidad superficial. Estribo protegido. Ensayo EVII (Tiempo de evolución de las erosiones t=100 min)	130
<b>Figura V.13:</b> Campo de vorticidad superficial. Estribo protegido. Ensayo EVIII (Tiempo de evolución de las erosiones t=400 min)	130
<b>Figura V.14:</b> Campo de vorticidad superficial. Estribo protegido. Ensayo EIX (Tiempo de evolución de las erosiones t=2880 min)	130
<b>Figura V.15:</b> Distribución transversal de vorticidad adimensional: $\frac{\omega h}{U_a}$ . Sección $\frac{x}{L} = 0.0$ . Situación inicial. Ensayos EIV (estribo sin protección)y EVI (estribo protegido)	131

- Figura V.16:** Distribución transversal de vorticidad adimensional:  $\frac{\omega h}{U_a}$ . Sección  $\frac{x}{L} = 0.67$ . Situación inicial. Ensayos EIV (estribo sin protección) y EVI (estribo protegido) 131
- Figura V.17:** Distribución transversal de vorticidad adimensional:  $\frac{\omega h}{U_a}$ . Sección  $\frac{x}{L} = 1.67$ . Situación inicial. Ensayo EIV (estribo sin protección) – Ensayo EVI (estribo protegido) 132
- Figura V.18:** Distribución transversal de vorticidad adimensional:  $\frac{\omega h}{U_a}$ . Sección  $\frac{x}{L} = 0.0$ . Estribo sin protección. Ensayo EIV (tiempo de evolución de la erosión t=0min) y Ensayo EV (tiempo de evolución de la erosión t=2880min) 132
- Figura V.19:** Distribución transversal de vorticidad adimensional:  $\frac{\omega h}{U_a}$ . Sección  $\frac{x}{L} = 0.67$ . Estribo sin protección. Ensayo EIV (tiempo de evolución de la erosión t=0min) y Ensayo EV (tiempo de evolución de la erosión t=2880min) 132
- Figura V.20:** Distribución transversal de vorticidad adimensional:  $\frac{\omega h}{U_a}$ . Sección  $\frac{x}{L} = 1.67$ . Estribo sin protección. Ensayo EIV (tiempo de evolución de la erosión t=0min) y Ensayo EV (tiempo de evolución de la erosión t=2880min) 132
- Figura V.21:** Distribución transversal de vorticidad adimensional:  $\frac{\omega h}{U_a}$ . Sección  $\frac{x}{L} = 0.0$ . Estribo sin protección. Ensayo EVI (tiempo de evolución de la erosión t=0min) y Ensayo EIX (tiempo de evolución de la erosión t=2880min) 133
- Figura V.22:** Distribución transversal de vorticidad adimensional:  $\frac{\omega h}{U_a}$ . Sección  $\frac{x}{L} = 0.67$ . Ensayo EVI (tiempo de evolución de la erosión t=0min) y Ensayo EIX (tiempo de evolución de la erosión t=2880min) 133
- Figura V.23:** Distribución transversal de vorticidad adimensional:  $\frac{\omega h}{U_a}$ . Sección  $\frac{x}{L} = 1.67$ . Ensayo EVI (tiempo de evolución de la erosión t=0min) y Ensayo EIX (tiempo de evolución de la erosión t=2880min) 133
- Figura V.24:** Mapa de contornos de velocidad media en la vertical adimensional,

$\frac{U}{U_a}$ . Estribo sin protección. Ensayo EIV (tiempo de evolución de las erosiones t=0min)	135
<b>Figura V.25:</b> Mapa de contornos de velocidad media en la vertical adimensional, $\frac{U}{U_a}$ . Estribo sin protección. Ensayo EV (tiempo de evolución de las erosiones t=2880min)	135
<b>Figura V.26:</b> Distribución transversal de la velocidad media en la vertical adimensional, $\frac{U}{U_a}$ y perfiles del lecho. Sección $\frac{x}{L} = -0.67$ . Estribo sin protección. Ensayos EIV (t=0 min) y EV (t=2880min)	136
<b>Figura V.27:</b> Distribución transversal de la velocidad media en la vertical adimensional, $\frac{U}{U_a}$ y perfiles del lecho. Sección $\frac{x}{L} = 0.0$ . Estribo sin protección. Ensayos EIV (t=0 min) y EV (t=2880min)	136
<b>Figura V.28:</b> Distribución transversal de la velocidad media en la vertical adimensional, $\frac{U}{U_a}$ y perfiles del lecho. Sección $\frac{x}{L} = 0.67$ . Estribo sin protección. Ensayos EIV (t=0 min) y EV (t=2880min)	137
<b>Figura V.29:</b> Distribución transversal de la velocidad media en la vertical adimensional, $\frac{U}{U_a}$ y perfiles del lecho. Sección $\frac{x}{L} = 1.33$ . Estribo sin protección. Ensayos EIV (t=0 min) y EV (t=2880min)	137
<b>Figura V.30:</b> Mapa de contornos de velocidad media en la vertical adimensional, $\frac{U}{U_a}$ . Estribo protegido. Ensayo EVI (tiempo de evolución de las erosiones t=0min)	139
<b>Figura V.31:</b> Mapa de contornos de velocidad media en la vertical adimensional, $\frac{U}{U_a}$ . Estribo protegido. Ensayo EVII (tiempo de evolución de las erosiones t=100min)	139
<b>Figura V.32:</b> Mapa de contornos de velocidad media en la vertical adimensional, $\frac{U}{U_a}$ . Estribo protegido. Ensayo EVIII (tiempo de evolución de las erosiones t=400min)	139
<b>Figura V.33:</b> Mapa de contornos de velocidad media en la vertical adimensional,	

$\frac{U}{U_a}$ . Estribo protegido. Ensayo EIX (tiempo de evolución de las erosiones t=2880min)	139
<b>Figura V.34:</b> Distribución transversal de la velocidad media en la vertical adimensional, $\frac{U}{U_a}$ y perfiles del lecho. Sección $\frac{x}{L} = -0.67$ . Estribo protegido. Ensayos EVI (t=0min)- EVII (t=100min)- EVIII (t=400min)- EIX (t=2880min)	140
<b>Figura V.35:</b> Distribución transversal de la velocidad media en la vertical adimensional, $\frac{U}{U_a}$ y perfiles del lecho. Sección $\frac{x}{L} = 0.0$ . Estribo protegido. Ensayos EVI (t=0min)- EVII (t=100min)- EVIII (t=400min)- EIX (t=2880min)	140
<b>Figura V.36:</b> Distribución transversal de la velocidad media en la vertical adimensional, $\frac{U}{U_a}$ y perfiles del lecho. Sección $\frac{x}{L} = 0.67$ . Estribo protegido. Ensayos EVI (t=0min)- EVII (t=100min)- EVIII (t=400min)- EIX (t=2880min)	142
<b>Figura V.37:</b> Distribución transversal de la velocidad media en la vertical adimensional, $\frac{U}{U_a}$ y perfiles del lecho. Sección $\frac{x}{L} = 1.33$ . Estribo protegido. Ensayos EVI (t=0min)- EVII (t=100min)- EVIII (t=400min)- EIX (t=2880min)	142
<b>Figura V.38:</b> Distribución transversal de la velocidad media en la vertical adimensional, $\frac{U}{U_a}$ y perfiles del lecho. Sección $\frac{x}{L} = 2.0$ . Estribo protegido. Ensayos EVI (t=0min)- EVII (t=100min)- EVIII (t=400min)- EIX (t=2880min)	142
<b>Figura V.39:</b> Distribución transversal de la velocidad media en la vertical adimensional, $\frac{U}{U_a}$ y perfiles del lecho. Sección $\frac{x}{L} = 2.67$ . Estribo protegido. Ensayos EVI (t=0min)- EVII (t=100min)- EVIII (t=400min)- EIX (t=2880min)	142
<b>Figura V.40:</b> Mapa de contornos de caudal específico adimensional, $\frac{q}{q_a}$ . Estribo sin protección. Ensayo EIV (tiempo de evolución de las erosiones t=0min)	144
<b>Figura V.41:</b> Mapa de contornos de caudal específico adimensional, $\frac{q}{q_a}$ . Estribo sin protección. Ensayo EV (tiempo de evolución de las erosiones t=2880min)	144
<b>Figura V.42:</b> Distribución transversal de caudal específico adimensional, $\frac{q}{q_a}$ , y perfiles del lecho. Sección $\frac{x}{L} = -0.67$ . Estribo sin protección. Ensayos EIV (t=0min) - EV (t=2880min)	145

- Figura V.43:** Distribución transversal de caudal específico adimensional,  $\frac{q}{q_a}$ , y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = 0.0$ . Estribo sin protección. Ensayos EIV (t=0min) - EV (t=2880min) 145
- Figura V.44:** Distribución transversal de caudal específico adimensional,  $\frac{q}{q_a}$ , y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = 0.67$ . Estribo sin protección. Ensayos EIV (t=0min) - EV (t=2880min) 145
- Figura V.45:** Distribución transversal de caudal específico adimensional,  $\frac{q}{q_a}$ , y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = 1.33$ . Estribo sin protección. Ensayos EIV (t=0min) - EV (t=2880min) 145
- Figura V.46:** Mapa de contornos de caudal específico adimensional,  $\frac{q}{q_a}$ . Estribo protegido. Ensayo EVI (tiempo de evolución de la erosión t=0min) 147
- Figura V.47:** Mapa de contornos de caudal específico adimensional,  $\frac{q}{q_a}$ . Estribo protegido. Ensayo EVII (tiempo de evolución de la erosión t=100min) 147
- Figura V.48:** Mapa de contornos de caudal específico adimensional,  $\frac{q}{q_a}$ . Estribo protegido. Ensayo EVIII (tiempo de evolución de la erosión t=400min) 147
- Figura V.49:** Mapa de contornos de caudal específico adimensional,  $\frac{q}{q_a}$ . Estribo protegido. Ensayo EIX (tiempo de evolución de la erosión t=2880min) 147
- Figura V.50:** Distribución transversal de caudal específico adimensional,  $\frac{q}{q_a}$ , y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = -0.67$ . Estribo con protección. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (t=400min) – EIX (t=2880min) 148
- Figura V.51:** Distribución transversal de caudal específico adimensional,  $\frac{q}{q_a}$ , y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = 0.0$ . Estribo con protección. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (t=400min) – EIX (t=2880min) 148
- Figura V.52:** Distribución transversal de caudal específico adimensional,  $\frac{q}{q_a}$ , y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = 0.67$ . Estribo con protección. Ensayos EVI

(t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (t=400min) – EIX (t=2880min)	148
<b>Figura V.53:</b> Distribución transversal de caudal específico adimensional, $\frac{q}{q_a}$ , y perfiles del lecho. Sección $\frac{x}{L} = 1.33$ . Estribo con protección. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (t=400min) – EIX (t=2880min)	148
<b>Figura V.54:</b> Distribución transversal de caudal específico adimensional, $\frac{q}{q_a}$ , y perfiles del lecho. Sección $\frac{x}{L} = 2.0$ . Estribo con protección. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (t=400min) – EIX (t=2880min)	149
<b>Figura V.55:</b> Distribución transversal de caudal específico adimensional, $\frac{q}{q_a}$ , y perfiles del lecho. Sección $\frac{x}{L} = 2.67$ . Estribo con protección. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (t=400min) – EIX (t=2880min)	149
<b>Figura V.56:</b> Mapa de contornos de energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical adimensional, $\frac{K}{(U_a)^2} * 10^2$ . Estribo sin protección. Ensayo EIV (tiempo de evolución de la erosión t=0min)	151
<b>Figura V.57:</b> Mapa de contornos de energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical adimensional, $\frac{K}{(U_a)^2} * 10^2$ . Estribo sin protección. Ensayo EV (tiempo de evolución de la erosión t=2880min)	151
<b>Figura V.58:</b> Distribución transversal de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical adimensional, $\frac{K}{(U_a)^2}$ , y perfiles del lecho. Sección $\frac{x}{L} = -0.67$ . Estribo sin protección. Ensayos EIV (t=0min) y EV (t=2880min)	153
<b>Figura V.59:</b> Distribución transversal de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical adimensional, $\frac{K}{(U_a)^2}$ , y perfiles del lecho. Sección $\frac{x}{L} = 0.0$ . Estribo sin protección. Ensayos EIV (t=0min) y EV (t=2880min)	153
<b>Figura V.60:</b> Distribución transversal de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical adimensional, $\frac{K}{(U_a)^2}$ , y perfiles del lecho. Sección $\frac{x}{L} = 0.67$ . Estribo sin protección. Ensayos EIV (t=0min) y EV (t=2880min)	153
<b>Figura V.61:</b> Distribución transversal de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical adimensional, $\frac{K}{(U_a)^2}$ , y perfiles del lecho. Sección	

$\frac{x}{L} = 1.33$ . Estribo sin protección. Ensayos EIV (t=0min) y EV (t=2880min) 153

**Figura V.62:** Distribución longitudinal de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{K}{(U_a)^2}$  y perfiles del lecho. Perfil

$\frac{y}{L} = 0.33$ . Estribo sin protección. Ensayos EIV (t=0min) y EV (t=2880min) 154

**Figura V.63:** Distribución longitudinal de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{K}{(U_a)^2}$  y perfiles del lecho. Perfil

$\frac{y}{L} = 1.0$ . Estribo sin protección. Ensayos EIV (t=0min) y EV (t=2880min) 154

**Figura V.64:** Mapa de contornos de energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{K}{(U_a)^2} * 10^2$ . Estribo protegido.

Ensayo EVI (tiempo de evolución de la erosión t=0min) 155

**Figura V.65:** Mapa de contornos de energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{K}{(U_a)^2} * 10^2$ . Estribo protegido.

Ensayo EVII (tiempo de evolución de la erosión t=100min) 155

**Figura V.66:** Mapa de contornos de energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{K}{(U_a)^2} * 10^2$ . Estribo protegido.

Ensayo EVIII (tiempo de evolución de la erosión t=400min) 155

**Figura V.67:** Mapa de contornos de energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{K}{(U_a)^2} * 10^2$ . Estribo protegido.

Ensayo EIX (tiempo de evolución de la erosión t=2880min) 155

**Figura V.68:** Distribución transversal de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{K}{(U_a)^2}$  y perfiles del lecho. Sección

$\frac{x}{L} = -0.67$ . Estribo protegido. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (400min) y EIX (2880min) 157

**Figura V.69:** Distribución transversal de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{K}{(U_a)^2}$  y perfiles del lecho. Sección

$\frac{x}{L} = 0.0$ . Estribo protegido. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (400min) y EIX (2880min) 157

**Figura V.70:** Distribución transversal de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{K}{(U_a)^2}$  y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = 1.33$ . Estribo protegido. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (400min) y EIX (2880min) 158

**Figura V.71:** Distribución transversal de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{K}{(U_a)^2}$  y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = 2.0$ . Estribo protegido. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (400min) y EIX (2880min) 158

**Figura V.72:** Distribución transversal de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{K}{(U_a)^2}$  y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = 2.67$ . Estribo protegido. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (400min) y EIX (2880min) 159

**Figura V.73:** Distribución transversal de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{K}{(U_a)^2}$  y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = 3.33$ . Estribo protegido. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (400min) y EIX (2880min) 159

**Figura VI.1:** Evolución de las velocidades adimensionales,  $\frac{\langle u \rangle}{U_a}$ ,  $\frac{\langle v \rangle}{U_a}$ ,  $\frac{\langle w \rangle}{U_a}$ , durante el desarrollo de erosiones en el punto SP2 de figura II.21. Estribo sin protección. z= 1cm. Ensayo EII 162

**Figura VI.2:** Evolución de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad, adimensional,  $\frac{k}{U_{*a}^2}$ , durante el desarrollo de erosiones en el punto SP2 de figura II.21. Estribo sin protección. z= 1cm. Ensayo EII 162

**Figura VI.3:** Evolución de las tensiones de Reynolds adimensionales,  $\frac{-\langle urvr \rangle}{U_{*a}^2}$ ,  $\frac{-\langle urvr \rangle}{U_{*a}^2}$ , durante el desarrollo de erosiones en el punto SP2 de figura II.21. Estribo sin protección. z= 1cm. Ensayo EII 163

**Figura VI.4:** Evolución de las velocidades adimensionales,  $\frac{\langle u \rangle}{U_a}$ ,  $\frac{\langle v \rangle}{U_a}$ ,  $\frac{\langle w \rangle}{U_a}$ , durante el desarrollo de erosiones en el punto CP1 de figura II.22. Estribo con protección.

z= 1cm. Ensayo EIII	165
<b>Figura VI.5:</b> Evolución de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad, adimensional, $\frac{k}{U_{*a}^2}$ , durante el desarrollo de erosiones en el punto CP1 de figura II.22. Estribo con protección. z= 1cm. Ensayo EIII	165
<b>Figura VI.6:</b> Evolución de las tensiones de Reynolds adimensionales, $\frac{-\langle urw \rangle}{U_{*a}^2}$ , $\frac{-\langle urv \rangle}{U_{*a}^2}$ , durante el desarrollo de erosiones en el punto CP1 de figura II.22. Estribo con protección. z= 1cm. Ensayo EIII	165
<b>Figura VI.7:</b> Evolución de las velocidades adimensionales, $\frac{\langle u \rangle}{U_a}$ , $\frac{\langle v \rangle}{U_a}$ , $\frac{\langle w \rangle}{U_a}$ , durante el desarrollo de erosiones en el punto CP2 de figura II.22. Estribo con protección. z= 1cm. Ensayo EIII	165
<b>Figura VI.8:</b> Evolución de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad, adimensional, $\frac{k}{U_{*a}^2}$ , durante el desarrollo de erosiones en el punto CP2 de figura II.22. Estribo con protección. z= 1cm. Ensayo EIII	166
<b>Figura VI.9:</b> Evolución de las tensiones de Reynolds adimensionales, $\frac{-\langle urw \rangle}{U_{*a}^2}$ , $\frac{-\langle urv \rangle}{U_{*a}^2}$ , durante el desarrollo de erosiones en el punto CP2 de figura II.22. Estribo con protección. z= 1cm. Ensayo EIII	166
<b>Figura VI.10:</b> Evolución de las velocidades adimensionales, $\frac{\langle u \rangle}{U_a}$ , $\frac{\langle v \rangle}{U_a}$ , $\frac{\langle w \rangle}{U_a}$ , durante el desarrollo de erosiones en el punto CP3 de figura II.22. Estribo con protección. z=2.2cm. Ensayo EIII	167
<b>Figura VI.11:</b> Evolución de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad, adimensional, $\frac{k}{U_{*a}^2}$ , durante el desarrollo de erosiones en el punto CP3 de figura II.22. Estribo con protección. z= 2.2 cm. Ensayo EIII	167
<b>Figura VI.12:</b> Evolución de las tensiones de Reynolds adimensionales, $\frac{-\langle urw \rangle}{U_{*a}^2}$ , $\frac{-\langle urv \rangle}{U_{*a}^2}$ , durante el desarrollo de erosiones en el punto CP3 de figura II.22. Estribo con protección. z= 2.2 cm. Ensayo EIII	168
<b>Figura VI.13:</b> Secciones transversales utilizadas para representar la evolución de	

la distribución de velocidades, energía asociada a las fluctuaciones de velocidad y tensiones de Reynolds durante el desarrollo de erosiones en la situación de estribo sin protección. Ensayos EIV-EV 170

**Figura VI.14:** Secciones transversales utilizadas para representar la evolución de la distribución de velocidades, energía asociada a las fluctuaciones de velocidad y tensiones de Reynolds durante el desarrollo de erosiones en la situación de estribo protegido. Ensayos EVI-EVII-EVIII-EIX 170

**Figura VI.15:** Variación de la distribución de velocidades longitudinales adimensionales,  $\frac{\langle u \rangle}{U_a}$ , con el desarrollo de la erosión. Secciones transversales de progresivas longitudinales A)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; B)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; C)  $\frac{x}{L} = 0.67$ ; D)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; E)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . Estribo sin protección, EIV-EV 175

**Figura VI.16:** Variaciones de perfiles de velocidades longitudinales adimensionales,  $\frac{\langle u \rangle}{U_a}$ , correspondientes a verticales localizadas dentro del sector erosionado en las secciones transversales de progresivas longitudinales A)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; B)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; C)  $\frac{x}{L} = 0.67$ ; D)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; E)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . En todas las secciones se consideraron perfiles de progresivas transversales  $\frac{y}{L} = 1.5$ ;  $\frac{y}{L} = 2.0$ ;  $\frac{y}{L} = 2.5$ ; adicionalmente en las secciones A) y B) se consideró el perfil de progresiva  $\frac{y}{L} = 1.2$ ; mientras que en las secciones C), D) y E) el perfil de progresiva  $\frac{y}{L} = 1.0$ . Estribo sin protección, Ensayos EIV-EV 176

**Figura VI.17:** Variaciones de las distribuciones verticales de: i) velocidades longitudinales,  $\frac{\langle u \rangle}{U_a}$ , ii) energía asociada a las fluctuaciones de velocidad,  $\frac{k}{U_{*a}^2}$ , iii) tensiones  $\frac{-\langle u'v' \rangle}{U_{*a}^2}$  y iv) tensiones  $\frac{-\langle u'w' \rangle}{U_{*a}^2}$  para una vertical ubicada a continuación de la posición de la hoya de erosión. Sección B.  $\frac{y}{L} = 3.0$ . Ensayos EIV-EV 177

**Figura VI.18:** Variación de la distribución de velocidades verticales adimensionales,  $\frac{\langle w \rangle}{U_a}$ , en las secciones transversales de progresivas longitudinales A)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; B)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; C)  $\frac{x}{L} = 0.67$ ; D)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; E)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . Estribo sin protección, EIV-EV 178

**Figura VI.19:** Representación de vectores de velocidad en el plano yz. Sección de progresiva longitudinal  $\frac{x}{L} = 0.0$ . Estribo sin protección. EV 180

**Figura VI.20:** Ilustración de a) relación entre la velocidad media en la vertical en la dirección longitudinal,  $U$ , la velocidad media en la vertical en la dirección transversal,  $V$ , y la velocidad resultante en el plano xy, promediado en la vertical  $V_{xy}$ ; b) relación entre las componentes, en cada localización, de la velocidad media en la dirección longitudinal,  $\langle u \rangle$ , y transversal  $\langle v \rangle$  y la velocidad media resultante en el plano “xy”,  $v_{xy}$ , c) descomposición del vector  $v_{xy}$  en componentes según los ejes P y S,  $v_P$  y  $v_S$ , respectivamente. Proyección de los vectores  $v_P$  y  $v_S$  sobre el eje Y,  $v_{Sy}$ ,  $v_{Py}$ . 182

**Figura VI.21:** Vectores de velocidad promediados en la vertical,  $V_{xy}$ , correspondientes a cada una de las verticales consideradas en las secciones A, B, C, D, E de figura VI.13. EIV 183

**Figura VI.22:** Vectores de velocidad promediados en la vertical,  $V_{xy}$ , correspondientes a cada una de las verticales consideradas en las secciones A, B, C, D, E de figura VI.13. EV 184

**Figura VI.23:** Representación de los vectores resultantes de componer la proyección sobre el eje “y” de la velocidad secundaria,  $v_{Sy}$ , y la componente vertical de la velocidad registrada,  $\langle w \rangle$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales A)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; B)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; C)  $\frac{x}{L} = 0.67$ ; D)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; E)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . Estribo sin protección, EIV-EV 186

**Figura VI.24:** Variaciones de las distribuciones de energía asociada a las fluctuaciones de velocidad adimensional,  $\frac{k}{U_*a^2}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales A)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; B)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; C)  $\frac{x}{L} = 0.67$ ; D)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; E)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . Estribo sin protección, EIV-EV 190

**Figura VI.25:** Variaciones de perfiles de energía asociada a las fluctuaciones de velocidad adimensional,  $\frac{k}{U_*a^2}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales A)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; B)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; C)  $\frac{x}{L} = 0.67$ ; D)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; E)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . En todas las secciones se consideraron perfiles de progresivas

transversales  $\frac{y}{L} = 1.5$ ;  $\frac{y}{L} = 2.0$ ;  $\frac{y}{L} = 2.5$ ; adicionalmente en las secciones A) y B) se consideró el perfil de progresiva  $\frac{y}{L} = 1.2$ ; mientras que en las secciones C), D) y E) el perfil de progresiva  $\frac{y}{L} = 1.0$ . Estribo sin protección, Ensayos EIV-EV 191

**Figura VI.26:** Evolución de perfiles de energía asociada a las fluctuaciones de velocidad adimensional,  $\frac{k}{U_{*a}^2}$ , correspondientes a la progresiva lateral  $\frac{y}{L} = 0.67$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales i)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; ii)  $\frac{x}{L} = 2.0$ ; iii)  $\frac{x}{L} = 3.33$  192

**Figura VI.28:** Variaciones de las distribuciones de las tensiones de Reynolds adimensionales,  $\frac{-\langle u'w' \rangle}{U_{*a}^2}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales A)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; B)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; C)  $\frac{x}{L} = 0.67$ ; D)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; E)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . Estribo sin protección, EIV-EV 198

**Figura VI.29:** Variaciones de perfiles de tensiones de Reynolds adimensionales,  $\frac{-\langle u'w' \rangle}{U_{*a}^2}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales A)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; B)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; C)  $\frac{x}{L} = 0.67$ ; D)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; E)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . En todas las secciones se consideraron perfiles de progresivas transversales  $\frac{y}{L} = 1.5$ ;  $\frac{y}{L} = 2.0$ ;  $\frac{y}{L} = 2.5$ ; adicionalmente en las secciones A) y B) se consideró el perfil de progresiva  $\frac{y}{L} = 1.2$ ; mientras que en las secciones C), D) y D) el perfil de progresiva  $\frac{y}{L} = 1.0$ . Estribo sin protección, Ensayos EIV-EV 199

**Figura VI.30:** Perfiles de distribución vertical de tensiones de Reynolds adimensionales,  $\frac{-\langle u'w' \rangle}{U_{*a}^2}$ , en la sección transversal localizada en  $\frac{x}{L} = -0.2$ ; i)  $\frac{y}{L} = 1.0$ ; ii)  $\frac{y}{L} = 1.2$ ; iii)  $\frac{y}{L} = 1.5$ . EIV-EV 200

**Figura VI.31:** Perfiles de distribución vertical de tensiones de Reynolds adimensionales,  $\frac{-\langle u'w' \rangle}{U_{*a}^2}$ , en la progresiva transversal  $\frac{y}{L} = 0.67$  correspondiente a las secciones transversales i)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; ii)  $\frac{x}{L} = 2.0$ ; iii)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . EIV-EV 200

**Figura VI.32:** Variaciones de las distribuciones de las tensiones de Reynolds adimensionales,  $\frac{-\langle u'v' \rangle}{U_{*a}^2}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales A)

$\frac{x}{L} = -0.67$ ; B)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; C)  $\frac{x}{L} = 0.67$ ; D)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; E)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . Estribo sin protección, EIV-EV 201

**Figura VI.33:** Variaciones de perfiles de tensiones de Reynolds adimensionales,  $\frac{-\langle urvr \rangle}{U_* a^2}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales A)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; B)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; C)  $\frac{x}{L} = 0.67$ ; D)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; E)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . En todas las secciones se consideraron perfiles de progresivas transversales  $\frac{y}{L} = 1.5$ ;  $\frac{y}{L} = 2.0$ ;  $\frac{y}{L} = 2.5$ ; adicionalmente en las secciones A) y B) se consideró el perfil de progresiva  $\frac{y}{L} = 1.2$ ; mientras que en las secciones C), D) y E) el perfil de progresiva  $\frac{y}{L} = 1.0$ . Estribo sin protección, Ensayos EIV-EV 202

**Figura VI.34:** Perfiles de distribución vertical de tensiones de Reynolds adimensionales,  $\frac{-\langle urvr \rangle}{U_* a^2}$ , en la sección transversal localizada en  $\frac{x}{L} = -0.2$ ; i)  $\frac{y}{L} = 1.0$ ; ii)  $\frac{y}{L} = 1.2$ ; iii)  $\frac{y}{L} = 1.5$ . EIV-EV 203

**Figura VI.35:** Variación de la distribución de tensiones de Reynolds adimensionales,  $\frac{-\langle urvr \rangle}{U_* a^2}$  en la sección transversal de progresiva longitudinal  $\frac{x}{L} = 5.33$ . EIV-EV 204

**Figura VI.36:** Evolución de la distribución de velocidades longitudinales adimensionales,  $\frac{\langle u \rangle}{U_a}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales a)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; b)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; c)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; d)  $\frac{x}{L} = 2.0$ ; e)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . Estribo con protección. EVI-EVII 206

**Figura VI.37:** Evolución de la distribución de velocidades longitudinales adimensionales,  $\frac{\langle u \rangle}{U_a}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales a)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; b)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; c)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; d)  $\frac{x}{L} = 2.0$ ; e)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . Estribo con protección. EVIII-EIX 207

**Figura VI.38:** Evolución de perfiles de velocidades longitudinales adimensionales,  $\frac{\langle u \rangle}{U_a}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales a)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; b)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; c)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; d)  $\frac{x}{L} = 2.0$ ; e)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . En todas las

secciones se consideraron perfiles de progresivas transversales  $\frac{y}{L} = 2.0$ ;  $\frac{y}{L} = 2.5$ ;  $\frac{y}{L} = 3.0$  y  $\frac{y}{L} = 3.5$ . Estribo con protección. Ensayos EVI-EVII-EVIII-EIX 208

**Figura VI.39:** Evolución de perfiles de velocidades longitudinales adimensionales,  $\frac{\langle u \rangle}{U_a}$ , en verticales localizadas en la sección  $\frac{x}{L} = 0.0$ . i)  $\frac{y}{L} = 1.5$ ; ii)  $\frac{y}{L} = 4.0$ . Ensayos EVI-EVII-EVIII-EIX 211

**Figura VI.40:** Evolución de la distribución de velocidades longitudinales adimensionales,  $\frac{\langle u \rangle}{U_a}$ , en la sección transversal de progresiva longitudinal  $\frac{x}{L} = 5.33$ . i) EVI. ii) EIX 212

**Figura VI.41:** Variaciones de las distribuciones verticales de: i) velocidades longitudinales,  $\frac{\langle u \rangle}{U_a}$ , ii) energía asociada a las fluctuaciones de velocidad,  $\frac{k}{U_{*a}^2}$ , iii) tensiones  $\frac{-\langle urw \rangle}{U_{*a}^2}$  y iv) tensiones  $\frac{-\langle urv \rangle}{U_{*a}^2}$ , para una vertical ubicada a continuación de la posición de la hoya de erosión. Sección d).  $\frac{y}{L} = 4.0$ . Ensayos EVI-EVII-EVIII-EIX 212

**Figura VI.42:** Evolución de la distribución de velocidades verticales adimensionales,  $\frac{\langle w \rangle}{U_a}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales a)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; b)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; c)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; d)  $\frac{x}{L} = 2.0$ ; e)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . Estribo con protección. EVI-EVII 215

**Figura VI.43:** Evolución de la distribución de velocidades verticales adimensionales,  $\frac{\langle w \rangle}{U_a}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales a)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; b)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; c)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; d)  $\frac{x}{L} = 2.0$ ; e)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . Estribo con protección. EVIII-EIX 216

**Figura VI.44:** Evolución de perfiles de velocidades verticales adimensionales,  $\frac{\langle w \rangle}{U_a}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales a)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; b)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; c)  $\frac{x}{L} = 1.33$ . Progresivas transversales  $\frac{y}{L} = 2.0$ ;  $\frac{y}{L} = 2.5$ ;  $\frac{y}{L} = 3.0$  y  $\frac{y}{L} = 3.5$ . Estribo con protección. Ensayos EVI-EVII-EVIII-EIX 217

**Figura VI.45:** Evolución de perfiles de velocidades longitudinales

adimensionales, $\frac{\langle w \rangle}{U_a}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales d)	
$\frac{x}{L} = 2.0$ y e) $\frac{x}{L} = 3.33$ . Progresivas transversales $\frac{y}{L} = 1.5$ ; $\frac{y}{L} = 2.0$ ; $\frac{y}{L} = 3.0$ y	
$\frac{y}{L} = 3.5$ . Estribo con protección. Ensayos EVI-EVII-EVIII-EIX	217
<b>Figura VI.46:</b> Vectores de velocidad promediados en la vertical. EVI	219
<b>Figura VI.47:</b> Vectores de velocidad promediados en la vertical. EVII	219
<b>Figura VI.48:</b> Vectores de velocidad promediados en la vertical. EVIII	220
<b>Figura VI.49:</b> Vectores de velocidad promediados en la vertical. EIX	220
<b>Figura VI.50:</b> Composición entre la velocidades helicoidales proyectadas en el plano “yz”, $v_{sy}$ , y la velocidad vertical, $\langle w \rangle$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales a) $x=-20\text{cm}$ ( $\frac{x}{L} = -0.67$ ); b) $x=0.0\text{cm}$ , ( $\frac{x}{L} = 0.0$ ); c) $x=40\text{cm}$ , ( $\frac{x}{L} = 1.33$ ); d) $x=60\text{cm}$ , ( $\frac{x}{L} = 2.0$ ); e) $x=100\text{cm}$ , ( $\frac{x}{L} = 3.33$ ). Estribo con protección. Ensayos EVI-EVII	222
<b>Figura VI.51:</b> Composición entre la velocidades helicoidales proyectadas en el plano “yz”, $v_{sy}$ , y la velocidad vertical, $\langle w \rangle$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales a) $x=-20\text{cm}$ ( $\frac{x}{L} = -0.67$ ); b) $x=0.0\text{cm}$ , ( $\frac{x}{L} = 0.0$ ); c) $x=40\text{cm}$ , ( $\frac{x}{L} = 1.33$ ); d) $x=60\text{cm}$ , ( $\frac{x}{L} = 2.0$ ); e) $x=100\text{cm}$ , ( $\frac{x}{L} = 3.33$ ). Estribo con protección. Ensayos EVIII-EIX	223
<b>Figura VI.52:</b> Evolución de la distribución de la energía de las fluctuaciones de velocidad adimensional, $\frac{k}{U_{*a}^2}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales a) $\frac{x}{L} = -0.67$ ; b) $\frac{x}{L} = 0.0$ ; c) $\frac{x}{L} = 1.33$ ; d) $\frac{x}{L} = 2.0$ ; e) $\frac{x}{L} = 3.33$ . Estribo con protección. EVI-EVII	225
<b>Figura VI.53:</b> Evolución de la distribución de la energía de las fluctuaciones de velocidad adimensional, $\frac{k}{U_{*a}^2}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales a) $\frac{x}{L} = -0.67$ ; b) $\frac{x}{L} = 0.0$ ; c) $\frac{x}{L} = 1.33$ ; d) $\frac{x}{L} = 2.0$ ; e) $\frac{x}{L} = 3.33$ . Estribo con protección. EVIII-EIX	226
<b>Figura VI.54:</b> Evolución de perfiles de energía asociada a las fluctuaciones de velocidad adimensional, $\frac{k}{U_{*a}^2}$ . Secciones transversales de progresivas	

longitudinales a)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; b)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; c)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; d)  $\frac{x}{L} = 2.0$ ;  $\frac{x}{L} = 3.33$ . En todas las secciones se consideraron perfiles de progresivas transversales  $\frac{y}{L} = 2.0$ ;  $\frac{y}{L} = 2.5$ ;  $\frac{y}{L} = 3.0$  y  $\frac{y}{L} = 3.5$ . Estribo con protección. Ensayos EVI-EVII-EVIII-EIX 227

**Figura VI.55:** Evolución de la distribución de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad,  $\frac{k}{U_{*a}^2}$ , en el perfil longitudinal correspondiente a  $\frac{y}{L} = 2.0$ . Ensayos i) EVI; ii) EVII; iii) EVIII; iv) EIX 232

**Figura VI.56:** Distribución de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad,  $\frac{k}{U_{*a}^2}$ , en la sección transversal correspondiente a  $\frac{x}{L} = 5.33$ . Ensayos i) EVI; ii) EIX 233

**Figura VI.57:** Distribución de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad,  $\frac{k}{U_{*a}^2}$ . i)  $\frac{x}{L} = 2.33$ ; ii)  $\frac{x}{L} = 2.67$ ; iii)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . EIX 233

**Figura VI.58:** Distribución transversal de la componente vertical de velocidad adimensional,  $\frac{\langle w \rangle}{U_a}$ . i)  $\frac{x}{L} = 2.33$ ; ii)  $\frac{x}{L} = 2.67$ ; iii)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . EIX 233

**Figura VI.59:** Vectores de velocidades en el plano yz,  $v_{yz}$ . Secciones transversales i)  $x=70\text{cm}$  ( $\frac{x}{L} = 2.33$ ); ii)  $x=80\text{cm}$  ( $\frac{x}{L} = 2.67$ ); iii)  $x=100\text{cm}$ , ( $\frac{x}{L} = 3.33$ ). EIX 234

**Figura VI.60:** Evolución de la distribución de las tensiones de Reynolds adimensionales,  $\frac{-\langle u'w' \rangle}{U_{*a}^2}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales longitudinales a)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; b)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; c)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; d)  $\frac{x}{L} = 2.0$ ; e)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . Estribo con protección. EVI-EVII 237

**Figura VI.61:** Evolución de la distribución de las tensiones de Reynolds adimensionales,  $\frac{-\langle u'w' \rangle}{U_{*a}^2}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales longitudinales a)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; b)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; c)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; d)  $\frac{x}{L} = 2.0$ ; e)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . Estribo con protección. EVIII-EIX 238

**Figura VI.62:** Evolución de perfiles de tensiones de Reynolds adimensionales,  $\frac{-\langle u'w' \rangle}{U_{*a}^2}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales a)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; b)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; c)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; d)  $\frac{x}{L} = 2.0$ ;  $\frac{x}{L} = 3.33$ . En todas las secciones se

consideraron perfiles de progresivas transversales  $\frac{y}{L} = 2.0$ ;  $\frac{y}{L} = 2.5$ ;  $\frac{y}{L} = 3.0$  y  $\frac{y}{L} = 3.5$ . Estribo con protección. Ensayos EVI-EVII-EVIII-EIX 239

**Figura VI.63:** Evolución de la distribución de las tensiones,  $\frac{-\langle uw \rangle}{U_{*a}^2}$ , en el perfil longitudinal correspondiente a  $\frac{y}{L} = 2.0$ . Ensayos i) EVI; ii) EVII; iii) EVIII; iv) EIX 240

**Figura VI.64:** Evolución de la distribución de las tensiones de Reynolds adimensionales,  $\frac{-\langle uvr \rangle}{U_{*a}^2}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales longitudinales a)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; b)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; c)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; d)  $\frac{x}{L} = 2.0$ ; e)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . Estribo con protección. EVI-EVII 243

**Figura VI.65:** Evolución de la distribución de las tensiones de Reynolds adimensionales,  $\frac{-\langle uvr \rangle}{U_{*a}^2}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales longitudinales a)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; b)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; c)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; d)  $\frac{x}{L} = 2.0$ ; e)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . Estribo con protección. EVIII-EIX 244

**Figura VI.66:** Evolución de perfiles de tensiones de Reynolds adimensionales,  $\frac{-\langle uvr \rangle}{U_{*a}^2}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales a)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; b)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; c)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; d)  $\frac{x}{L} = 2.0$ ;  $\frac{x}{L} = 3.33$ . En todas las secciones se consideraron perfiles de progresivas transversales  $\frac{y}{L} = 2.0$ ;  $\frac{y}{L} = 2.5$ ;  $\frac{y}{L} = 3.0$  y  $\frac{y}{L} = 3.5$ . Estribo con protección. Ensayos EVI-EVII-EVIII-EIX 245

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla II.1:</b> Resumen de las diferentes configuraciones representadas	42
<b>Tabla II.2:</b> Distancia respecto del fondo a la cual tienen lugar las zonas de interferencia acústica para el ADV Vectrino, en función del rango de velocidades	55
<b>Tabla II.3:</b> Frecuencia de muestreo máxima para ADV Vectrino con “Vectrino Plus” firmware	57
<b>Tabla II.4:</b> Coeficientes de variación, CV, en la determinación de los distintos parámetros turbulentos correspondientes a 6 minutos de medición. Flujo no perturbado por la presencia del estribo	66
<b>Tabla II.5:</b> Coordenadas de las localizaciones en las cuales se registraron señales de velocidad para evaluar métodos de detección, remoción y reemplazo de valores anómalos	88
<b>Tabla II.6:</b> Técnicas de filtrado y reemplazo de valores anómalos utilizadas en este estudio	90
<b>Tabla II.7:</b> Resumen de parámetros turbulentos evaluados a partir de las series de velocidades sin filtrar valores anómalos y filtradas y rellenadas con las combinaciones de métodos seleccionados ( $F1$ , $F2$ , $F3$ )	91
<b>Tabla II.8:</b> Diferencias relativas entre parámetros turbulentos estimados a partir de las series de velocidades sin filtrar y la misma serie a la que se le aplicó alguna de las combinaciones de métodos de filtrado y de reemplazo de valores anómalos	92
<b>Tabla III.1:</b> Velocidad media en la vertical ( $U$ ), velocidad de corte ( $U_*$ ), coeficiente de rugosidad superficial ( $k_s$ ), y Reynolds de corte $Re_*$ obtenidos a partir del ajuste a todos los perfiles de velocidad medidos y estadísticos de los parámetros estimados	103
<b>Tabla VI.1:</b> Efectos que afectan a las localizaciones en las que se realizaron mediciones continuas de velocidades	169

## RESUMEN

El desarrollo del presente trabajo tuvo por objeto caracterizar experimentalmente la evolución temporal de la interacción entre el flujo turbulento y los procesos de erosión en torno a un estribo de puente que cuenta con una protección flexible del lecho. Se realizó una serie de experiencias de laboratorio en un canal de sección rectangular, de 60 m de largo, 1.48 m de ancho y 1.00 m de profundidad. El canal posee un lecho erosionable, en donde se colocó un estribo prismático de 0.30 m de longitud, protegiendo el lecho cercano con una manta constituida por bloques adheridos a geotextil. Se utilizaron dos metodologías experimentales: a) caracterización continua de la evolución del lecho y del flujo turbulento en localizaciones definidas en torno al estribo y, b) medición detallada del campo 3D del flujo para cuatro configuraciones del lecho, correspondientes a diferentes tiempos de evolución del proceso erosivo. Para mantener inalterables las condiciones morfológicas durante la etapa de mediciones tridimensionales de velocidades del flujo asociada con cada configuración representada, se implementó una metodología de rigidización del lecho. A modo de contraste de los resultados obtenidos para el estribo de puente protegido se ensayó también, para las mismas condiciones hidráulicas, el estribo sin protección contemplando las situaciones de lecho inicial y con erosión próxima al equilibrio. La medición de velocidades se realizó optimizando dos técnicas experimentales que generan información complementaria: velocimetría por seguimiento de partículas a gran escala (LSPTV), utilizada para caracterizar la evolución temporal de las mayores escalas del campo de velocidades superficiales; y un velocímetro acústico Doppler (ADV) a partir del cual fue posible caracterizar la evolución temporal del campo 3D de velocidades del flujo con alta resolución temporal. En el trabajo experimental realizado se generó un conjunto de datos completo de velocidades del flujo y profundidades de erosión, los cuales además de proporcionar información fundamental para la validación de modelos numéricos, permitieron analizar las evoluciones de los campos bi y tridimensionales del flujo acorde se desarrolla el procesos de erosión. Así se identificaron patrones de flujo medio asociados con la morfología del lecho resultante y se verificó la interacción existente entre el comportamiento de los parámetros de la turbulencia (energía asociada a las fluctuaciones de velocidad y Tensiones de Reynolds) y el desarrollo de la erosión junto al estribo protegido, comparando con la situación de estribo sin protección tanto al inicio del proceso erosivo como durante el desarrollo espacio temporal de las erosiones.

## ABSTRACT

This work aims to experimentally study the temporal evolution of the interaction between turbulent flow and erosion processes around a bridge abutment, which has a flexible bed protection placed next to it. Therefore, a series of laboratory experiments was performed in a rectangular channel section, 60 m long, 1.48 m wide and 1.00 m deep. The channel has an erodible bed, where a prismatic abutment 0.30 m long is located, protecting the nearby channel bed with a blanket consisting of blocks attached to geotextile. Two experimental methodologies were used in this work: a) continuous characterization of the evolution of the bed erosion and turbulent flow in defined locations around the bridge abutment and, b) detailed measurement of 3D flow field for four different channel bed configurations, corresponding to different times of the evolution of the erosive process. To maintain unchanged the morphological conditions during the three-dimensional flow measurements associated with each channel bed configuration a bed rigidization has been implemented. In addition, the interaction between turbulent flow and erosion processes around an unprotected bridge abutment contemplating initial bed and erosion close to equilibrium is studied in order to contrast the results for the same hydraulic conditions.

Flow velocity measurements were performed using two velocimetry techniques, which provide complementary information: Large-scale particle tracking velocimetry (LSPTV) used to characterize the evolution of the largest surface flow velocity scales; and an acoustic Doppler velocimeter (ADV) from which it was possible to characterize the temporal evolution of 3D flow velocity field with high temporal resolution.

The experimental work presented here made it possible to have a detailed data set of flow velocities and depths of erosion from which the temporal evolution of two-dimensional and three-dimensional flow fields have been analyzed according the erosion develops. Mean flow patterns associated with the morphology of the resulting channel bed were identified. In addition, it was verified the interaction between the behavior of turbulence parameters (energy associated with flow velocity fluctuations and Reynolds stresses) and the development of erosion around a protected bridge abutment, drawing analogies and differences with the unprotected bridge abutment. The information generated constitutes an important contribution for the validation of numerical models.

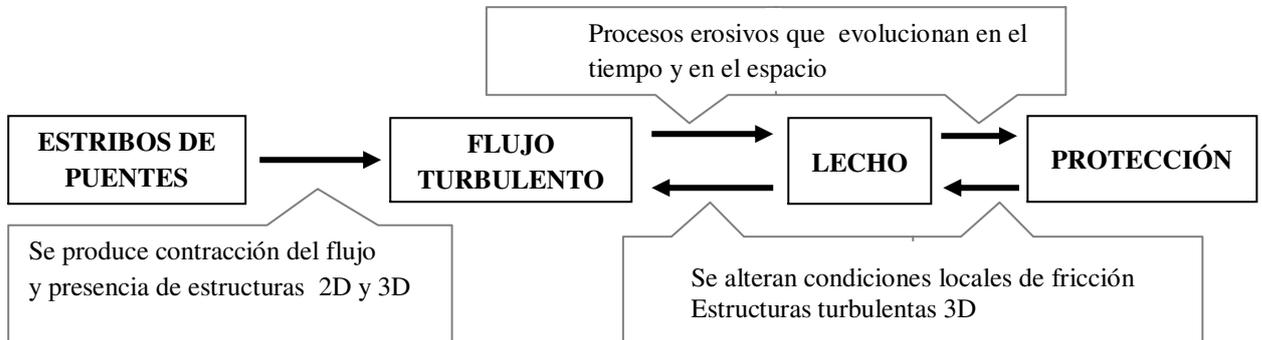
# Capítulo I: marco referencial del trabajo

## I.1 Introducción

La información provista por la literatura especializada reconoce que los mayores daños que experimentan las estructuras de los puentes ocurren durante el pasaje de las crecidas de los ríos. Si bien existen diversas razones, las estadísticas indican que entre un 60 % y un 80 % de las causas de destrucción parcial o total de los puentes están relacionadas con los procesos de erosión que directamente afectan a sus fundaciones (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 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 puentes. 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 bi y tri dimensionales que controlan la erosión y 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 flujo turbulento y el lecho deformable, el cual evoluciona con el desarrollo de las erosiones. Para mitigar posibles daños a las fundaciones es habitual colocar sistemas de protección que fijan el lecho en las inmediaciones del estribo. Se incorpora, de este modo, un elemento adicional que condiciona el proceso de interacción mencionado (Fig.I.1). Reynares et al. (2005), Cardoso y Fael (2009), Reynares (2009) sugieren que dichas protecciones en sí mismas se constituyen en elementos que tienen su propia influencia en los mecanismos determinantes de las erosiones.

La figura I.1 pone en evidencia la necesidad de caracterizar el flujo turbulento que interactúa con el estribo, sus protecciones y el lecho para poder comprender acabadamente los mecanismos de erosión junto a estribos protegidos.



**Figura I.1.-** Representación de la interacción estribo-flujo turbulento-lecho-protección

En consecuencia se plantea la siguiente hipótesis que es evaluada en esta tesis:

*Cuando el lecho junto a un estribo se recubre con mantas flexibles se desarrollan erosiones que están determinadas por procesos hidrodinámicos tridimensionales del flujo medio y de la turbulencia, específicos a la situación determinada por la presencia de la protección, que evolucionan en el tiempo. Estos procesos tienen su influencia directa sobre el inicio, desarrollo espacio temporal de las erosiones y la consecuente conformación final del lecho.*

A continuación se presenta una síntesis de la recopilación de antecedentes realizada en relación con este tema.

## I.2 Antecedentes

El estudio de los procesos de erosión en torno a estribos protegidos reconoce, entre otros, tres aspectos fundamentales en los que se enfocaron las diversas investigaciones realizadas previamente: 1) máxima profundidad de erosión junto al estribo sin protección, 2) sistemas

de protección contra la erosión local junto a estribos de puentes, 3) configuración del flujo en torno a estribos de puentes. A continuación se sintetiza la información recopilada con respecto a cada aspecto mencionado.

### **I.2.1 Máxima profundidad de erosión junto a estribos sin protección**

Se define como erosión local al proceso mediante el cual se remueve el material circundante a una obra emplazada sobre un lecho móvil sujeto a la acción de un flujo dado. Este fenómeno tiene su origen en la deflexión de las líneas de corriente, la turbulencia y los vórtices provocados por la presencia del obstáculo. En el caso particular de secciones de puentes este fenómeno involucra fundamentalmente a sus pilas y estribos.

Existen en la bibliografía gran cantidad de metodologías para evaluar la máxima profundidad de erosión esperable junto a un estribo, las que en su mayoría se sustentan sobre experiencias realizadas en canales de laboratorio.

Bajo esta concepción autores propusieron expresiones de cálculo de erosión en estribos a partir de conocimientos relacionados con los fenómenos de erosión por contracción o por pilas. Al respecto, se pueden mencionar los desarrollos de Laursen (1958), quien consideró a la erosión junto a un estribo como una situación particular de la que se verifica en un estrechamiento largo, para lo que consideró un cambio en las relaciones de transporte debido a la aceleración del flujo ante la presencia del estribo, o los conceptos de autores como Shen et al. (1966), Lemos (1975), Kwan (1984) y Melville (1992) que establecieron una analogía entre los mecanismos de erosión local en pilas y estribos.

El análisis dimensional resultó una herramienta de suma utilidad para el desarrollo de estudios de erosión en estribos. Se logró de este modo establecer los juegos de variables adimensionales a partir de los cuales se desarrollaron experimentos que permitieron ajustar diversas relaciones funcionales, tales como las propuestas por Liu et al. (1961), Cunha (1971), Kandasamy, (1989), Froehlich (1989), Dongol, (1994), Melville (1997), Kouchakzadeh y Townsend (1997), en las que pueden aparecer algunos de los siguientes parámetros adimensionales:

$$f_1 \left[ \frac{Z_e}{h_a}, \frac{Z_e}{L} \right] = f_2 \left[ \frac{U_e}{\sqrt{gh_e}}; \frac{U_a}{\sqrt{gh_a}}; \frac{B_a}{L}; K_G; \beta; K_S; \frac{U_{*a}}{U_{*c}}; \frac{h_a}{L}; \frac{L}{h_a}; \frac{L}{d_s}; \sigma_g; \frac{t}{t_o} \right] \quad (\text{I.1})$$

Donde:

$Z_e$ : erosión local junto al estribo

$L$ : longitud del estribo

$h_e$ : tirante del escurrimiento junto al estribo

$h_a$ : tirante del escurrimiento en la sección de aproximación aguas arriba

$U_e$ : velocidad media del escurrimiento junto al estribo

$U_a$ : velocidad media del escurrimiento en la sección de aproximación

$B_a$ : ancho de la sección de aproximación

$d_s$ : tamaño medio del material del lecho

$\sigma_g$ : desvío geométrico de la granulometría del material del lecho

$\beta$ : ángulo de inclinación del flujo principal respecto al estribo

$K_s$ : factor que tiene en cuenta la forma del estribo

$K_G$ : factor que tiene en cuenta la forma del canal

$U_{*a}$ : velocidad de corte del flujo de aproximación

$U_{*c}$ : velocidad de corte crítico del material del lecho

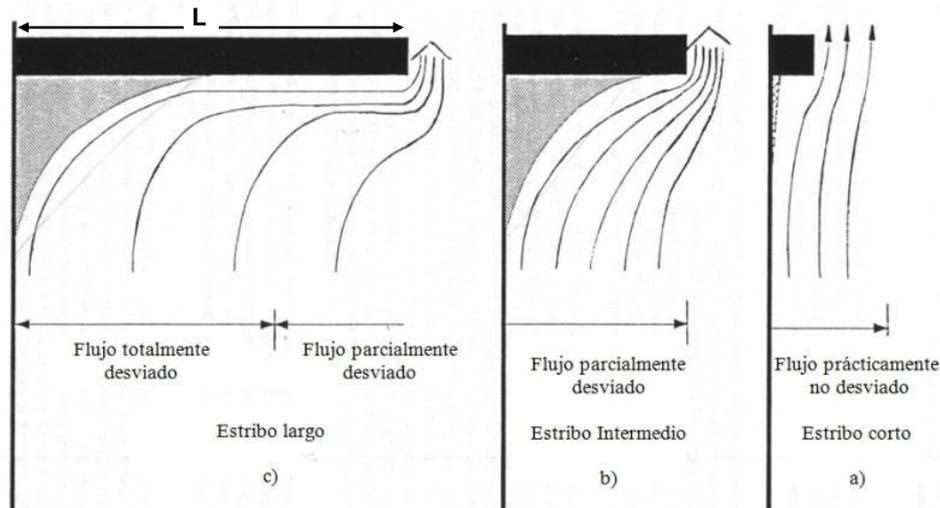
En (I.1) la profundidad de erosión " $Z_e$ " representa la variable dependiente, adimensionalizada con el tirante o con la longitud del estribo en función de la incidencia que este último parámetro tenga sobre el proceso erosivo (Melville, 1992). Los términos de la derecha consisten en un juego de parámetros adimensionales que involucran distintos efectos del escurrimiento, el contorno y el obstáculo sobre la profundidad de erosión. Así los grupos (2) incorporan el efecto del número de Froude del escurrimiento, el grupo (3) representa el efecto de la contracción del escurrimiento sobre la profundidad de erosión. Los grupos (4), (5) y (6) describen los efectos de la geometría del canal, la orientación del estribo respecto de la corriente y la forma del mismo. El grupo (7) tiene en cuenta la presencia o no de transporte de sedimentos en el escurrimiento de aproximación. Bajo condiciones de agua clara " $U_d/U_{ac}$ " resulta equivalente a " $U_{*d}/U_{*c}$ " por lo que se pueden usar ambas relaciones para expresar el efecto de la velocidad sobre la erosión local. En situaciones de transporte generalizado " $U_d/U_{ac}$ " es más usado debido a la dificultad para estimar " $U_{*d}/U_{*c}$ " cuando existen formas de fondo. Los grupos (8) y (9) describen la incidencia relativa de la profundidad del flujo y la longitud del estribo. Los grupos (10) y (11) representan el efecto dado por el tamaño y gradación del sedimento. Por último el grupo (12) refleja la dependencia con el tiempo, donde " $t_o$ " es un tiempo característico el

cual, se ha demostrado, depende de las propiedades del estribo, el escurrimiento y el sedimento (Melville y Coleman, 2000).

Otros estudios han propuesto metodologías de cálculo de la máxima profundidad de erosión junto a un estribo a partir de la consideración de conceptos básicos para el flujo y el sedimento, esto es: continuidad de la masa para el flujo y sedimento, geometría de la hoya de erosión, resistencia al flujo y una relación para la carga del material del lecho en canales aluviales (Lim, 1997 y Lim y Cheng, 1998), también verificadas experimentalmente.

La fase experimental fue, por lo tanto, un aspecto sustancial en los avances registrados. Sin embargo debe reconocerse que, más allá de las importantes contribuciones surgidas a partir de las tareas experimentales, algunos de los fenómenos involucrados no pudieron ser detectados por las limitaciones propias de los dispositivos de ensayos empleados. La incidencia de la longitud del estribo fue, sin lugar a dudas, uno de los aspectos pobremente descritos. Los aportes de la escuela neozelandesa; Wong (1982), Tey (1984), Kwan (1984,1988), Kandasamy (1985,1989) y Melville (1992) marcaron un cambio significativo en la concepción del problema según sea la longitud del estribo. En efecto, estos autores introducen los conceptos de estribos corto, intermedio y largo reflejando la diferente dependencia funcional de la erosión local junto a ellos ante una dada acción de la corriente. Kandazamy (1989) sugirió los siguientes límites para las tres situaciones de erosión antes planteadas (Fig. I.2):

- $\frac{L}{h} > 25$  ..... Estribos largos
- $1 < \frac{L}{h} < 25$  ..... Estribos intermedios
- $\frac{L}{h} < 1$  ..... Estribos cortos



**Figura I.2.-** Configuración del flujo desviado en función de la longitud del estribo (Kandazamy, 1989)

Estudios realizados en la década de los 90 propusieron métodos de cálculos en los cuales se considera como factor determinante de la erosión junto al estribo a la descarga obstruida por el estribo y su terraplén de aproximación. Las ecuaciones de Chang y Davis (Richardson y Davis 2001), la de Sturm (1999) y la de Richardson y Trivino (1999) son ejemplos de ello.

En Breusers y Raudkivi (1991), Melville y Coleman (2000), Richardson y Davis (2001), Maza Alvarez (2001), García (2008), Arneson et al. (2012), entre otros, se pueden encontrar las principales metodologías disponibles en la actualidad para el cálculo de erosión local junto a estribos de puentes.

### **I.2.2 Sistemas de protección contra la erosión local junto a estribos de puentes**

La necesidad de contrarrestar los procesos de erosión local que pueden tener lugar junto a los apoyos de los puentes ha motivado el desarrollo de diversos estudios focalizados en el diseño de medidas de protección que proporcionen condiciones de seguridad suficientes a las estructuras involucradas en los procesos de erosión.

Con el objeto de mitigar o prevenir la erosión local junto a pilas y estribos de puentes se citan en la literatura especializada diversas técnicas y dispositivos, los que en su mayoría pueden reunirse en dos grupos principales:

- a) Métodos directos o de acorazamiento: consisten en proteger el fondo contra la acción de la corriente mediante el empleo de algún tipo de revestimiento que sea capaz de resistir las altas velocidades y tensiones ejercidas por el flujo. Piedra partida suelta (rip-rap) (Fig. I.3), colchones de alambre rellenos con piedra, bloques de cemento adheridos a geotextil (también denominados mantas) (Fig. I.4), bloques interconectados, son algunos ejemplos que se pueden citar relacionados con estos dispositivos.
- b) Métodos indirectos: este enfoque considera el uso de dispositivos que promueven una modificación de la configuración del flujo incidente, atenuando su capacidad de remover sedimentos en las inmediaciones de la estructura. Entre ellos se pueden mencionar collares, pilas de sacrificio, muros guías, vanos sumergidos, etc.



**Figura I.3.-** Protección con enrocado. Estribo de margen izquierda del puente de la R.P. N° 4 (Río Salado). Santa Fe. Argentina



**Figura I.4.-** Protección con bloques de hormigón adheridos a geotextil. Aliviador Ruta Nacional 168. Santa Fe. Argentina

Entre las técnicas desarrolladas como medidas de protección local los métodos directos o de acorazamiento son los de mayor difusión en la práctica ingenieril. El diseño de revestimientos de este tipo involucra tres aspectos fundamentales: la coraza o capa de protección, el filtro y la extensión del revestimiento.

La coraza o capa protectora debe tener las dimensiones suficientes para resistir los esfuerzos actuantes sobre ella, y a su vez le debe dar la estabilidad necesaria al revestimiento. La capa de filtro es la encargada de retener los elementos del suelo, permitiendo que a través de ella circule el agua pero impida el pasaje del sedimento del

sector de margen o lecho que se desea proteger. Por último, a la protección hay que darle una extensión apropiada en planta de manera de resguardar eficientemente la zona afectada.

- Coraza protectora

La capa protectora “coraza” es diseñada para darle la estabilidad necesaria a la protección. En todos los casos el diseño de la coraza implica la definición del peso de los elementos de protección, con el cual resistirán a las fuerzas actuantes. En general este peso se traduce en una dimensión de diámetro o espesor, según se trate de rip-rap o de protecciones tipo “manta”, bajo la suposición de un peso específico conocido del material que la constituye.

En la bibliografía específica se puede encontrar una cantidad importante de publicaciones que definen criterios para el cálculo del espesor de la protección de modo tal que resista el ataque de la corriente. Resulta de importancia remarcar que la mayor parte de estos antecedentes se concentran en el diseño de enrocado, por lo que en general las expresiones estiman el tamaño mínimo que debería poseer el diámetro representativo del conjunto de elementos que compone el enrocado “Dr”.

A modo de ejemplo se presenta la expresión de Pilarczyk (1997), quien unificó diferentes fórmulas aplicables a distintos tipos de protecciones (rip-rap, bloques, mantas de bloques, colchonetas, gaviones, etc). La expresión determina el espesor nominal de la protección ( $D_n$ ),

$$D_n = \frac{1}{\Delta} \phi_r K_T \frac{0.035 K_h V_m^2}{\theta_{Cp} K_\alpha 2g} \quad (I.2)$$

Donde:

$\Delta$ : densidad relativa de la protección (en su conjunto)

$\phi_r$  : factor de estabilidad

$K_T$ : factor de turbulencia

$\theta_{Cp}$ : tensión de corte crítica adimensional de la protección

$K_\alpha$ : factor de pendiente del talud

$K_h$ : factor perfil de velocidades

$V_m$ : velocidad media en la vertical correspondiente al pie del talud

$g$ : aceleración de la gravedad

Los coeficientes involucrados en la expresión (I.2) varían en función del tipo de protección a utilizar. En Melville y Coleman, (2000) se presenta un resumen de valores apropiados para cuantificar la expresión.

- Filtro

Los filtros pueden ser granulares o de materiales sintéticos; ambos tipos son efectivos y poseen respuestas hidráulicas semejantes.

En la actualidad se ha generalizado el uso de geotextiles como filtros debido a sus amplias propiedades y funcionalidades, como también por su fácil colocación y bajo costo. Los geotextiles, como su nombre lo indica, son telas que se enrollan, cortan y cosen como cualquier textil, pero que están contruidos con fibras o filamentos derivados de polímeros. Las principales características de los geotextiles son la flexibilidad, durabilidad, permeabilidad, resistencia a la tracción y desgarramiento.

- Extensión del revestimiento

Existe un acuerdo general en la necesidad de colocar a la protección alrededor del estribo en una extensión  $W$ , cuya magnitud varía en función de la fórmula considerada.

Témez (1988) recomienda, para estribos ubicados en un cauce principal, un ancho de protección igual a 1.5 veces la máxima erosión local ( $Ze$ ), mientras que si el estribo se encuentra en el valle de inundación o en un cauce menor, esa extensión de puede reducir a una vez la erosión esperada. En este caso,  $W$  también dependería de la profundidad de colocación del rip-rap ( $d$ ), por lo que, en la medida que más profundo se coloquen las piedras, menor longitud  $W$  se necesita:

$$W = 1.5 (Ze - d) \quad (I.3)$$

Eve y Melville (2000) realizaron una serie de ensayos en un canal de laboratorio con un estribo ataludado protegido con rip-rap. En dichos experimentos, desarrollados en condiciones de agua clara, consideraron diferentes longitudes de estribos ( $L$ ) y anchos de protección ( $W$ ). Todas las configuraciones estudiadas correspondieron a estribos de longitud intermedia (Melville, 1992). Los resultados mostraron que la protección nunca falló cuando el ancho del rip-rap fue definido como dos veces el tirante, por lo que

consideraron este valor como suficiente. Los autores concluyeron que similares grados de protección pueden conseguirse variando la relación entre el tamaño de las piedras que componen el rip-rap y su ancho. Propusieron la siguiente expresión:

$$\frac{W}{h_a} = \left(0.5 - 1.82 \frac{D_{r50}}{h_a}\right) \left(\frac{180}{180 - (\theta_w - \phi_w)}\right) \left(\frac{B_a}{B_a - L}\right); \quad 0.1 < \frac{D_{r50}}{h_a} < 0.2 \quad (I.4)$$

donde:

$W$ : ancho de la protección al pie del estribo

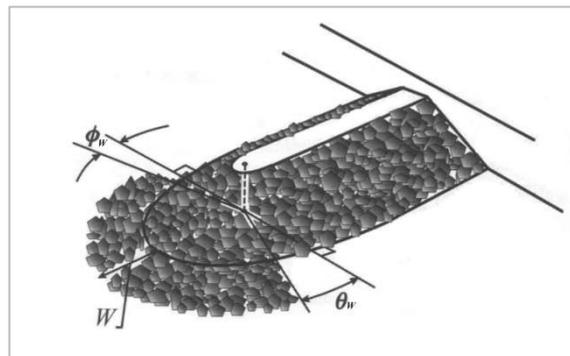
$h_a$ : profundidad del agua

$D_{r50}$ : diámetro medio del rip-rap

$\theta_w$  y  $\phi_w$ : son definidos en la figura I.5

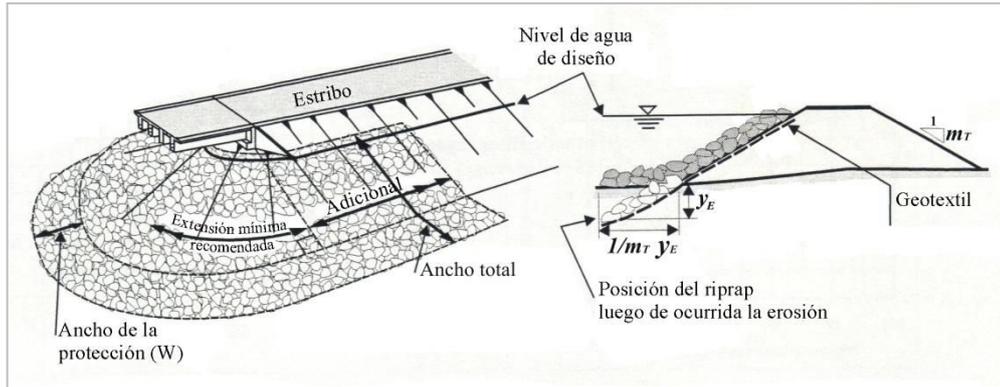
$B_a$ : ancho del canal

$L$ : longitud del estribo



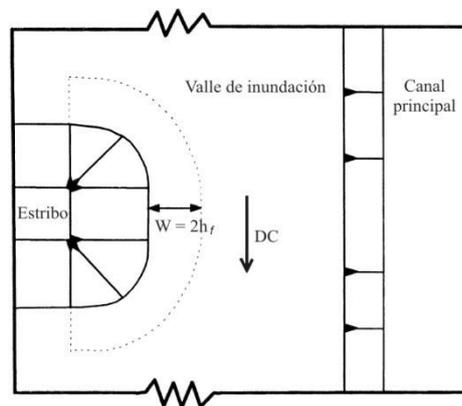
**Figura I.5.-** Detalle de la extensión de la protección según Eve y Melville (2000)

Melville y Coleman (2000) proponen una extensión al pie del estribo igual “ $m_T$ ” veces la erosión esperada sin protección, donde “ $m_T$ ” es la pendiente del talud que conforma el estribo ataludado (Fig. I.6)



**Figura I.6-** Recomendaciones de Melville y Coleman (2000) para protecciones de rip-rap en estribos ataludados

Lagasse et al. (2001) propusieron, para el caso de estribos ataludados ubicados sobre la llanura de inundación y lo suficientemente alejado del canal principal, extender el rip-rap dos veces el tirante del valle “ $h_f$ ” (Fig. I.7).



**Figura I.7-** Ancho “W” recomendado por Lagasse et al. (2001) para rip-rap en estribos

Melville et al. (2006a) llevaron a cabo un estudio experimental donde ensayaron protecciones constituidas por rip-rap y por bloques de concreto unidos con cables (CTB) en estribos ataludados intermedios, situados en valles de inundación de secciones compuestas. Los autores propusieron una expresión mediante la cual se obtiene la extensión del delantal en función de la erosión ( $Z_e$ ), evaluando la estabilidad del material de relleno del estribo. La fórmula presentada fue:

$$\frac{W}{h_f} = C_1 \left( \frac{Z_e}{h_f} \right)^{C_2} \quad (I.5)$$

donde:

$W$ : es el ancho de la protección.

$Z_e$ : la profundidad de erosión.

$h_f$ : la profundidad del escurrimiento en el valle.

$C_1$  y  $C_2$ : son coeficientes que dependen del tipo de protección.

Una continuación de este trabajo fue presentado por Morales et al. (2008), quienes incorporaron una serie adicional de experimentos. Los resultados alcanzados demostraron que el diseño recomendado por Lagasse et al. (2001) resultó adecuado.

Cardoso y Fael (2009) estudiaron el diseño de mantos de rip-rap en torno a estribos de pared vertical bajo condiciones de agua clara. Los experimentos se realizaron en un canal de sección rectangular con distintas longitudes de estribos y configuraciones de rip-rap. Los autores sugirieron una nueva ecuación para la evaluación de la extensión  $W$ , que depende de la relación entre la longitud del estribo y la profundidad del flujo:

$$\frac{W}{h_a} > \frac{1}{2} \left( \frac{L}{h_a} \right)^{3/5} \quad L/h_a < 9.42 \quad (I.6)$$

### Erosión en presencia de protecciones

Sobre la base de las dimensiones de la protección definidas como seguras, los resultados experimentales disponibles indican que la presencia de protecciones del lecho, si bien inhiben el desarrollo de erosiones inmediatamente junto al estribo, éstas no resultan eliminadas por completo, sino que las mismas tienen lugar a una cierta distancia desde el estribo.

En efecto, Melville et al. (2006a) señalan que las protecciones del tipo acorazamiento no reducen la máxima profundidad de erosión local, sino que desvía el desarrollo la hoya lo suficientemente lejos del pie de estribo como para evitar su daño. Concluyeron que las mantas de CTB generan hoyas más cercanas al estribo y más profundas que las que se obtienen con el empleo de rip-rap.

Melville et al. (2006b) realizaron una serie de experiencias de laboratorio en las que representaron estribos cortos e intermedios, con frente de pared vertical y márgenes ataludadas (Wing-wall), protegidos con rip-rap y con CTB. Trabajaron bajo condición de lecho móvil y las secciones de escurrimiento consideradas fueron rectangulares y compuestas. Parte del estudio se enfocó en analizar la influencia del pasaje de las formas de fondo en la estabilidad de la protección. Nuevamente concluyeron que en los casos en que se ensayaron protecciones conformadas con rip-rap las hoyas se desarrollan más alejadas del estribo que cuando se consideraron protecciones de CTB.

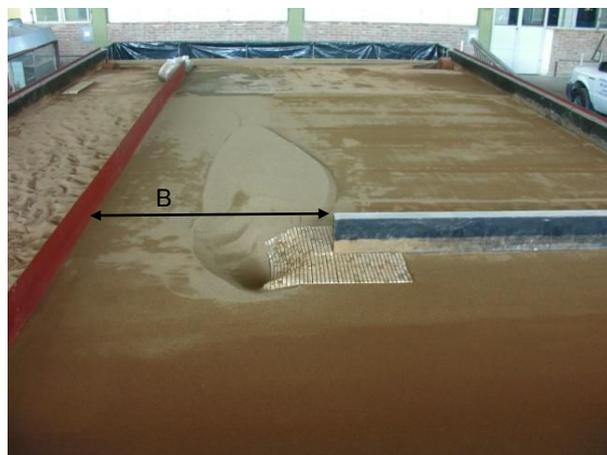
Morales et al. (2008), sobre la base de experimentos de gran escala, evaluaron distintos ancho de protección ( $W$ ) en estribos ataludados, cortos y/o intermedios. Plantearon que al colocar un delantal de rip-rap junto al estribo se altera su forma, lo cual influye en las erosiones resultantes, particularmente su localización y máxima profundidad alcanzada. Informan que cuando el ancho de la protección fue mayor a la profundidad de erosión ( $Z_e$ , situación no protegida), la hoya se alejó del estribo pero no se redujo en profundidad. Las máximas erosiones se redujeron en aquellas oportunidades donde  $W$  superó los 1.5 veces el tirante medio del flujo ( $h_a$ ). Se destaca que las socavaciones junto a la protección estuvieron siempre presentes, aún para los anchos  $W$  más grandes.

Cardoso y Fael (2009) señalan que ante la presencia de mantas protectoras el lecho se profundiza aguas abajo del estribo, a una distancia que se incrementa con el aumento en las dimensiones de la protección.

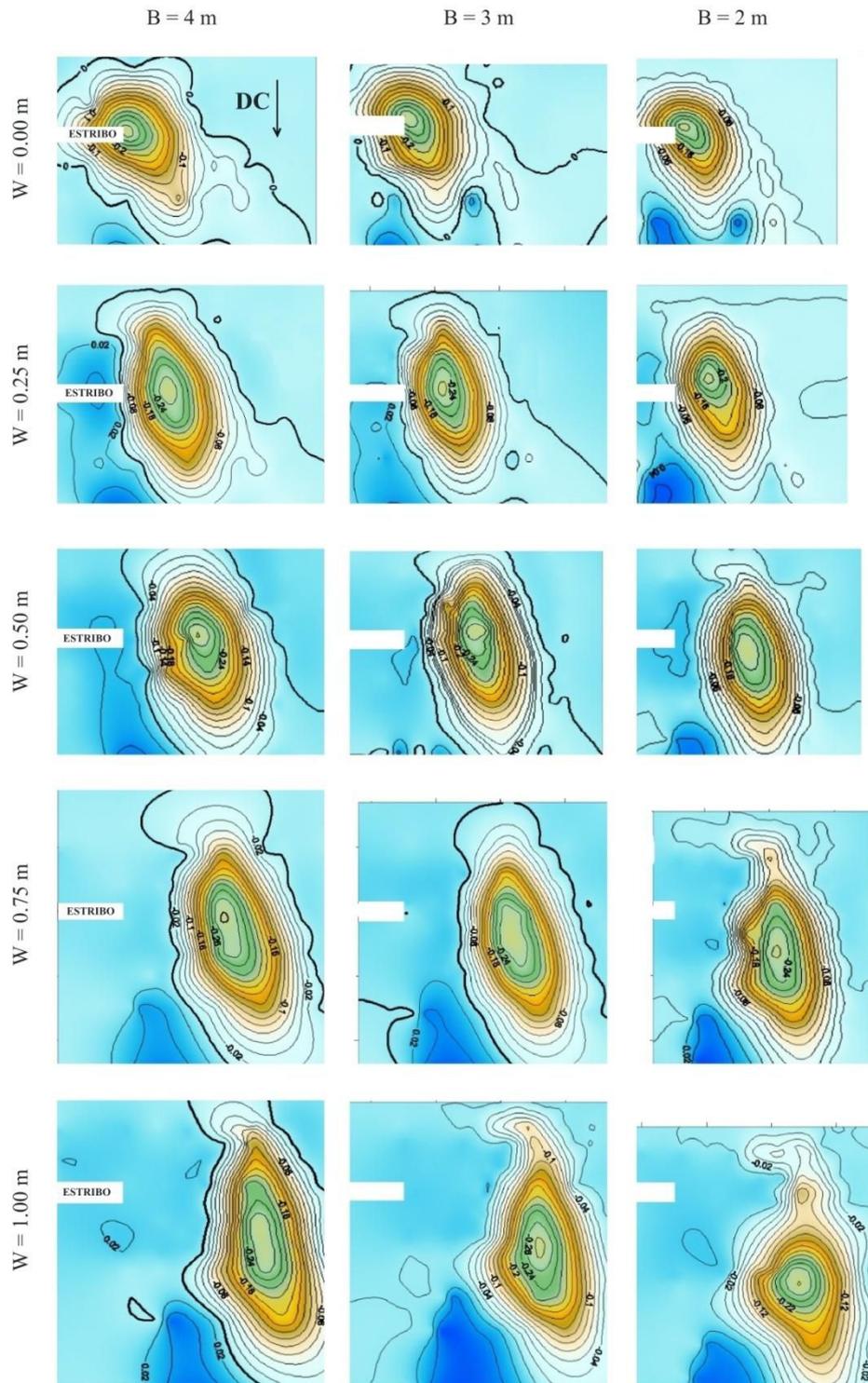
Estas evidencias, en gran medida recopiladas en experimentos de laboratorio en los que se ensayaron protecciones de rip-rap, tienen su correlato con los resultados encontrados cuando se experimentaron protecciones junto al estribo constituidas por bloques de hormigón adheridos a geotextil.

Reynares (2009), Reynares et al. (2010), Piguini, et al. (2014) y Reynares et al. (2014) analizaron de manera experimental la incidencia que la presencia de una protección flexible colocada junto a un estribo de pared vertical largo tiene, tanto sobre las máximas profundidades de erosión como sobre la geometría de las hoyas de socavación

desarrolladas. Las experimentaciones fueron realizadas en un canal de grandes dimensiones, capaz de representar de forma adecuada las particulares condiciones del flujo en las inmediaciones de un puente aliviador (Fig. I.8). La protección del lecho estuvo conformada por bloques de concreto adheridos a geotextil. Se consideraron diversos tamaños y disposiciones de la protección en torno al estribo y diferentes anchos del escurrimiento en la sección del puente (B), manteniendo constante la geometría del estribo (L) y las condiciones hidráulicas junto al mismo (velocidad y tirante). Los resultados alcanzados muestran que las profundidades máximas de erosión obtenidas para distintos anchos de protección fueron semejantes y muy próximas al valor encontrado para el caso de estribo sin protección. El sector erosionado se desplazó de manera proporcional al ancho de la protección, desarrollándose en el extremo lateral de la misma y, en consecuencia, afectando zonas antes no comprometidas por los procesos erosivos. Como un aspecto particular se destaca que cuando se aumentó la longitud de la protección las hoyas de erosión aumentaron su longitud en mayor medida que su ancho, generando fosas más elongadas respecto de la relevada en la situación de referencia, esto es, cuando la protección no estaba presente. Algunos de estos resultados se representan en la figura I.9, la cual fue tomada de Reynares (2009), en la que se muestra la respuesta experimentada por la topografía del lecho; cada columna reproduce los resultados correspondientes a un dado ancho de escurrimiento (B) con anchos de protección (W) variables; cada fila indica la respuesta de las erosiones ante el cambio en el ancho de escurrimiento manteniendo constante W.



**Figura I.8.-** Dispositivos experimentales empleados en Reynares (2009), Reynares et al. (2010), Piguini, et al. (2014) y Reynares et al. (2014). Ancho de escurrimiento en la sección contraída, B=2 m

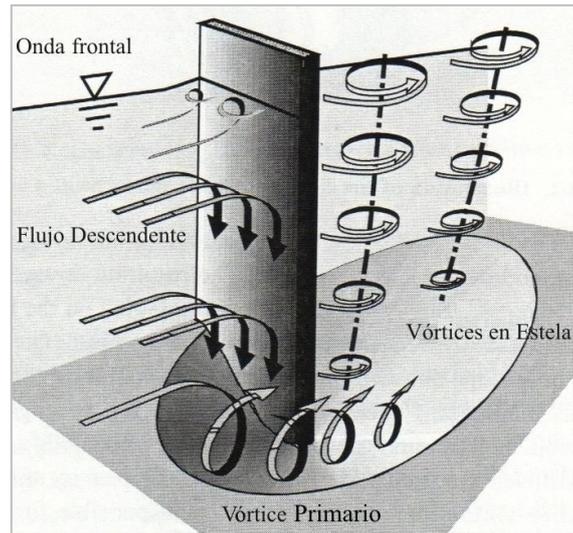


**Figura I.9.-** Topografía de lecho resultante de variar el ancho de una protección flexible ( $W$ ) y el ancho de la sección de escurrimiento ( $B$ ), manteniendo constante la longitud del estribo ( $L$ ) y las condiciones hidráulicas junto al mismo (velocidad y tirante). Tomada de Reynares (2009)

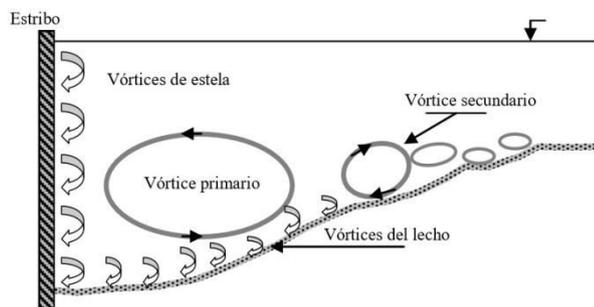
### **I.2.3 Configuración del flujo en torno a estribos de puentes**

La estructura del flujo comprometida en el proceso de erosión junto a un estribo es sumamente compleja. Kwan y Melville (1994) usaron la técnica de burbujas de hidrógeno para caracterizar las componentes del flujo junto a un estribo corto de paredes ataludadas. Melville (1997) basado en los experimentos realizados previamente (Kwan y Melville, 1994) identificó a los siguientes patrones del flujo intervinientes en el proceso de erosión junto a un estribo de puente (Fig.I.10): 1) un flujo descendente inducido por el gradiente de presiones de estancamiento que se genera delante del estribo (proporcional al cuadrado de la velocidad del flujo de aproximación) a raíz de que las menores presiones se producen en las cercanías del fondo; 2) un vórtice primario, formado por la combinación del flujo descendente con el de aproximación, cuya forma es aproximadamente elíptica, y su eje principal paralelo a la superficie del lecho erosionado (Fig. I.11). Tanto el flujo descendente como el vórtice principal fueron considerados los principales agentes erosivos, 3) un vórtice secundario, inducido por la presencia del vórtice primario, con sentido de rotación contrario y acción erosiva más débil, 4) vórtices de estela, formados por la separación del flujo en el borde del estribo, dando lugar a capas de corte inestables que se enrollan. Estos vórtices, de eje vertical, se desprenden periódicamente de la superficie de separación y son trasladados aguas abajo por el flujo medio. Su participación en el proceso erosivo es de menor importancia que la de los componentes mencionados anteriormente.

La fosa de erosión primaria se localiza en la región inmediatamente próxima al estribo, mientras que a continuación de ésta se ubica la porción secundaria (Fig. I.11).



**Figura I.10.-** Configuración del flujo en torno a un estribo de puente (Tomado de Melville y Coleman, 2000)



**Figura I.11.-** Disposición del vórtice primario (Kwan, 1988)

Una descripción general del flujo junto al estribo como la proporcionada por Melville (1977), aunque breve y cualitativa, ilustra claramente la gran complejidad de tales flujos (Chrisohoides et al. 2003).

Aunque se han utilizado diferentes enfoques y metodologías (métodos experimentales, numéricos, etc.) para describir el flujo turbulento asociado con los procesos de erosión junto a estribos de puentes, se considera necesario seguir trabajando para lograr una resolución adecuada acorde a la dificultad que presenta (Chrisohoides et al. 2003; Teruzzi et al. 2009). Chrisohoides et al. (2003) destacan la necesidad de realizar investigaciones que permitan caracterizar el flujo turbulento, describiendo la estructura de los vórtices

inducidos por las fundaciones, y clarificar su verdadero rol en los procesos de erosión localizada.

Entre los estudios experimentales relacionados a la configuración del flujo alrededor de estribos de puentes sin protección se pueden citar: Rajaratnam y Nwachukwu (1983), Kwan y Melville (1994), Molinas et al. (1998), Ahmed y Rajaratnam (2000), Chrisohoides et al. (2003), Scacchi (2003), Carrasco y Vionnet (2004), Dey y Barbhuiya (2005, 2006a, 2006b), Reynares (2009), Duan, J.G. (2009).

Rajaratnam y Nwachukwu (1983) investigaron la distribución de tensiones de corte en torno a un espigón ubicados *sobre un lecho plano no protegido* a partir de mediciones experimentales usando un tubo de Preston y un Pitot 3D. Consideraron relaciones de obstrucción de 0.08 y 0.16 y números de Froude entre 0.17 a 0.29. Sus experimentos indicaron que la tensión de corte en el borde aguas arriba del estribo se amplifica hasta 5 veces respecto de la del flujo de aproximación.

Molinas et al. (1998) realizaron experiencias con estribos cortos de pared vertical, *sobre lecho plano sin protección* para números de Froude del escurrimiento entre 0.3 y 0.9 y relaciones de contracción de 0.1; 0.2 y 0.3. Midieron velocidades del escurrimiento y tensiones de corte en las proximidades del extremo del estribo. Estos investigadores encontraron tensiones de corte y velocidades medias, próximas al estribo, amplificadas hasta 10 y 1.5 veces respectivamente, con respecto a los correspondientes valores del flujo de aproximación.

Chrisohoides et al. (2003) emplearon técnicas basadas en fotografías digitales a través de las cuales se promediaron imágenes instantáneas sobre una ventana de tamaño finito, con el fin de visualizar la estructura de remolinos coherentes junto a un estribo de puente sobre *un lecho plano no protegido*, de modo tal de lograr caracterizarla cualitativamente.

Scacchi (2003) demostró que las máximas erosiones locales junto a estribos de puentes aliviadores *no protegidos, caracterizados como largos*, dependen tanto de las condiciones iniciales del escurrimiento junto a él, como del proceso de redistribución de caudales

producto de su desarrollo. Para ello se analizaron mediciones de velocidades adquiridas con ADV sólo en la sección de emplazamiento del estribo, al inicio y final del proceso erosivo. Se consideraron en este estudio valores medios temporales de velocidades en la dirección longitudinal.

Carrasco y Vionnet (2004) presentaron resultados derivados de mediciones 3 D realizadas con velocímetro ADV en un canal de grandes dimensiones, en el que se representó un *estribo largo, sin protección, con una hoya de erosión local junto al mismo*, con el fondo rígido. No se contempló la situación inicial previa al desarrollo de las erosiones. En este estudio se analizó la evolución de la respuesta espectral de un flujo poco profundo de gran ancho, representativo de las condiciones hidráulicas en puentes aliviadores ubicados en un valle de inundación. Estos autores encuentran que los efectos forzados introducidos al flujo por la fuerte contracción lateral (forzamiento geométrico) y por la presencia de la hoya de erosión (forzamiento topográfico) dan lugar a un espectro de energía con dos picos bien diferenciados, asociando las estructuras turbulentas bidimensionales a las escalas grandes y las estructuras turbulentas tridimensionales a las escalas pequeñas.

Dey y Barbhuiya (2005, 2006a, 2006b) realizaron mediciones del campo 3D del flujo alrededor de estribos de sección rectangular y trapezoidal *sin protección del lecho, al comienzo del proceso y en una situación próxima al equilibrio de la fosas de erosión local*. Utilizaron para ello un velocímetro acústico Doppler (ADV). Se presentaron distribuciones verticales de las componentes de velocidad promediadas en el tiempo, intensidad de la turbulencia y tensiones de Reynolds. En estos estudios las mediciones solo fueron obtenidas en pocos planos acimutales, involucrando el sector del flujo muy próximo al estribo. La evolución del flujo medio y la turbulencia una vez superado el emplazamiento del estribo, hacia aguas abajo no fue estudiado. A partir de los resultados obtenidos aguas arriba del estribo estos autores remarcan la existencia del vórtice primario asociado con el flujo descendente dentro de la hoya de erosión. En la dirección aguas abajo señalan la presencia de un flujo caótico como consecuencia del desprendimiento de vórtices.

Duan, J.G. (2009) estudió el campo del flujo en las inmediaciones de un muro, con una relación de contracción de 1/3, emplazado sobre un *lecho plano fijo, sin protección*. Para

ello realizó mediciones con un velocímetro ADV, con un tiempo de medición de 1 minuto por punto, en una grilla que involucró secciones transversales tanto aguas arriba como aguas abajo del muro considerado, en una franja de ancho 2.25L (L: longitud del muro). Se evaluaron velocidades medias, tensiones de Reynolds e intensidad de la turbulencia, para esa condición, y se analizó su posible implicancia en el transporte de sedimentos. Se presenta como resultado el hecho que las máximas tensiones de corte del lecho en las inmediaciones del muro, estimadas a partir de las tensiones de Reynolds, son aproximadamente 3 veces más grande que la tensión de corte del flujo de aproximación. Las tensiones normales, la energía cinética turbulenta y las componentes longitudinales de las tensiones de Reynolds alcanzan un máximo aproximadamente en el centro de la estela dentro de cada sección transversal.

Morales et al. (2008) midieron *velocidades del flujo en la superficie libre* (LSPIV) con el fin de calibrar un modelo numérico 2-D que describe el flujo alrededor de un *estribo* con paredes laterales inclinadas, *protegido con un collar de rip-rap*.

Reynares (2009), quien amplió el trabajo de Scacchi (2003), investigó la incidencia que la extensión de una protección flexible colocada junto a un *estribo largo* tiene sobre el valor máximo de erosión local y sobre la geometría de las hoyas de socavación resultantes. En el marco de este trabajo analizaron *velocidades medio temporales, en la dirección longitudinal*, a partir del registro de velocidades recolectadas con ADV en la sección de emplazamiento del estribo, para *una condición de erosión próxima al equilibrio*.

En los últimos años se han realizado diversas simulaciones numéricas del campo tridimensional del flujo asociado con las erosiones junto a estribos de puentes.

Molinas y Hafez (2000) desarrollaron un modelo hidrodinámico bi-dimensional para determinar el campo del flujo alrededor de un estribo de pared vertical, *sobre un lecho plano sin protección*. El modelo resuelve las ecuaciones de Navier Stokes promediadas en el sentido de Reynolds usando el método de elementos finitos. Con este modelo se estudió el efecto que tiene la rugosidad del canal sobre el campo del flujo en torno al estribo.

Chrisohoides et al. (2003) analizaron cualitativamente el campo del flujo en la vecindad de un *estribo sobre lecho plano sin protección*, para lo que resolvieron las ecuaciones impermanentes de Navier Stokes promediadas según Reynolds (URANS). Como modelo de cierre utilizaron las dos ecuaciones “k-w” (k es la energía cinética turbulenta y w es tasa de disipación de esa energía por unidad de energía cinética). Estos autores caracterizaron al campo de flujo como altamente 3-D, con inestabilidades de gran escala. Consideraron además que la región de recirculación inmediatamente aguas arriba del estribo es extremadamente compleja, dominada por múltiples vórtices, con ejes perpendiculares y paralelos al lecho y paquetes con altos niveles de energía cinética, contrariamente a lo establecido por Melville y Coleman (2000). El vórtice principal pareciera estar alimentado por el fluido de esta región, por lo que la misma tiene un impacto directo sobre el proceso de erosión. Aguas abajo del estribo describieron un flujo caótico, producto de la región de separación, la cual se extiende varias longitudes de estribo hacia aguas abajo.

Koken y Constantinescu (2008) emplearon un código de simulación de grandes vórtices (LES) para representar el campo del flujo entorno a un *muro vertical inserto en un canal recto con lecho plano y sin protección* (número de Reynolds del canal relativamente pequeño, esto es  $Re=18000$ ). Se utilizaron resultados derivados de mediciones del campo superficial de velocidades realizadas con LSPIV para contrastar la configuración de las líneas de corrientes medias superficiales. Se investigó la evolución temporal (siempre con lecho plano) y espacial del sistema de vórtices en herradura (HV) en la base del muro. Entre los principales resultados se mencionan que la coherencia, la estructura, la posición y la forma del principal vórtice tipo collar del HV son altamente variables en el tiempo. El efecto global del sistema HV es inducir localmente altos valores de energía cinética turbulenta y fluctuaciones de presión. Se encontró que el vórtice principal tipo collar oscila de un modo caótico entre dos estados, uno en el cual el vórtice se mantiene cerca del muro y otro en el cual un chorro cerca del lecho lo aleja del borde del muro hacia aguas arriba. Con respecto a la distribución de tensiones de corte se muestra que los valores más grandes se dan en la región de fuerte aceleración junto al borde del muro, pero también identificaron altas tensiones de corte por debajo del vórtice collar principal y por debajo de la parte aguas arriba de la capa de corte, región en la cual se encontraron muy altas fluctuaciones en torno al valor medio.

Teruzzi et al. (2009) implementaron un modelo de simulación de grandes vórtices (LES) para analizar el campo del flujo en torno a un estribo de sección trapezoidal, *sobre lecho plano, sin protección* (número de Reynolds del escurrimiento de 7000). Los autores pusieron particular hincapié en el análisis de las tensiones de corte del lecho. Los resultados de la simulación demostraron que la tensión media en la superficie del fondo se incrementa alrededor del obstáculo, con respecto al flujo de aproximación, por más de un orden de magnitud. El valor pico se localiza dentro de una región muy pequeña, alrededor del borde aguas arriba del estribo. Estos autores destacaron también los grandes niveles de fluctuación de la tensión de corte, las que varían significativamente respecto al valor medio.

Koken y Constantinescu (2011) realizaron simulaciones del flujo en torno a un muro de pared vertical ubicado en un canal con el *lecho erosionado con una condición próxima al equilibrio, sin presencia de protección*. Como el número de Reynolds correspondiente a las condiciones del flujo simulada ( $Re=240000$ ) es mayor al utilizado en estudios anteriores emplearon un modelo híbrido entre las ecuaciones de Navier Stokes promediadas en el sentido de Reynolds y simulación de grandes vórtices, RANS-LES, denominado DES por sus siglas en inglés (detached eddy simulation). Se analiza el rol de la turbulencia de gran escala durante los estados finales del proceso de erosión. Entre los resultados principales se mencionan que dentro de la hoya de erosión también se verifican las oscilaciones de gran escala del núcleo del vórtice de collar principal, atribuyéndole a esta situación la causa de la amplificación de la turbulencia dentro de la región del HV. Se señala que las distribuciones de tensiones de corte del lecho en el campo del flujo instantáneo muestran disposiciones en “rayas” en la región del flujo ubicada por debajo de la parte aguas abajo de la capa de corte desprendida desde el estribo. Esas rayas son inducidas por la convección de vórtices aproximadamente horizontales dentro de la capa de corte, primero contra el talud de la hoya de erosión y luego sobre la zona de acumulación de sedimentos.

Koken (2011) y Koken y Gogus (2015) utilizaron el mismo código DES para simular el campo del flujo entorno a diques con diferentes ángulos de inclinación y longitudes para una condición de lecho plano y números de Reynolds de 45000.

Koken y Constantinescu (2014) realizaron simulaciones numéricas del campo del flujo entorno a un estribo de paredes inclinadas con el mismo código que el utilizado en Koken y Constantinescu (2011). El estudio consideró tres situaciones de lecho: lecho plano, lecho con la erosión local junto al estribo (tomada de experiencias de laboratorio, Morales et al. 2008) y el lecho con la erosión desarrollada cuando se colocó en torno al estribo un delantal de rip-rap de ancho constante (Morales et al. 2008). No se evaluaron situaciones intermedias en el proceso de erosión en ninguno de los casos contemplados. En el trabajo se discute sobre el efecto de la turbulencia de gran escala (sistema de vórtice en herradura, desprendimiento de vórtices en la capa separada, formación de vórtices en la región de recirculación) en la captación y transporte de sedimento. Entre los principales resultados destacan que se encontraron diferencias respecto de la situación de estribo de pared vertical, en relación con la formación, dinámica y posición de las estructuras coherentes de gran escala alrededor del estribo. Para la situación de lecho plano encontraron que el vórtice de collar principal se localiza a una distancia aproximada de 1.5 veces el tirante del flujo de aproximación. Relacionan la forma del estribo con el decaimiento más rápido de las amplitudes de las oscilaciones bimodales, para el caso de erosión sin protección. Sugieren que para el caso de estructuras protegidas por rip-rap las erosiones comenzarán en donde las fuertes aceleraciones del flujo y/o estructuras coherentes con elevada energía entren en contacto con la región del flujo no protegida por el rip-rap. En este caso la hoya de erosión se sitúa lejos del costado del estribo.

### I.3 Motivación científica

El análisis de los estudios presentados en la sección anterior permitió identificar las siguientes áreas de vacancia, las que constituyen la motivación científica de esta Tesis:

- ✓ Los estudios experimentales detallados del campo 3-D del flujo en torno a estribos de puentes cuya descripción incluyen parámetros de la turbulencia (flujo medio, energía cinética de las fluctuaciones, esfuerzos de Reynolds), en una extensión que abarque tanto aguas arriba como aguas abajo del estribo, **en su mayoría consideran una condición de lecho plano y sin protección**. Esta configuración no permite analizar la interacción entre los procesos turbulentos, las erosiones del lecho y las medidas de protección.

- ✓ Los estudios experimentales que describen el campo del flujo para una condición específica de **erosión, sin presencia de protección del lecho, se limitaron a las inmediaciones del estribo**, a partir de los cuales es posible analizar la interacción entre el flujo turbulento y el lecho erosionado (sin protección) y en una extensión espacial limitada.
- ✓ Son escasos los estudios experimentales del campo del flujo entorno a un estribo protegido. Estudios disponibles, en los que se ensayaron **protecciones con rip-rap**, solo consideran el análisis del campo de velocidades superficiales en un área limitada a las proximidades del estribo.
- ✓ Existen diversos estudios numéricos detallados del campo 3-D del flujo en torno a estribos de puentes cuya descripción incluye parámetros de la turbulencia (flujo medio, energía cinética de las fluctuaciones, esfuerzos de Reynolds) en una extensión que ocupa tanto aguas arriba como aguas abajo del estribo. Algunos de estos estudios consideran condición **de lecho plano y otros una condición de erosión local próxima al equilibrio, pero en su mayoría no contemplan protección del lecho junto al estribo**. No permiten analizar la interacción entre el flujo turbulento, la evolución de la erosión y la presencia de protección del lecho.
- ✓ Son limitados los estudios numéricos relacionados con el campo 3-D del flujo en torno a estribos de puentes protegidos. Se cita un trabajo en el que se considera una **protección conformada por rip-rap** y realizado con un desarrollo de erosión próximo al equilibrio. **Puesto que no se contemplan estados intermedios**, no es posible evaluar la evolución temporal del flujo turbulento durante el proceso erosivo.
- ✓ Las **simulaciones numéricas** realizadas para caracterizar el comportamiento del flujo turbulento en torno a estribos de puentes protegidos cuentan con muy pocas validaciones experimentales, las que mayoritariamente corresponden a mediciones de velocidades superficiales o medias en la vertical, adquiridas en situación de lecho plano.

La complejidad de la estructura del flujo responsable del fenómeno de erosión entorno a estribos de puentes impone la conveniencia de realizar estudios integrales que permitan evaluar la evolución temporal del campo del flujo durante el proceso erosivo desde la situación inicial, más aún si se incorpora como elemento adicional la presencia de

protección del lecho junto al estribo, particularmente cuando ésta está conformada con mantas flexibles.

Con el desarrollo de esta Tesis se realiza un estudio experimental detallado que al tiempo que aporta al conocimiento de la evolución temporal de los procesos físicos involucrados en la erosión y el flujo turbulento presentes junto a estribos protegidos con mantas flexibles, se constituye en información fundamental para la validación de modelos numéricos.

## **I.4 Objetivos**

**I.4.1 Objetivo general:** Caracterizar experimentalmente el inicio y la evolución temporal de los procesos de erosión e hidrodinámicos en las inmediaciones de un estribo de puente protegido mediante mantas flexibles, con el fin de evaluar la interacción entre estos procesos y compararla con la situación de estribo sin protección.

### **I.4.2 Objetivos específicos**

- ✓ Desarrollar una metodología experimental óptima que permita caracterizar la evolución temporal de los procesos de erosión e hidrodinámicos que tienen lugar en las inmediaciones de un estribo de puente protegido mediante mantas flexibles.
- ✓ Describir la evolución temporal del proceso de erosión en torno a un estribo protegido con mantas flexibles, contrastando la misma con la que tiene lugar junto al estribo sin protección.
- ✓ Evaluar las modificaciones que sufre el campo bidimensional del flujo en las inmediaciones del estribo protegido con el desarrollo de las erosiones. Establecer analogías y diferencias con la situación de estribo no protegido.
- ✓ Evaluar las modificaciones que sufre el campo tridimensional del flujo en las inmediaciones del estribo protegido con el desarrollo de las erosiones. Establecer analogías y diferencias con la situación de estribo no protegido.

## **I.5 Organización de la Tesis**

En el Capítulo II y el Capítulo III de la presente Tesis se presentan los principales aspectos contemplados para optimizar la metodología experimental utilizada en este estudio, primer objetivo específico de esta Tesis.

En el Capítulo IV se analiza la evolución temporal del proceso de erosión en torno a un estribo rectangular protegido con mantas flexibles, contrastando la misma con la del estribo sin protección, cumplimentando de esta forma lo requerido por el segundo objetivo específico.

Finalmente en los Capítulos V y VI se detallan los estudios relacionados a los dos últimos objetivos específicos. En el Capítulo V se describe la caracterización bidimensional de la evolución del campo del flujo con el desarrollo de las erosiones y en el Capítulo VI se realiza un análisis de la evolución del flujo turbulento en localizaciones definidas y un análisis de la evolución del campo tridimensional del flujo involucrado en el proceso de erosión contemplado.

Las principales conclusiones de todos los capítulos y de la Tesis se presentan en el Capítulo VII.

## Capítulo II: metodología

### II.1 Instalaciones experimentales

#### II.1.1 Canal y circuito hidráulico

El canal utilizado para las tareas experimentales pertenece a la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) de la Universidad Nacional del Litoral (UNL, Santa Fe, Argentina) y se encuentra ubicado en la Nave II de su Laboratorio de Hidráulica. Tiene 60 m de largo y una sección transversal rectangular de 1.48 m de ancho por 1.00 m de profundidad, con un fondo horizontal, sin posibilidad de variar su pendiente (Fig. II.1).

Este canal está conectado a un circuito hidráulico cerrado. El agua utilizada para las experiencias se almacena en una cisterna cubierta, cuyo volumen es 180 m<sup>3</sup>. Dos bombas de 29.83kW cada una, con una capacidad total de bombeo de 200 l/s, proveen el caudal de agua requerido para los experimentos.

La alimentación al canal se realiza a través de una cañería de 0.25 m, que posee una válvula esclusa mediante la cual se logra una primera aproximación al caudal de ensayo. El ajuste fino de ese caudal se efectúa mediante un “by pass” constituido por una cañería de 0.05m con su correspondiente válvula esclusa. La cañería de 0.25m descarga en una cuba de cabecera, provista de disipadores de energía y aquietadores superficiales, en cuyo extremo se encuentra un vertedero de pared delgada, con escotadura triangular a 90°, en el que se realiza la medición de los caudales líquidos.

La carga de agua con respecto al vértice del vertedero se mide en un tubo piezométrico, en donde se encuentra alojado un limnómetro de punta, con vástago de 0.50 m de carrera y provisto de un vernier cuya resolución es 0.1 mm. La descarga de agua del vertedero ingresa al canal atravesando una serie de paredes, que obligan al escurrimiento a pasar alternadamente por la parte superior e inferior de esas paredes. Los sectores de paso están constituidos por ladrillos huecos. De este modo se consigue un ingreso uniforme, con niveles adecuados de turbulencia de la masa de agua en el canal propiamente dicho.

El canal posee 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 se conformó, en una extensión de 24 m, un lecho de arena uniforme con un espesor de 0.40 m y un desarrollo transversal coincidente con el ancho del canal. La parte superior de las paredes posee un sistema de rieles de acero de sección rectangular construidos para permitir el movimiento longitudinal de un carro porta-instrumental apoyado sobre ruedas acanaladas acorde a la sección de los rieles, (Fig. II.2), desde el cual se realizaron los relevamientos de los distintos parámetros de interés.

A los 15.70 m de iniciado el tramo con fondo móvil se colocó, junto a la margen izquierda, un estribo prismático construido con paredes de vidrio que obstruye a la totalidad del tirante hidráulico.

En el extremo de aguas abajo del canal, mediante una compuerta rebatible, se fijó el tirante de agua elegido para los ensayos. Antes de esa compuerta, se dispuso una trampa de sedimentos, con el fin de retener el material sólido desalojado en las inmediaciones del estribo y arrastrado por la corriente.

Una vez atravesado el canal, el agua vuelve a la cisterna de almacenamiento a través de un sistema de canales de retorno, cerrando de este modo el circuito hidráulico.

El instrumental utilizado se fijó a un dispositivo porta instrumental adosado al carro, el cual posee movimiento en la dirección transversal y vertical, (y,z). Mediante el movimiento combinado del carro, con desplazamiento longitudinal, y el del dispositivo se consigue el posicionamiento en planta y vertical de los diferentes puntos de medición.

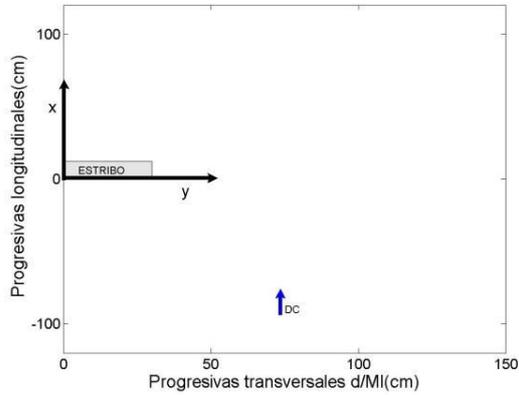


**Figura II.1.-** Vista canal de ensayos

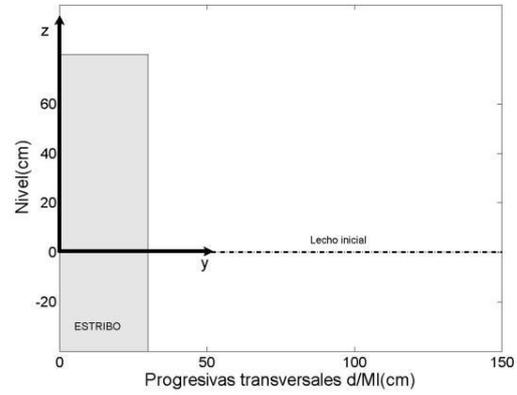


**Figura II.2.-** Carro porta-instrumental

En Fig. II.3 se ha representado el sistema de ejes coordenados en planta ( $x, y$ ), con su correspondiente origen, adoptados en todas las mediciones. El eje vertical  $z$  se ha considerado positivo en la dirección ascendente, correspondiéndole al cero el nivel del lecho original horizontal (Fig. II.4).



**Figura II.3.-** Sistema de ejes coordenados “xy”



**Figura II.4.-** Sistema de ejes coordenados “yz”

### II.1.2 Material del lecho

El lecho se conformó con arena uniforme de 1 mm de diámetro medio. Este tamaño se adoptó a fin de asegurar la ausencia de formas de fondo, tanto en el sector contraído del flujo, como en las hojas de erosión propiamente dichas. Es conocido (Simons et al., 1964, entre otros) que con diámetros de sedimentos menores a 0.4-0.7 mm no es posible la formación de rizos. Estas formas de fondo hubieran implicado una imprecisión adicional en el relevamiento de las fosas de socavación local, situación que no se consideró conveniente a los fines del estudio.

Las características principales del sedimento empleado se detallan a continuación:

- Peso específico,  $\gamma_s$  : 2650 kg/m<sup>3</sup>.
- Diámetro medio,  $d_s$ : 1 mm
- Desvío estándar geométrico,  $\sigma_g$ : 1.3
- Velocidad de corte crítica para inicio del movimiento  $U_{*c}$ : 0.023 m/s

Los valores de “ $U_{*c}$ ” se calcularon mediante la expresión “ $U_{*c} = (\tau_c / \rho)^{0.5}$ ”, donde  $\tau_c$  es la

tensión de corte crítica para inicio del movimiento obtenida a partir del diagrama de Shields (Vanoni, 1975).

### II.1.3 Protección del lecho

Como sistema de protección de lecho junto al estribo (Fig. II.5) se utilizaron mantas flexibles conformadas por bloques de concreto adheridos a geotextil. Estos dispositivos se seleccionaron tratando de asegurar el cumplimiento de los siguientes requisitos: integridad en todo momento (no poseen componentes metálicos o degradables), buena flexibilidad, permeabilidad y colocación rápida y sencilla.

Las protecciones utilizadas fueron suministradas por una empresa que se dedica al diseño y construcción de revestimientos flexibles.

Los bloques que componen las mantas tienen sus lados de 0.026 metros y un espesor de 0.012 m. Los prismas se encuentran separados entre sí una distancia media de 0.003 m (Fig. II.6).

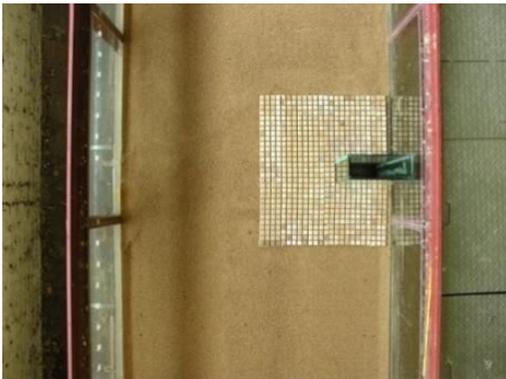


Figura II.5.- Vista canal-estribo-protección



Figura II.6.- Detalle de la protección

## II.2 Técnicas y metodologías de medición

La secuencia de experimentos realizados contempló, fundamentalmente, la medición de velocidades del escurrimiento, niveles del agua y niveles del lecho para cada una de las configuraciones representadas.

## II.2.1 Medición de velocidades del escurrimiento

### II.2.1.1 Velocimetría Acústica Doppler (ADV)

Los velocímetros acústicos Doppler (ADV) son capaces de medir con precisión valores medios de la velocidad del flujo en tres direcciones, aún cuando se trate de flujos con velocidades muy bajas (Lohrmann et al. 1994, López y García, 2001). Su empleo para caracterizar la turbulencia en flujos requiere la consideración de ciertos aspectos en las etapas de preparación del experimento, de medición y de análisis de las señales registradas de velocidad del escurrimiento (Goring y Nikora 2002, García et al. 2005, Gil Montero et al. 2014).

En el marco de la presente investigación se utilizó un ADV Vectrino-Nortek de 10 MHz de frecuencia acústica perteneciente a la FICH-UNL (Fig. II.7). Este instrumento emplea el efecto Doppler de pulso coherente para medir la velocidad del escurrimiento, esto es, el ADV transmite dos pulsos cortos de sonido y mide el cambio de fase en la señal de retorno de los dos pulsos coherentes. El sonido es reflejado por las partículas suspendidas, las cuales se consideran que se mueven con la misma velocidad del agua.

#### Principio de operación

Los ADV miden las tres componentes del vector velocidad usando la técnica del pulso coherente. Está constituido por un emisor de sonido, cuatro receptores de sonido y un módulo electrónico de acondicionamiento de la señal. El instrumento emite un par de pulsos de duración  $\Delta t$ , separados un intervalo de tiempo  $\Delta T$  con ( $\Delta T \gg \Delta t$ ), y mide el cambio de fase entre las señales reflejadas. Si la velocidad del agua en la dirección de uno de los receptores es  $v_b$ , las partículas que se encuentran suspendidas en el agua viajarán en esa dirección una distancia  $v_b \Delta T$ , durante un intervalo  $\Delta T$ , por lo que la diferencia en el tiempo de desplazamiento entre dos pulsos reflejados es  $\frac{2 v_b \Delta T}{c}$ , donde  $c$  es la velocidad del sonido en el agua. De este modo la diferencia de fase  $\Delta \varphi$  entre los dos pulsos es:

$$\Delta \varphi = 2\pi f_0 \left( \frac{2v_b \Delta T}{c} \right) \quad (\text{II.1})$$

Donde  $f_0$  es la frecuencia acústica del ADV (10 MHz para el Vectrino ADV). El instrumento mide esta diferencia de fase para determinar la velocidad del agua en la

dirección del receptor como:

$$v_b = \frac{c\Delta\phi}{4\pi f_0\Delta T} = \frac{\lambda\Delta\phi}{4\pi\Delta T} \quad (\text{II.2})$$

Donde  $\lambda=c/f_0$  es la longitud de onda.

Cada par emisor/receptor define un eje biestático (Fig. II.7) de modo tal que lo que el instrumento determina es la proyección de la velocidad del agua sobre dicho eje. Los receptores están alineados de modo tal que se interceptan formando un volumen de muestreo común. La velocidad medida a partir del corrimiento de fase observado por cada receptor se refiere como velocidad biestática. Como los receptores están inclinados  $30^\circ$  respecto al eje del emisor, estos miden la proyección de la velocidad sobre una dirección inclinada aproximadamente  $15^\circ$  respecto a la del transmisor. Las velocidades medidas según la dirección de los ejes biestáticos son convertidas al sistema de ejes cartesianos  $x, y, z$  mediante un módulo de procesamiento interno, el cual utiliza una matriz de calibración que es determinada por el fabricante durante las etapas de construcción y calibración del instrumento. El reporte de las velocidades medidas puede ser en la dirección biestática o en el sistema de coordenadas  $x, y, z$ .

El volumen de medición se encuentra, para el modelo de ADV Vectrino utilizado, a 5 cm respecto del emisor, estando los cuatro receptores orientados hacia dicha localización. Presenta una forma cilíndrica, con su eje principal coincidente con el del emisor. Su diámetro  $\phi$  está determinado por el del transductor emisor, mientras que su altura,  $h_v$ , queda definida por la convolución entre la longitud del pulso acústico y la ventana de recepción sobre la cual se muestrea la señal de retorno.

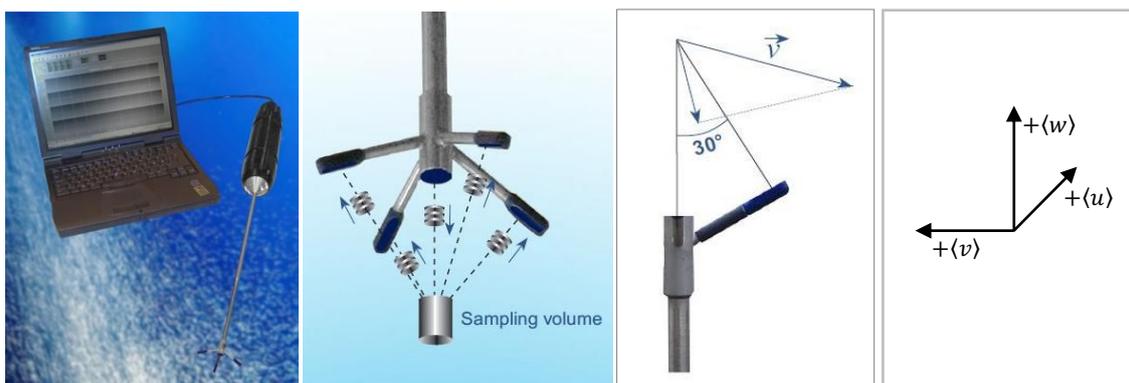


Figura II.7.- ADV Vectrino

A continuación se presentan las principales características del ADV utilizado:

*Resolución temporal*

- ✓ Frecuencia de registro: 1–200 Hz
- ✓ Frecuencia interna de medición: 200–5000 Hz

*Resolución espacial (Volumen de muestreo)*

- ✓ Distancia desde el emisor: 0.05 m
- ✓ Diámetro: 6 mm
- ✓ Altura: (Seleccionable por el usuario): 3–15 mm

*Pulso acústico*

- ✓ Frecuencia acústica: 10 MHz
- ✓ Resolución: 0.45 dB
- ✓ Rango dinámico: 60 dB

*Configuraciones de registro:*

- ✓ Rango de velocidades: <0.01 m/s, < 0.10 m/s, <0.30 m/s, <1.00 m/s, <2.00 m/s, < 4.00 m/s (seleccionable a través del software)
- ✓ Precisión en la medición de velocidad:  $\pm 0.5\%$  del valor medido  $\pm 1$  mm/s

*Sensor de temperatura (Adicionado a la probeta)*

- ✓ Temperatura Rango:  $-4$  °C a  $40$ °C.
- ✓ Precisión/Resolución:  $1$  °C /  $0.1$ °C.
- ✓ Tiempo de respuesta: 5 min

En la figura II.7 se muestra el sistema de coordenados utilizado por el ADV Vectrino para informar cada una de las componentes de las velocidades medidas. En el marco del presente estudio a la componente transversal,  $\langle v \rangle$  se le ha cambiado el sentido de modo tal que su valor positivo (+) coincida con el eje y (+) mostrado en las figuras II.3 y II.4.

### II.2.1.2 Velocimetría por seguimiento de partículas a gran escala (LSPTV)

Dado que con el uso de los velocímetros acústicos Doppler (ADV) es posible registrar valores de velocidad en un pequeño volumen de medición, en este caso localizado a una cierta distancia del sensor (5cm), la zona medida del flujo está limitada. En efecto, cuando se utiliza la configuración vertical del instrumento, no se puede caracterizar el movimiento de la masa de fluido más próxima a la superficie libre.

Debido a ello, en este estudio se implementó una técnica de medición de velocidades complementaria a la velocimetría Doppler, de modo tal de poder incorporar al análisis de los procesos investigados la zona superior del flujo. Se recurrió para ese fin a la técnica de velocimetría por seguimiento de partículas a gran escala (LSPTV) (por sus siglas en inglés). El sistema LSPTV utiliza un marco de referencia Lagrangiano. Permite caracterizar el campo de velocidades superficiales basándose en la determinación del desplazamiento de partículas trazadoras identificadas en la superficie libre y rastreadas individualmente (Cenedese y Querzoli, 1997). Con este objetivo se utilizan imágenes adquiridas con una cámara digital a intervalos regulares de tiempo (en un video). La localización de cada partícula en dos imágenes consecutivas permite determinar su desplazamiento el que, conocido el tiempo entre imágenes, da por resultado el vector instantáneo de velocidad bidimensional, en el plano superficial, para cada una de las partículas identificadas. Esta técnica de medición presenta las ventajas de su fácil implementación, buena resolución espacial en planta, reducido tiempo de medición y moderada resolución temporal. Su buen desempeño para determinar el campo superficial de velocidades del flujo entorno a un estribo en canal de laboratorio fue demostrado en Scacchi et al (2009). Con esta técnica se caracterizan los campos de velocidades superficiales no medidos con ADV y a partir de ellos se determinan los campos medios de vorticidad.

Con respecto a las partículas trazadoras a sembrar en el flujo se deben tener en cuenta tres aspectos:

- 1) el diámetro: definido por la posición de la cámara y su resolución. La oblicuidad de la cámara provoca que las partículas más cercanas se visualicen más grandes que las más lejanas, por lo que es necesario conseguir cierta homogeneidad, obteniendo proyecciones de partículas cuyos diámetros quedan en el mismo rango de pixeles sobre las imágenes.

2) el color: se elige el color de las partículas de forma tal que se maximice el contraste con el fondo (teniendo en cuenta que el procesamiento utiliza imágenes con escala de grises).

3) la densidad: las partículas deben tener una densidad levemente inferior a la del agua para que posean una flotabilidad positiva. La mayor parte de cada partícula debe estar sumergida para garantizar el arrastre por el flujo de agua.

Patalano et al (2013) señalan que la metodología experimental recomendada para la implementación de la técnica LSPTV convencional, requiere tres etapas: iluminación, registro y procesamiento de imágenes digitales. Si la iluminación de la zona de medición es controlable, es preferible eliminar todas las fuentes de luz directa que se puedan reflejar sobre la superficie del agua, las cuales generan errores durante el procesamiento de las imágenes.

## **II.2.2 Medición del nivel de la superficie libre del agua**

Las mediciones de los niveles de la superficie libre del flujo se hicieron mediante el empleo de un limnómetro provisto de punta y vernier, con un recorrido de 0.5 m. El vernier posee una resolución de 0.1 mm, pero imprecisiones visuales e inexactitudes en la alineación proporcionan incertidumbres del orden de +/- 1 mm.

## **II.2.3 Medición de niveles del lecho**

Los niveles del lecho se midieron en distintas localizaciones utilizando alguna de las siguientes metodologías:

- Reglas: tres escalas graduadas adosadas junto a la pared de aguas arriba del estribo. Una colocada en su extremo junto a la pared del canal, otra aproximadamente en el medio y la restante en el otro extremo, hacia el interior del canal, sector donde tienen lugar las máximas profundidades de erosión. Con ellas se midió la evolución del lecho en esos lugares (Fig. II.8).
- ADV Vectrino: el velocímetro acústico Doppler, ADV Vectrino brinda, además de los valores de velocidad del flujo, la distancia desde el emisor del pulso acústico al lecho,

por lo que se puede, no sólo localizar el punto en el que se mide la velocidad, sino también conocer la posición del lecho. De este modo fue posible evaluar la evolución del fondo con el tiempo en determinadas localizaciones de interés (Fig. II.9).

→ Distanciómetro láser: para cada una de los estados de erosión intermedios considerados se realizó una detallada medición de los niveles del lecho, con el canal drenado, mediante el empleo de un distanciómetro marca Leica DISTO A5 (Fig II.10). Este instrumento posee una precisión de 1mm y una memoria capaz de almacenar hasta 20 valores. Sus dimensiones son 148 x 64 x 36 mm.



**Figura II.8.-** Reglas adosadas a las paredes del estribo



**Figura II.9.-** Medición de profundidades con ADV Vectrino



**Figura II.10.-** Distanciómetro láser

### II.3 Diseño experimental

La rápida evolución que caracteriza a los fenómenos de erosión local, sobre todo en los momentos iniciales del proceso, y el extenso tiempo requerido para realizar mediciones de velocidad determinaron la conveniencia de establecer el campo de velocidades en el estado inicial previo al desarrollo de erosiones y en diferentes estados de evolución del proceso erosivo, convenientemente fijados. Para ello se implementó una metodología de rigidización del lecho, de modo tal de mantener inalterables las condiciones morfológicas durante la etapa de medición de velocidades, asociada con cada estado representado.

Las diferentes configuraciones del lecho representadas, correspondientes a etapas intermedias en el desarrollo del proceso, se obtuvieron con la siguiente metodología:

- 1) se da comienzo al ensayo a partir de la condición inicial de lecho plano;
- 2) luego de transcurrido un determinado intervalo de tiempo, compatible con el estado que se quiere analizar, se interrumpe el ensayo;
- 3) se drena el canal de ensayos;
- 4) se rigidiza el fondo mediante el cernido de una muy delgada capa de cemento, en un área que abarque a la hoya de erosión y que además incluya aquellos sectores comprometidos con el proceso que se quiere estudiar (Fig. II.11);
- 5) se inicia nuevamente el ensayo con el lecho rígido y la hoya de erosión conformada e inalterable, situación que resultó indispensable para poder realizar las mediciones de velocidades asociadas a tal estado, tarea que de acuerdo a la gran densidad de puntos de medición considerados demandó varios días.

Este proceso de rigidización también se implementó para poder medir el campo del flujo asociado a las condiciones iniciales, previas al desarrollo de las erosiones.

La definición de las condiciones hidráulicas, esto es caudal,  $Q$ , y tirante  $h$ , longitud del estribo,  $L$ , y dimensiones de la manta de protección empleada que se muestran a continuación surgió de una serie de experimentos preliminares en los que se buscó la combinación adecuada de dichas variables, de modo tal de disminuir los efectos de pared en el canal de ensayos, al tiempo que se buscó que el sector del lecho erosionado no alcance a la pared del canal opuesta al estribo.

Caudal,  $Q = 83 \text{ l/s}$

Tirante flujo no perturbado,  $h_a = 19.1 \text{ cm}$

Longitud del estribo,  $L = 30 \text{ cm}$

Altura del estribo,  $h_{ESTRIBO} = 80 \text{ cm}$

Espesor del estribo,  $E = 12 \text{ cm}$

Ancho de la protección,  $W = 40 \text{ cm}$

Estas dimensiones se presentan en la Figura II.12

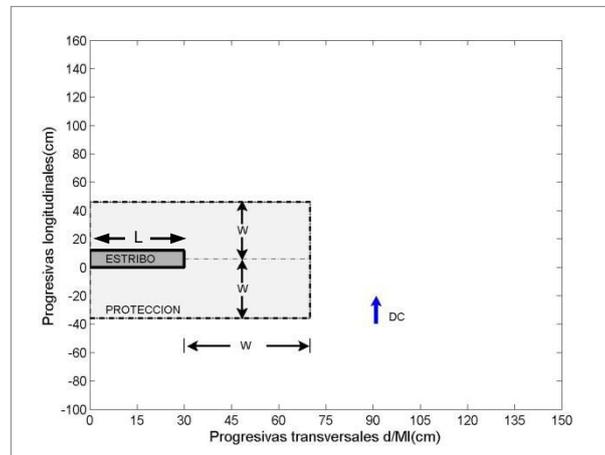


a)



b)

**Figura II.11.-** Técnica de rigidización; a) implementación de la técnica en EIII; b) Conformación lecho EVI



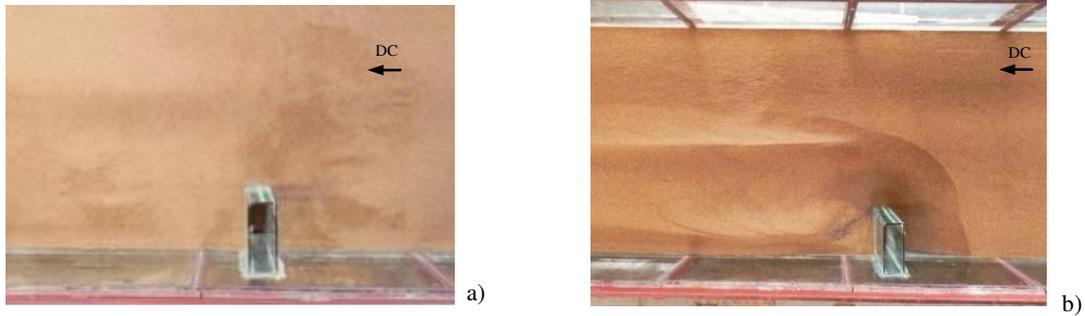
**Figura II.12.-** Representación de las dimensiones del estribo y protección utilizados

## II.4 Ensayos realizados

A continuación se describen las diferentes configuraciones del lecho representadas en cada uno de los ensayos realizados:

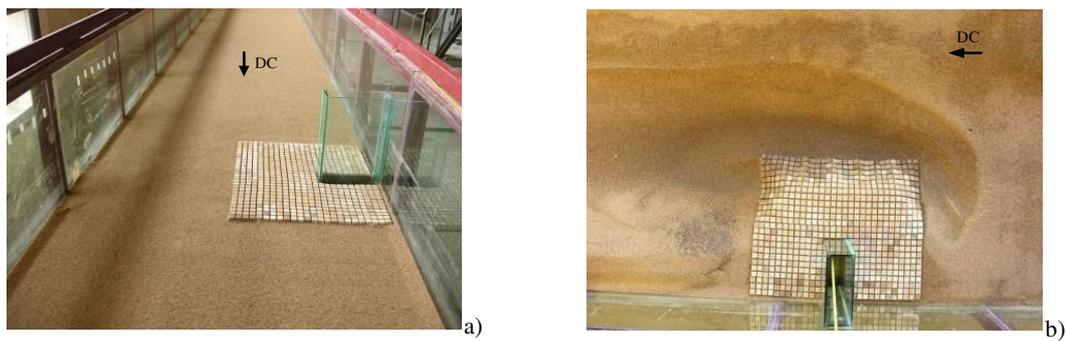
- Ensayo I (*EI*): el objetivo de este experimento fue caracterizar el flujo no perturbado por la presencia del estribo. El lecho se mantuvo con la arena suelta y el estribo fue retirado del canal.

- Ensayo II (*EII*): el objetivo de este experimento fue evaluar la evolución de la erosión en torno al estribo sin la presencia de protección alguna, para lo cual el fondo fue móvil en toda su extensión (Fig. II.13). La duración del ensayo fue de 100 horas (6000 minutos).



**Figura II.13.-** Configuración ensayo EII; a) Condición inicial; b) Condición final

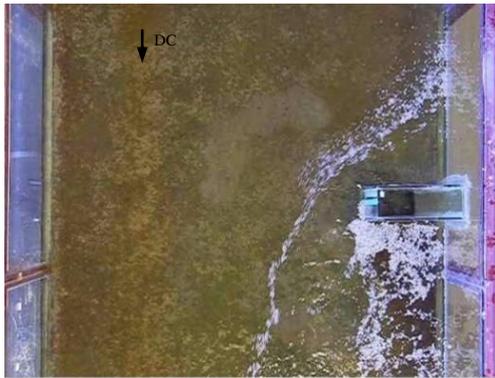
- Ensayo III (*EIII*): el objetivo fue evaluar la evolución de la erosión en torno al estribo protegido mediante la manta seleccionada para tal fin. En consecuencia el lecho se mantuvo móvil en toda su extensión, con excepción de la superficie protegida por la manta en torno al estribo (Fig. II.14). La duración fue de 131.7 horas (7902 minutos).



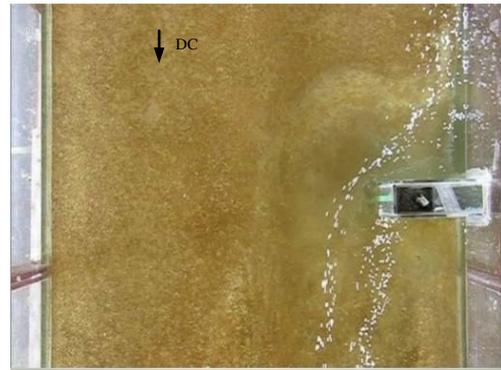
**Figura II.14.-** Configuración ensayo EIII; a) Condición inicial; b) Condición final

- Ensayo IV (*EIV*): el objetivo fue caracterizar el campo del flujo en torno al estribo, sin presencia de protección alguna, para la situación inicial, previa al desarrollo de erosiones. Para ello el lecho se mantuvo horizontal en toda su extensión y rigidizado en el área afectada por erosiones, con la metodología previamente mencionada (Fig. II.15).

- Ensayo V (*EV*): este experimento tuvo por finalidad registrar el campo del flujo para una situación sin protección en torno al estribo y con erosión próxima a la condición de equilibrio. El lecho fue rigidizado con la morfología obtenida al cabo de 48 hs de desarrollo de las erosiones, tiempo para el cual las erosiones alcanzaron un progreso próximo al 90 % (Cap. IV), por lo que se considera que las características del flujo no presentarán diferencias sustanciales con las que se tendrían en la situación final de equilibrio (Fig. II.16).

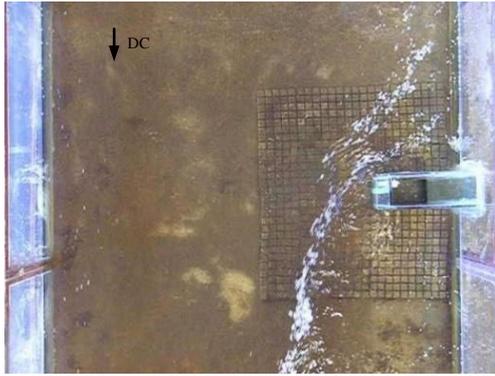


**Figura II.15.-** Configuración ensayo EIV



**Figura II.16.-** Configuración ensayo EV

- Ensayo VI (*EVI*): el objetivo fue medir el campo del flujo en torno al estribo protegido con la manta flexible adoptada, en la situación inicial previa al desarrollo de erosiones. En consecuencia el lecho se mantuvo horizontal en toda su extensión y rigidizado en el área que pudiera ser afectada por erosiones (Fig. II.17).
- Ensayo VII (*EVII*): este ensayo tuvo por finalidad obtener el campo del flujo en torno al estribo protegido con la manta flexible adoptada, para una configuración del lecho erosionado en los primeros estadios del proceso de erosión. En función de ello se permitió que las erosiones se desarrollen durante 100 minutos, congelando dicha morfología mediante la técnica de rigidización ya descrita (Fig. II.18).



**Figura II.17.-** Configuración ensayo EVI

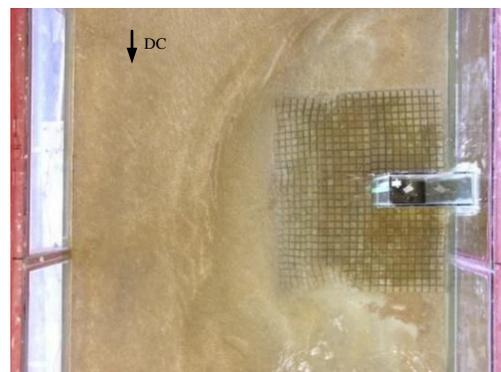


**Figura II.18.-** Configuración ensayo EVII

- Ensayo VIII (*EVIII*): este ensayo tuvo por finalidad caracterizar el campo del flujo en torno al estribo protegido con la manta flexible adoptada, para una configuración del lecho obtenida al cabo de 400 minutos, luego de la cual el fondo fue rigidizado (Fig. II.19).
- Ensayo IX (*EIX*): este experimento tuvo por finalidad caracterizar el campo del flujo para una situación de erosión entorno al estribo protegido próxima al equilibrio. Para cumplir con ello el lecho fue rigidizado con la morfología obtenida al cabo de 48 hs de desarrollo de las erosiones (Fig. II.20). Este tiempo aseguró un desarrollo de la máxima profundidad de erosión de erosión próxima al 80% respecto del valor mayor relevado en el EIII.



**Figura II.19.-** Configuración ensayo EVIII



**Figura II.20.-** Configuración ensayo EIX

En la tabla II.1 se resumen los datos principales de las diferentes configuraciones ensayadas, en particular la condición del lecho (erosionable o inmóvil), el tiempo de evolución del proceso erosivo y la máxima socavación alcanzada, si correspondiere.

**Tabla II.1** Resumen de las diferentes configuraciones representadas

ENSAYO	Condición lecho	Condición estribo	Tiempo evolución (minutos)	Máxima erosión (cm)
EI	Erosionable	Sin estribo	Sin erosión	0.0
EII	Erosionable	No Protegido	6000	27.1
EIII	Erosionable	Protegido	7902	20.7
EIV	Rígido	No Protegido	0	0.0
EV	Rígido	No Protegido	2880	24.2
EVI	Rígido	Protegido	0	0.0
EVII	Rígido	Protegido	100	5.0
EVIII	Rígido	Protegido	400	10.0
EIX	Rígido	Protegido	2880	18

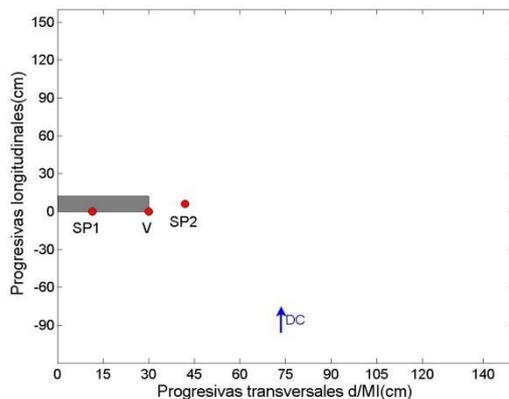
## II.5 Mediciones realizadas

A continuación se describen las mediciones realizadas en cada uno de los ensayos de la etapa experimental del presente estudio, detallando las variables registradas en cada caso, de acuerdo al objetivo específico del ensayo respectivo.

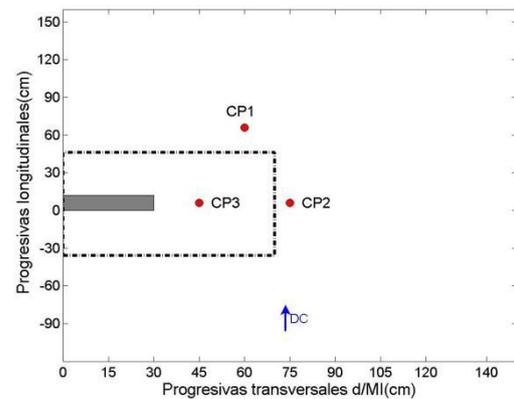
- Ensayo *EI*: En primer lugar se midieron 13 perfiles de velocidades distribuidos a lo ancho de la sección en donde a posteriori se posicionó el estribo. Con ellos fue posible evaluar la distribución transversal de caudales en el canal. Además se midieron 8 perfiles de velocidad en una vertical ubicada en el punto medio de la sección transversal.
- Ensayo *EII*: En este ensayo se registró la evolución temporal del lecho en el punto de máxima erosión local junto al estribo, localización V de figura II.21, en el SP1, junto a la cara aguas arriba del estribo y en una ubicación distante 12 cm del borde del estribo, punto SP2, ambos representados en la figura II.21. La selección de la posición SP2 se justifica en el hecho que la misma se encuentra totalmente localizada dentro de la hoya de erosión, pero a una distancia del estribo lo suficientemente amplia para permitir el montaje del soporte del ADV. Simultáneamente a las mediciones de la posición del lecho, se midieron velocidades durante el desarrollo de las erosiones locales junto al estribo. Para cumplir con ello el velocímetro se posicionó en SP2 (Fig. II.21), de modo

tal de registrar velocidades en un punto ubicado 1 cm por encima del nivel del lecho original, manteniendo inmóvil el instrumento durante todo el experimento.

- Ensayo *EIII*: en esta etapa se midieron posiciones del lecho y velocidades de flujo 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 CP1, CP2 y CP3 en Figura II.22. El punto CP3 se ubicó por encima de la protección, el CP2 corresponde al sitio de la sección transversal de emplazamiento del estribo (coincidente con su eje) que experimentó las mayores erosiones, mientras que en las proximidades de la localización CP1 tuvieron lugar las profundidades de erosión más importantes de todo el lecho. En los puntos CP1 y CP2 se midió la evolución del lecho durante el proceso erosivo. En cada localización se registraron series de velocidades en una posición ubicada 1 cm por encima del nivel del lecho original, durante gran parte del desarrollo de erosiones.



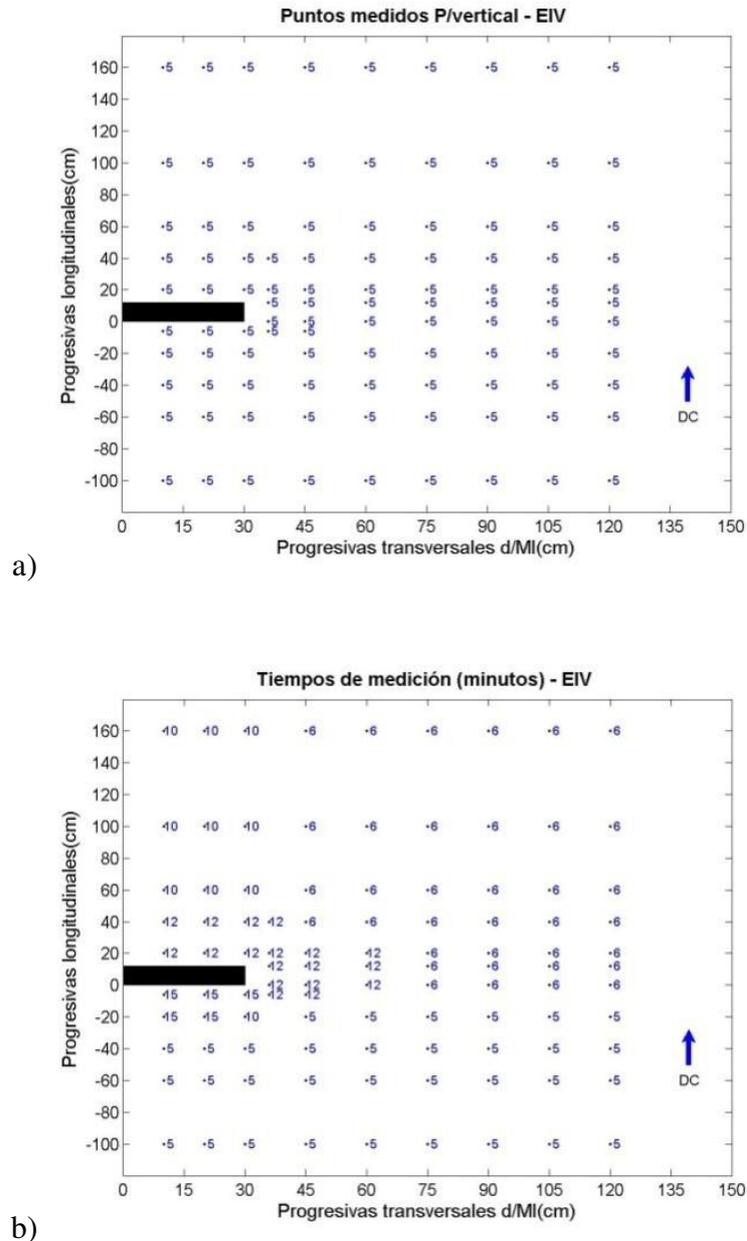
**Figura II.21.-** Localizaciones de medición en el ensayo EII



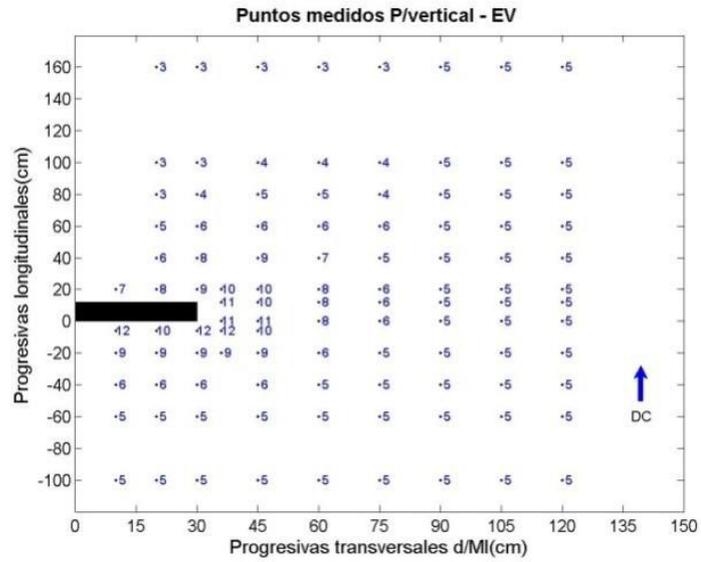
**Figura II.22.-** Localizaciones de medición en el ensayo EIII

- Ensayos *EIV*, *EV*, *EVI*, *EVII*, *EVIII*, *EIX*: en estos ensayos, caracterizados por tener el lecho rigidizado, se realizaron las siguientes mediciones:
  - ✓ *Campo de velocidades superficiales del flujo*: Establecida con la técnica de velocimetría LSPTV. Se utilizó una cámara digital posicionada de modo tal que el campo visual cubrió todo el ancho del canal, en una extensión longitudinal de 1.4 m, que incluye la sección del estribo. Como trazadores se utilizaron partículas de polipropileno aproximadamente esféricas. El tiempo de registro de los videos digitales fue de 1 minuto, limitante impuesta por la cámara digital utilizada.
  - ✓ *Campo Tridimensional (3D) del flujo*: Se midieron velocidades con el ADV en

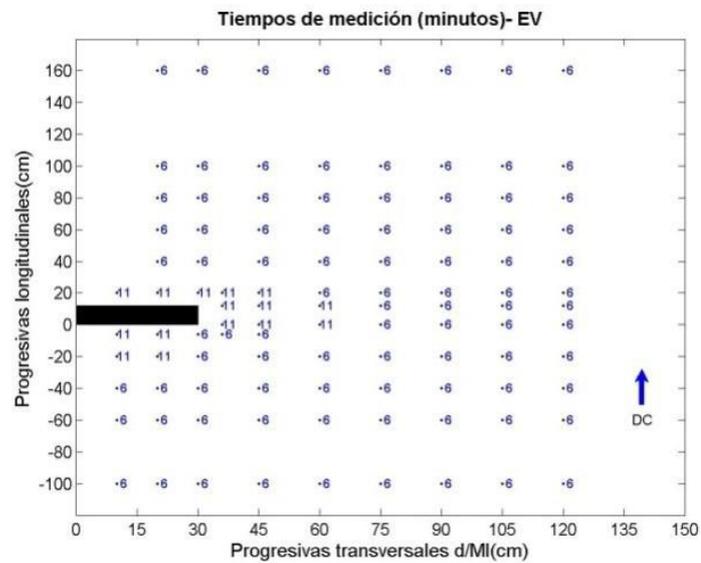
diversas secciones transversales, paralelas al eje del estribo, abarcando una malla de puntos distribuidos tanto vertical como transversalmente de acuerdo con el detalle de información que se quería obtener. En las Figuras II.23 a II.28 se presentan las localizaciones en planta consideradas en cada ensayo indicando, de acuerdo a la posición particular de que se trate, el número de puntos medidos por vertical y el tiempo empleado para medir cada punto considerado.



**Figura II.23.-** Estribo sin protección. Ensayo EIV. a) Cantidad de puntos medidos por vertical; b) tiempo de medición en cada punto por vertical

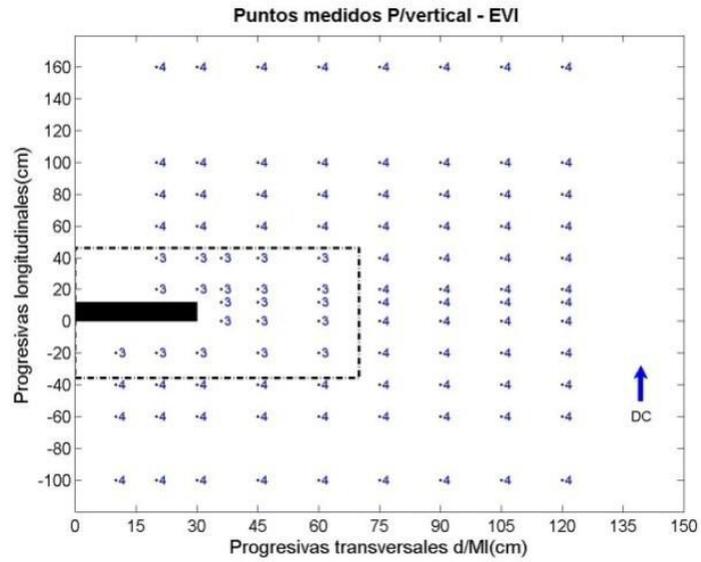


a)

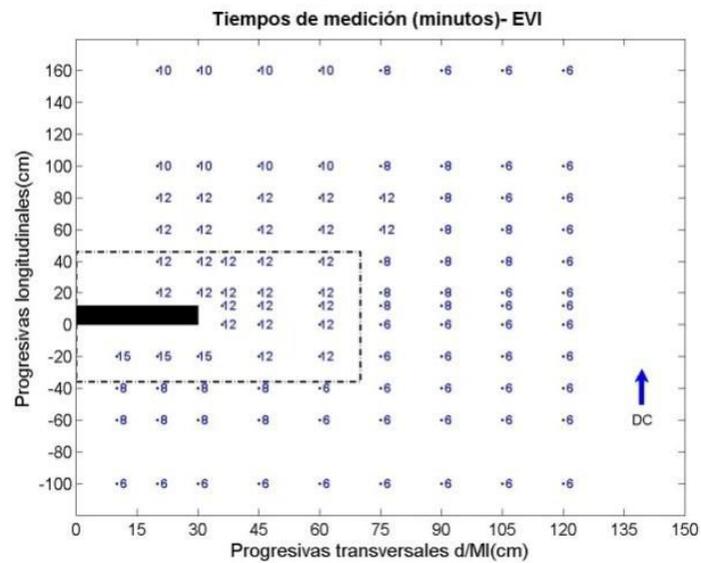


b)

**Figura II.24.-** Estribo sin protección. Ensayo EV. a) Cantidad de puntos medidos por vertical; b) tiempo de medición en cada punto por vertical

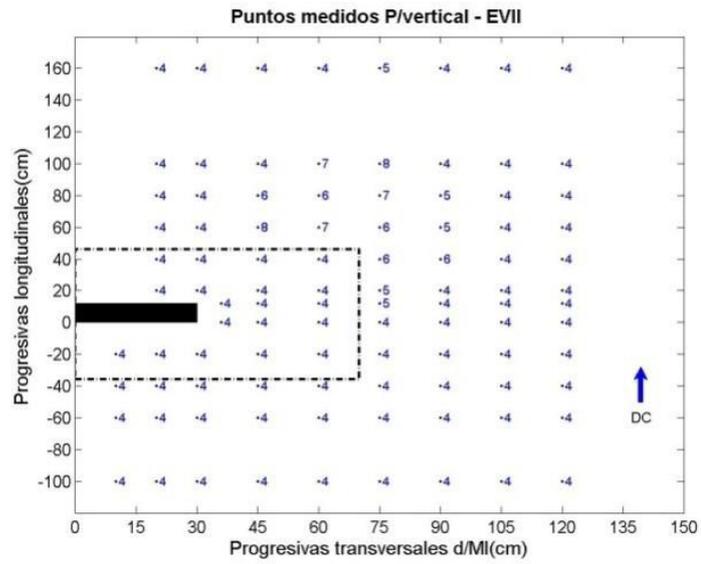


a)

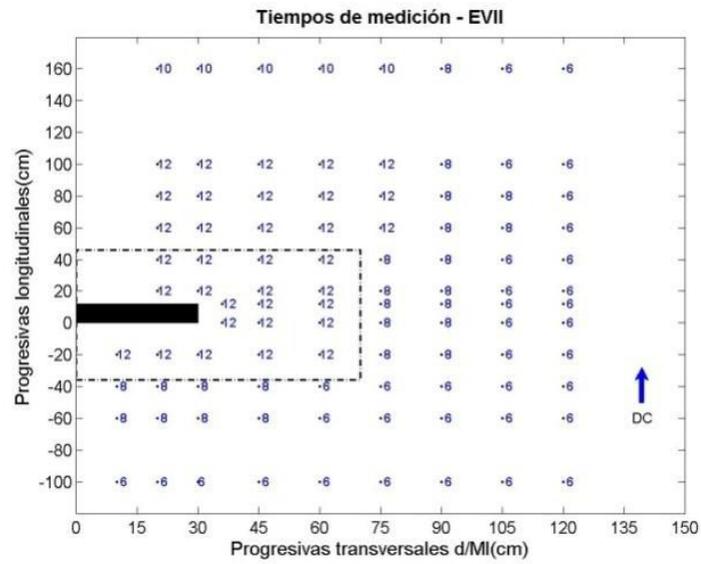


b)

**Figura II.25.-** Estribo protegido. Ensayo EVI. a) Cantidad de puntos medidos por vertical; b) tiempo de medición en cada punto por vertical

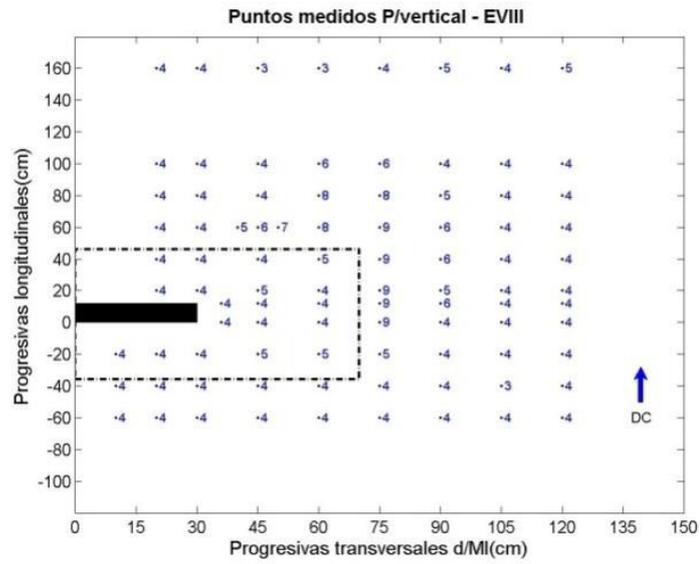


a)

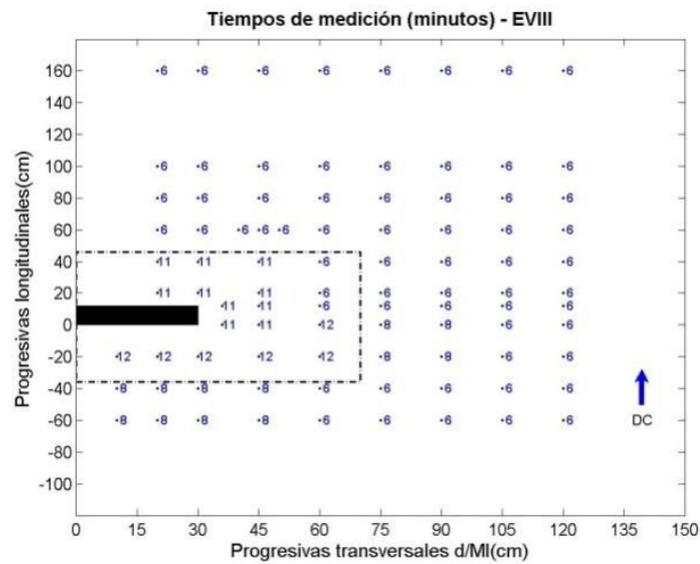


b)

**Figura II.26.-** Estribo protegido. Ensayo EVII. a) Cantidad de puntos medidos por vertical; b) tiempo de medición en cada punto por vertical

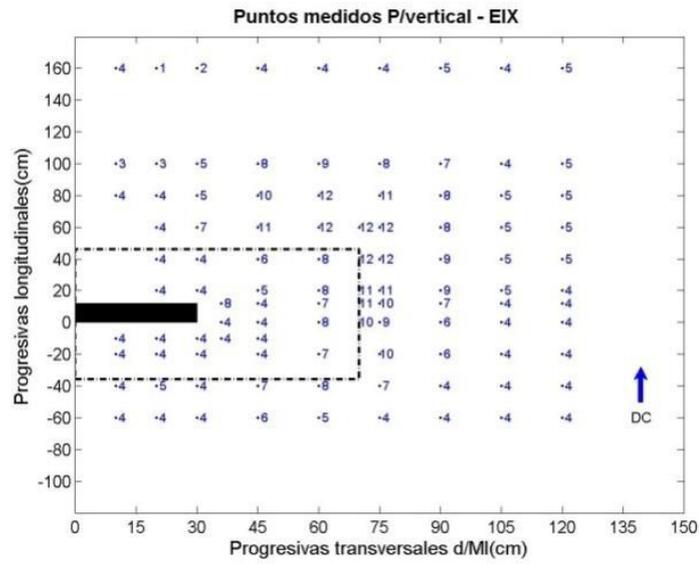


a)

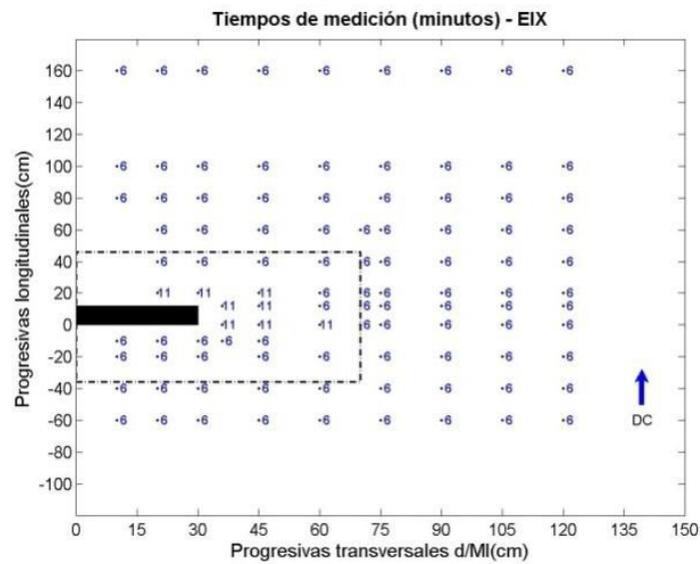


b)

**Figura II.27.-** Estribo protegido. Ensayo EVIII. a) Cantidad de puntos medidos por vertical; b) tiempo de medición en cada punto por vertical



a)



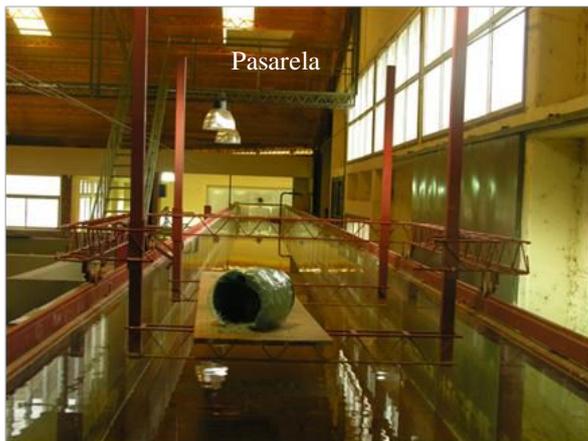
b)

**Figura II.28.-** Estribo protegido. Ensayo EIX. a) Cantidad de puntos medidos por vertical; b) tiempo de medición en cada punto por vertical

## II.6 Implementación de las técnicas de velocimetría

### II.6.1 Velocimetría por seguimiento de partículas a gran escala (LSPTV)

Para la implementación de la técnica de velocimetría LSPTV se utilizó una cámara digital con una resolución de 640 por 480 píxeles y una frecuencia de adquisición de 30 cuadros por segundo. La misma se operó desde un soporte, que se fijó en forma horizontal a una pasarela elevada una distancia de 2.40 m por sobre las paredes del canal, (Fig II.29). De este modo el campo visual cubrió todo el ancho del canal, en una extensión longitudinal de 1.4 m. Como trazadores se utilizaron partículas de polipropileno aproximadamente esféricas, con un diámetro medio de 3 mm, color gris claro y densidad relativa de 0.908 (Fig. II.30). El sembrado de las mismas se hizo en forma manual, desde un carro auxiliar que se desplaza por sobre las paredes del canal (Fig. II.29), el que fue posicionado próximo a la cabecera del mismo, lo cual aseguró una distancia suficientemente larga entre el punto de sembrado y la zona de medición. Próximo a la compuerta reguladora de niveles, al final del canal y superado el sector de medición, se colocó un marco provisto con una malla plástica con el fin de retener las partículas.



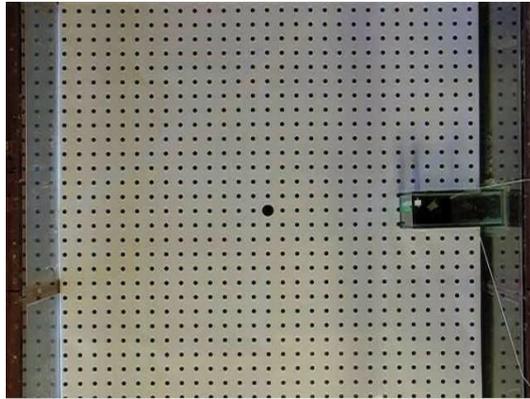
**Figura II.29.-** Vista de la pasarela a la cual se fijó la cámara y carro auxiliar



**Figura II.30.-** Partículas utilizadas en la técnica LSPTV

Previo al inicio de las mediciones y con la cámara en su posición definitiva, se capturaron imágenes de una grilla fijada a una placa plana y ubicada al nivel de la superficie del agua. La misma abarcó toda el área de medición y se conformó con puntos regularmente distribuidos separados entre sí 5 cm. Este proceso tiene por finalidad escalar las distancias recorridas por las partículas con respecto al tamaño del pixel en la imagen y ajustar las imágenes considerando la distorsión que ocurre en el lente de la cámara.

El procesamiento de los videos se realiza con los dos programas libres PTVlab y RIVeR (Rectification of Image Velocity Results), (Patalano et al., 2013; Patalano y García, 2016) los cuales permiten interpretar campos de velocidad a partir de imágenes y rectificar los resultados respectivamente.



**Figura II.31.-** Grilla utilizada en la implementación de la técnica LSPTV

## **II.6.2 Velocimetría acústica Doppler (ADV)**

A continuación se presentan las principales cuestiones contempladas para lograr una adecuada configuración de registro del ADV Vectrino.

### **II.6.2.1 Presencia de partículas suspendidas en el flujo**

La amplitud de la señal acústica registrada por cada receptor del ADV Vectrino es una medida de la intensidad de la señal acústica reflejada por las partículas suspendidas en el flujo. Para que las velocidades del flujo proporcionadas por el instrumento sean precisas la amplitud de la señal acústica debe ser mayor que el nivel de ruido ambiente, generado por la electrónica inherente al instrumento. Por lo tanto, el ADV no puede medir velocidades del flujo en agua cuando no existen partículas suspendidas en la masa líquida. Para evaluar esta situación, además de los valores de velocidad de flujo en cada una de las direcciones, el ADV Vectrino reporta las series de valores de relación señal-ruido, SNR (por sus siglas en inglés) registrada por cada receptor, la cual se evalúa como:

$$SNR = 20 \log \left( \frac{Amplitud_{señal}}{Amplitud_{ruido}} \right) \quad (II.3)$$

Valores bajos de este parámetro están directamente asociados con la falta de partículas en suspensión.

Otro parámetro vinculado con la calidad de la señal de velocidad del flujo brindado por el ADV Vectrino es el coeficiente de correlación, expresado en porcentaje, que cuantifica la similitud entre los rebotes acústicos de los dos pulsos coherentes emitidos para determinar un valor de velocidad radial. Una correlación perfecta (100%) indica medidas confiables de velocidad, ya que la coherencia se mantiene entre los dos pulsos, mientras que una correlación del 0% indica que el valor de velocidad no es confiable. Bajos valores de relación señal-ruido (por ejemplo debido a la falta de partículas en suspensión), elevados niveles de turbulencia, presencia de burbujas de aire y velocidades de flujo que exceden a los límites del rango de velocidad seleccionado, son las principales razones para la falta de coherencia entre los dos pulsos (bajos valores de correlación). Habitualmente se recomienda que los valores de correlación no sean inferiores al 70% aunque en algunos ambientes (flujos con elevados niveles de turbulencia) puede no ser posible alcanzar esos valores mínimos requeridos.

El agua que fluye en el circuito hidráulico cerrado que se conecta al canal de ensayos utilizado en este estudio proviene de la red de agua potable, por lo que la cantidad de partículas en suspensión que contiene es muy reducida. Esto constituyó una limitante en la implementación del ADV Vectrino. En efecto, en estas condiciones el instrumento proporciona mediciones de baja calidad, tal cual lo demostraron los reducidos valores de SNR y correlación asociados con las mediciones de velocidad realizadas en ensayos preliminares destinados a la puesta a punto del equipo. Para contrarrestar el inconveniente se sembró el agua contenida en la cisterna con diferentes tipos de partículas. Finalmente se seleccionó talco industrial, debido a su reducido tamaño, peso y bajo costo.

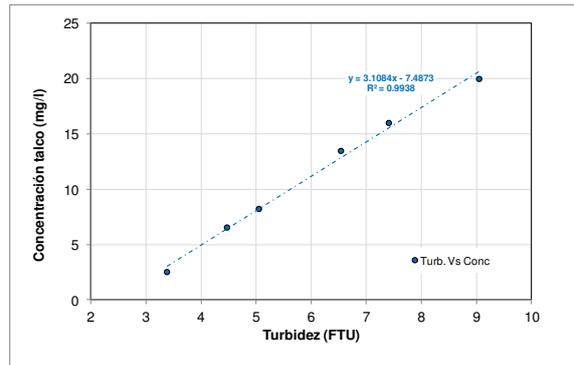
Para analizar la respuesta del instrumento ante la presencia de esas partículas y determinar la cantidad mínima a sembrar en la cisterna, se realizó un ensayo preliminar en el que se evaluó la evolución de la calidad de la señal de velocidades medidas con el ADV (mediante la relación SNR y la correlación) a medida que variaba la concentración de talco en el flujo circulante. Esta variación se logró agregando distintas cantidades de esas partículas en la cisterna de almacenamiento de agua. El caudal de ensayo en el canal se

mantuvo constante e igual a 73 l/s y la profundidad del escurrimiento fue de 15 cm. El ADV Vectrino y un turbidímetro se posicionaron en el centro del canal (Fig. II.32), ambos midiendo a 10 cm respecto del fondo y separados entre sí una distancia aproximada de 2 m, de modo tal de realizar mediciones en forma simultánea con los dos instrumentos.

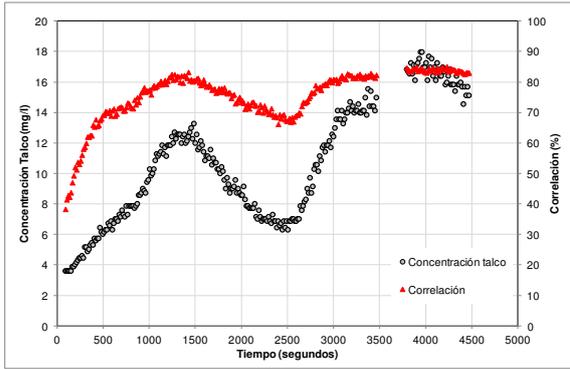
En primer lugar, fue necesario calibrar el turbidímetro de modo tal que permita determinar la concentración del talco en mg/l, ya que dicho instrumento mide la turbidez del agua en Unidad de Turbidez de la Formazina (FTU por sus siglas en inglés). La Fig. II.33 muestra el ajuste resultante de dicho proceso. Luego se estableció la evolución temporal de parámetros registrados simultáneamente con el ADV Vectrino y el turbidímetro. Las Figura II.34 y Figura II.35 permiten observar cómo los valores de correlación y de la relación SNR, respectivamente, variaron con el tiempo acorde a las variaciones experimentadas por la concentración del talco. Resulta evidente en dichas figuras la mejora en la calidad de la señal de velocidad en la medida que aumentó la concentración de partículas en suspensión. Las mayores variaciones, tanto de la correlación como de la SNR, se observaron cuando la concentración de talco aumentó de 4 a 8 mg/l. La Figura II.36 muestra la relación entre los valores del coeficiente de correlación y de la relación señal-ruido representados en las figuras previas.



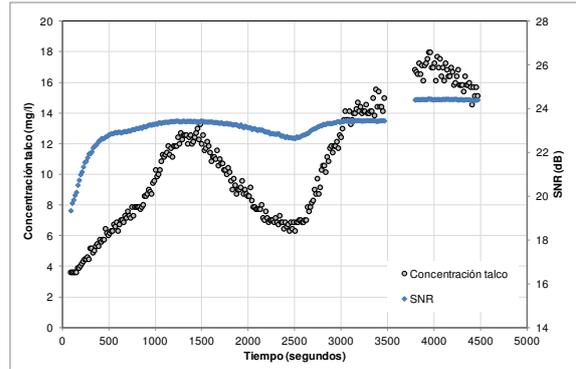
**Figura II.32.-** ADV Vectrino y turbidímetro ubicados en el centro del canal, midiendo ambos a 10 cm respecto del fondo y separados entre sí una distancia aproximada de 2 m.



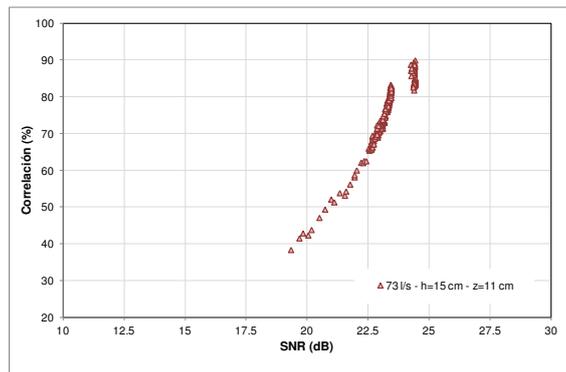
**Figura II.33.-** Calibración del turbidímetro que permite transformar unidades de FTU en concentración de talco en mg/l.



**Figura II.34.-** Evolución temporal del parámetro correlación reportado por el ADV Vectrino y la concentración de talco, medidos en forma conjunta.



**Figura II.35.-** Evolución temporal del parámetro SNR reportado por el ADV Vectrino y la concentración de talco, medidos en forma conjunta.



**Figura II.36.-** Relación entre los valores del coeficiente de correlación y de la relación señal-ruido representados en las figuras previas.

### II.6.2.2 Presencia de zonas de interferencia acústica

Las zonas de interferencia acústica se generan como consecuencia del registro simultáneo por parte de los receptores de los rebotes de los dos pulsos transmitidos por el instrumento para determinar un valor de velocidad (modo coherente). Esto es, el rebote del primer pulso emitido por el fondo y el rebote del segundo emitido por las partículas que se mueven dentro del volumen de medición. La separación temporal entre los dos pulsos (que condiciona esta interferencia) queda definida al seleccionar el rango de velocidad del instrumento. De este modo, para cada rango de velocidad existe una o dos distancias respecto del fondo en que se presenta dicho problema. La presencia de una zona de

interferencia acústica puede identificarse en la serie de datos por una disminución significativa en el coeficiente de correlación y aumentos en las SNR (debido al rebote en el fondo) y en la varianza de la velocidad. En la tabla II.2 se presentan, para el caso de los ADV Vectrinos, las posibles zonas de ocurrencia de interferencia acústica.

**Tabla II.2** Distancia respecto del fondo a la cual tienen lugar las zonas de interferencia acústica para el ADV Vectrino, en función del rango de velocidades

Rango de Velocidad (m/s)	Distancia al fondo de la zona de interferencia (cm)
< 4.0	2 y 5
< 2.5	3 y 10
< 1.0	5 y 12
< 0.3	10 y 23
< 0.1	23 y 45
< 0.03	38 y 75

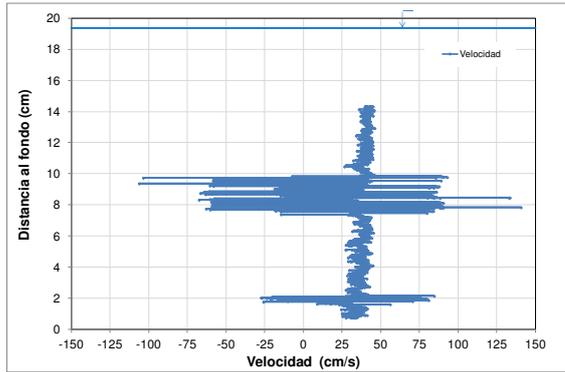
Con el fin de identificar estas regiones, de acuerdo a las características particulares de los ensayos previstos en el estudio, se realizó un experimento preliminar con las siguientes condiciones hidráulicas:

- Caudal: 100 l/s
- Tirante: 19 cm

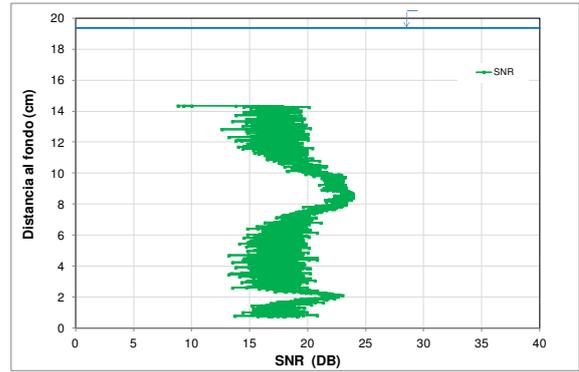
Se posicionó el dispositivo porta instrumental en el centro del canal, sin la presencia del estribo, y se desplazó el Vectrino en la dirección vertical, con un movimiento uniforme, lo cual fue posible gracias al empleo de un motor de paso. De esta forma se realizó el registro continuo de velocidades y de parámetros que definen la calidad de la señal (correlación y SNR), durante el recorrido a lo largo del tirante del escurrimiento. El rango de velocidades analizado fue de 0.3 m/s.

En las figuras II.37, II.38 y II.39 se muestran los perfiles de velocidad longitudinal,  $\langle u \rangle$ , de SNR y del coeficiente de correlación, en las que se pueden identificar dos zonas asociadas con interferencia acústica: una entre los 8 y 10 cm desde el fondo y la otra de menor extensión ubicada aproximadamente a 2 cm respecto del lecho. Basados en estos

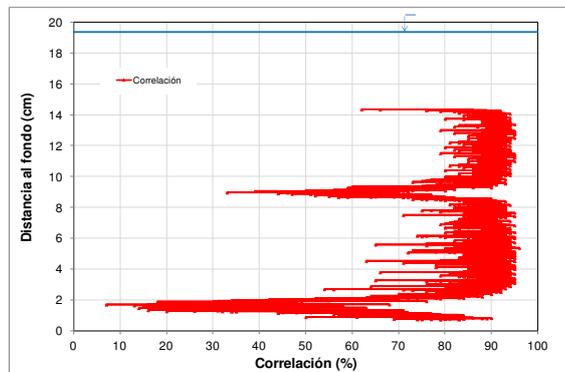
resultados, en la secuencia experimental realizada, se evitó la medición de velocidades en esas zonas.



**Figura II.37.-** Evolución de los valores de velocidad longitudinal,  $\langle u \rangle$ , con la profundidad, durante el ensayo realizado para detectar zonas de interferencia acústica.



**Figura II.38.-** Evolución del parámetro SNR con la profundidad, durante el ensayo realizado para detectar zonas de interferencia acústica.



**Figura II.39.-** Evolución del parámetro correlación con la profundidad, durante el ensayo realizado para detectar zonas de interferencia acústica.

### II.6.2.3 Resolución espacial y temporal de registro del instrumento

Tal cual fuera dicho, los ADV miden la velocidad en un volumen de medición cilíndrico que tiene una base de 6 mm de diámetro y una altura que, para el caso del Vectrino, puede variar entre 2.5 y 8.5 mm. A pesar de que dentro del volumen de medición puedan moverse diversas partículas de sedimento en suspensión, el instrumento determina un solo vector “cuasi” instantáneo de velocidad para todo el volumen, lo cual puede considerarse como un

promediado espacial.

Por otra parte, el instrumento emplea una frecuencia para el muestreo,  $f_s$ , diferente a la que utiliza para reportar (o registrar) la señal al usuario,  $f_R$ , la cual es un promedio temporal de  $N$  valores que reduce el ruido Doppler, es decir:

$$f_R = \frac{f_s}{N} \quad (\text{II.4})$$

De este modo, el promedio se constituye en un filtro digital no recursivo (Hamming, 1983; Bendat y Piersol, 2000). Se entiende como filtro digital al que opera sobre señales discretas generadas con tecnología digital y como filtro no recursivo a aquel con el cual la señal digital de salida depende solamente de la entrada y sus valores previos (en este caso mediante un promedio).

En la tabla II.3 se muestra la estrategia de muestreo temporal que realiza el ADV Vectrino, de acuerdo al rango de velocidades que seleccione el usuario:

**Tabla II.3** Frecuencia de muestreo máxima para ADV Vectrino con “Vectrino Plus” firmware

Rango de Velocidades (m/s)	Frecuencia de muestreo max, $f_s$ (Hz)
< 4.0	2564
< 2.5	1818
< 1.0	1754
< 0.3	1124
< 0.1	667
< 0.03	426

En Gil Montero et al. (2014), se analizaron los efectos de los promediados espacial y temporal, antes referidos, sobre la determinación de los siguientes parámetros de la turbulencia:

- Varianzas de las señales de las componentes de velocidad en las direcciones  $x, y, z$   $\langle u'^2 \rangle$ ,  $\langle v'^2 \rangle$ ,  $\langle w'^2 \rangle$  respectivamente.

- Energía asociada a las fluctuaciones de velocidad:  $k = \frac{1}{2}(\langle u'^2 \rangle + \langle v'^2 \rangle + \langle w'^2 \rangle)$
- Tensiones de Reynolds,  $\langle u'w' \rangle$ , donde  $u', w'$  son las componentes fluctuantes de la velocidad en las direcciones  $x, z$  respectivamente.

Para evaluar los efectos señalados se utilizó el siguiente parámetro adimensional:

$$F_{st} = \frac{Z}{L_{ADV}} \quad (\text{II.5})$$

Donde:

$Z$ : distancia desde el centro del volumen de medición al fondo

$L_{ADV}$ : escala de longitud característica de la medición con ADV. Refiere a la estructura más pequeña que puede ser muestreada por el instrumento,

$$L_{ADV} = \text{Máximo}[L_a, \phi, h_v] \quad (\text{II.6})$$

Siendo:

$L_a$ : escala de longitud advectiva,  $L_a = \frac{U_c}{f_R}$

$U_c$ : velocidad de convección de las estructuras presentes

$f_R$ : frecuencia de registro de datos

$\phi$ : diámetro del volumen de medición ( $6 \text{ mm}$ )

$h_v$ : altura del volumen de medición.

El parámetro  $F_{st}$ , el cual tiene en cuenta tanto el promediado temporal como el espacial, representa la resolución de la caracterización del flujo lograda por el instrumento, ya que relaciona el tamaño del máximo vórtice presente (escala con la distancia al fondo  $Z$ , en el caso de que  $Z$  sea menor que la distancia a la pared) con el tamaño de la estructura más pequeña que puede ser captada por el instrumento. En Gil Montero et al. (2014) se demuestra que los parámetros turbulentos calculados sobre la base de mediciones de velocidad realizadas con ADV tienden a estar sesgados negativamente como consecuencia de los promedios espaciales y temporales llevados a cabo por el instrumento durante las mediciones. Se pudo comprobar que este efecto disminuye en la medida que la distancia

adimensional  $F_{st}$  aumenta. En dicho trabajo se concluye que los resultados pueden considerarse satisfactorios cuando  $F_{st}$  supera el valor de 5. Este número, para el caso de mediciones a realizarse con ADV Vectrino, puede utilizarse para definir, tanto la altura del volumen de medición,  $h_v$ , como la frecuencia de adquisición de datos,  $f_r$ , óptimos. Es importante recordar que el Vectrino disponible permite que el usuario seleccione la altura del volumen de medición entre 2.5 mm y 8.5 mm y la frecuencia de registro entre 1 y 200 Hz. En principio se podría plantear operar el instrumento con una mínima altura de volumen y un valor alto de  $f_r$ , de modo tal de lograr valores de  $F_{st}$  tan grandes como sean posibles. Sin embargo es necesario tener en cuenta que volúmenes de medición pequeños y frecuencias de registro elevadas se traducen en niveles significativos de ruido Doppler, por lo que al establecer  $h_v$  y  $f_r$  debe tratarse de optimizar  $F_{st}$ , tratando de mantener los niveles de ruidos Doppler tan bajos como sean posibles. Por otra parte, como  $L_{ADV}$  se define como el máximo valor entre  $[L_a; \phi; h_v]$  disminuir  $h_v$  o incrementar  $f_r$  de modo tal que  $L_a$  y  $h_v$  sean menores que 6 mm no tiene sentido, ya que de ser así estaría dominando el promedio espacial impuesto por  $\phi$ .

En función de estas consideraciones, para las mediciones de velocidad realizadas en esta Tesis se optó por una altura del volumen de medición que fuera semejante a su diámetro, esto es  $h_v=7mm$ .

De un modo semejante se seleccionó la frecuencia de registro. Puesto que la escala de las estructuras más pequeñas que se pueden medir con el ADV resulta del máximo valor entre la longitud advectiva,  $L_a$ , la altura del volumen de medición,  $h_v$  y el diámetro de su base,  $\phi$ ;  $f_r$  se adoptó de modo tal que  $L_a = \frac{U_c}{f_r} \cong h_v = 7 mm$  ya que si  $\frac{U_c}{f_r} < h_v$  domina el promediado espacial y si  $\frac{U_c}{f_r} > h_v$  domina el promediado temporal y es recomendable aumentar la frecuencia de registro. Para lograr estos requisitos es necesario conocer la velocidad de convección de las estructuras turbulentas presentes,  $U_c$ . Para ello se realizaron mediciones preliminares, con las condiciones experimentales finalmente seleccionadas, determinado perfiles de velocidades en el flujo de aproximación y diversos puntos en la zona de flujo contraído, con el fin de identificar la magnitud de la máxima velocidad posible de encontrar en los experimentos. A partir de dichas mediciones se obtuvo

- 1) Velocidad media en la vertical del flujo de aproximación: 32 cm/s

2) Velocidad máxima medida en el sector de flujo contraído: 50 cm/s

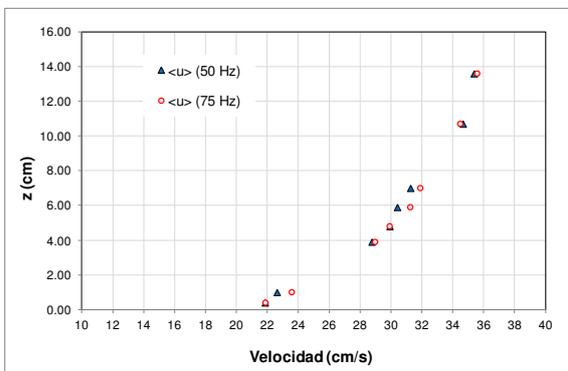
En función de esto se realizaron las siguientes dos consideraciones:

$$\text{Para } U_c = 32 \frac{\text{cm}}{\text{s}} \rightarrow \frac{32 \frac{\text{cm}}{\text{s}}}{f_R} \cong 0.7 \text{ cm} \rightarrow f_R \cong 45.7 \text{ Hz};$$

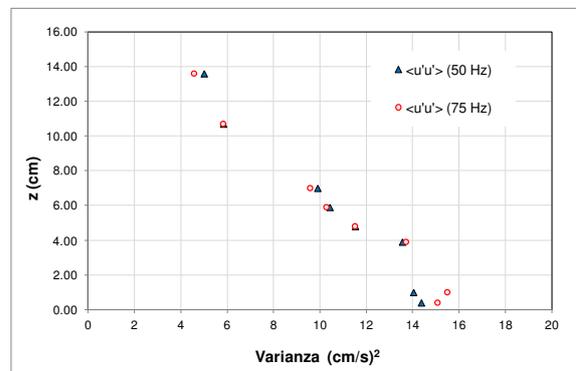
$$\text{Para } U_c = 50 \frac{\text{cm}}{\text{s}} \rightarrow \frac{50 \frac{\text{cm}}{\text{s}}}{f_R} \cong 0.7 \text{ cm} \rightarrow f_R \cong 71.4 \text{ Hz}$$

Los resultados anteriores sugieren a priori que medir con una  $f_R > 71 \text{ Hz}$  no aporta a una mejor resolución temporal mientras que sí incrementa el nivel de ruido. Una evaluación adicional se realizó para definir la frecuencia de registro óptima midiendo dos perfiles de velocidad en la línea central, para las mismas condiciones de flujo, con  $h_v=7 \text{ mm}$ , constante para las dos mediciones, pero variando la frecuencia de registro, una con  $f_R=50 \text{ Hz}$  y otra con  $f_R=75 \text{ Hz}$ .

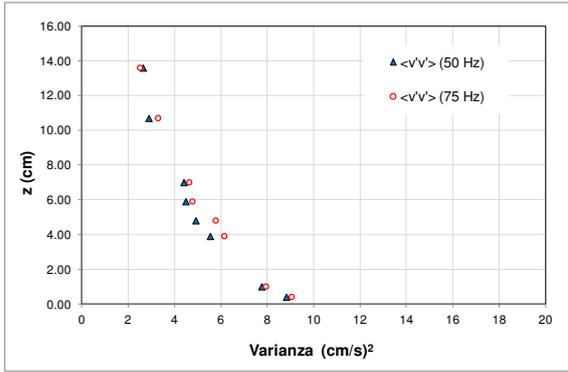
En las figuras II.40 a II.45 se comparan los perfiles de velocidad en la dirección longitudinal del escurrimiento,  $\langle u \rangle$ ; de las varianzas de las señales de las componentes de velocidad en las direcciones longitudinal, transversal y vertical  $\langle u'^2 \rangle$ ,  $\langle v'^2 \rangle$ ,  $\langle w'^2 \rangle$ ; de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad,  $k$ , y de las tensiones de Reynolds  $\langle u'w' \rangle$ . La coincidencia mostrada entre ambas mediciones justificaron seleccionar como frecuencia de registro,  $f_R=50 \text{ Hz}$ , ya que al tener menor frecuencia de registro minimiza la presencia de ruido.



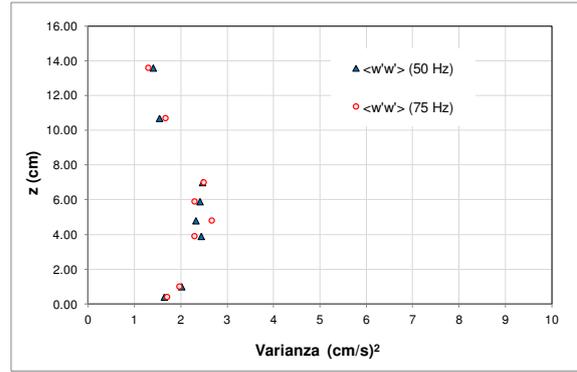
**Figura II.40.-** Perfiles de velocidades,  $\langle u \rangle$ , medidos con frecuencias de registro de 50 Hz y 75 Hz



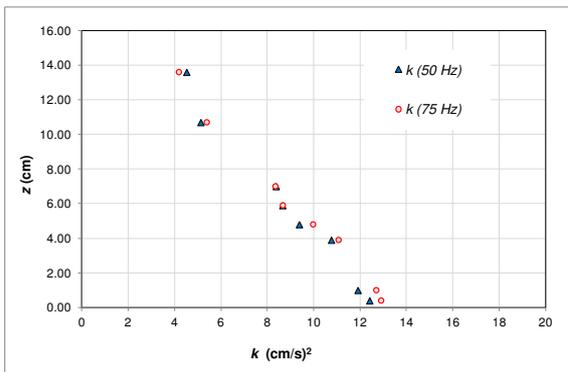
**Figura II.41.-** Perfiles de varianzas de las señales de velocidad en la dirección longitudinal,  $\langle u'^2 \rangle$ , medidos con frecuencias de 50 Hz y 75 Hz



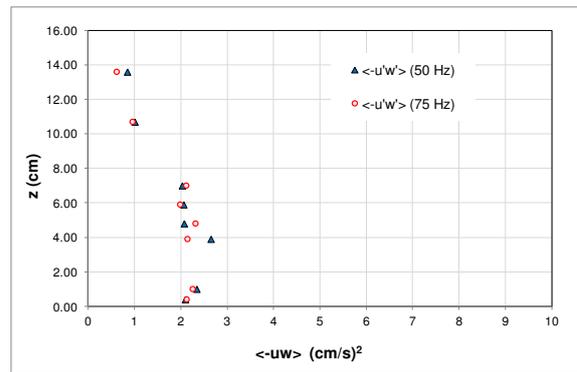
**Figura II.42.-** Perfiles de varianzas de las señales de velocidad en la dirección transversal,  $\langle v'^2 \rangle$ , medidos con frecuencias de 50 Hz y 75 Hz.



**Figura II.43.-** Perfiles de varianzas de las señales de velocidad en la dirección vertical,  $\langle w'^2 \rangle$ , medidos con frecuencias de 50 Hz y 75 Hz.



**Figura II.44.-** Perfiles de energía asociada a las fluctuaciones de velocidad,  $k$ , obtenidos a partir de mediciones realizadas con frecuencias de 50 Hz y 75 Hz



**Figura II.45.-** Perfiles de Tensiones de Reynolds,  $-\langle u'w' \rangle$ , obtenidos a partir de mediciones realizadas con frecuencias de 50 Hz y 75 Hz

Región del flujo en la cual los efectos del promediado espacial y temporal no son importantes

Según lo ya señalado, Gil Montero et al (2014) demostraron que los efectos de las promediaciones temporales y espaciales son más significativos para valores de  $F_{st} < 5$ , por lo que

$$F_{st} = \frac{z}{L_{ADV}} > 5 \rightarrow z > 5 * 0.7 \text{ cm} > 3.5 \text{ cm}$$

Se concluye que para aquellos puntos que se midan a distancias mayores a 3.5 cm respecto

del fondo la estrategia de muestreo del ADV no introducirá efectos de consideración sobre la evaluación de los parámetros de la turbulencia seleccionados.

Pese a ese resultado, se consideró importante medir en distancias más cercanas al fondo, adoptándose un Z mínimo de 1 cm (Precht, et al. 2006) lo cual supone que la máxima estructura turbulenta a medir es del orden de la distancia a la pared. Con ello se obtiene que:

$$F_{st\ Minimum} \cong \frac{1\text{cm}}{0.7\text{ cm}} \cong 1.4$$

Gil Montero et al. (2014) presentan gráficos que permiten obtener el grado de afectación de parámetros de la turbulencia (desvió estándar de las fluctuaciones, energía de las fluctuaciones de velocidad y esfuerzos de Reynolds) como una función de la distancia adimensional  $F_{st}$ . En función de ellos puede verse que para aquellos puntos que se corresponden con el valor de  $F_{sMínimo}$  resultarán:  $\langle u'^2 \rangle^{1/2} \cong (75\% - 85\%) \langle u'^2 \rangle^{1/2}_R$ ;  $\langle v'^2 \rangle^{1/2} \cong (54\% - 63\%) \langle v'^2 \rangle^{1/2}_R$ ;  $\langle w'^2 \rangle^{1/2} \cong (38\% - 45\%) \langle w'^2 \rangle^{1/2}_R$ ;  $k \cong (63\% - 73\%) k_R$ ;  $\langle u'w' \rangle \cong (63\% - 73\%) \langle u'w' \rangle_R$ , donde:  $\langle u'^2 \rangle^{1/2}_R$ ;  $\langle v'^2 \rangle^{1/2}_R$ ;  $\langle w'^2 \rangle^{1/2}_R$ ;  $k_R$ ;  $\langle u'w' \rangle_R$  son los parámetros evaluados a partir de mediciones sin efecto de promediación. Estos son los máximos errores esperables en las localizaciones cerca del fondo y serán tenidos en cuenta en el análisis de los resultados.

#### **II.6.2.4 Tiempos de medición óptimos analizando la incertidumbre esperada en la determinación de parámetros turbulentos**

En el análisis de los resultados se aplicó la técnica de remuestreo (Booststrap en inglés) para evaluar la incertidumbre (errores aleatorios) en la determinación experimental de los distintos parámetros de la turbulencia, calculados a partir de series temporales de velocidades medidas con el ADV.

La técnica de remuestreo (Booststrap) fue conceptualizada y propuesta por Efron (1979) y Efron y Tibshirani (1993). Esta técnica permite aproximar la distribución de probabilidad de estadísticos calculados a partir de la muestra original (en este caso, parámetros turbulentos). La distribución de probabilidad de cada estadístico que se quiere evaluar se

determina generando sintéticamente un número elevado de muestras aleatorias construidas directamente a partir de los datos observados (remuestreo). Es decir, se utiliza la muestra original para generar, a partir de ella, nuevas muestras con características estadísticas similares que sirvan de base para estimar inductivamente la forma de la distribución muestral de los estadísticos, en lugar de partir de una distribución teórica asumida a priori (Gil-Flores, 2005).

Básicamente el procedimiento consiste en: 1) crear un gran número de sub-muestras con reposición de los mismos datos registrados y 2) calcular para cada muestra sintética resultante, el valor del estadístico en cuestión. Se obtiene así una aproximación a la distribución de muestreo del estadístico, a partir de la cual se puede estimar un intervalo de confianza para dicho estadístico o realizar una prueba de significación. Como se observa, el procedimiento es relativamente sencillo y proporciona una estrategia bastante general para enfrentar diferentes tipos de situaciones, independientemente del tipo de datos y variables que son objeto de análisis (Ledesma, 2008).

El método de remuestreo introducido por Efron (1979) estaba destinado a usarse con datos no correlacionados. A posteriori Efron y Tibshirani (1993) propusieron la técnica de remuestreo de bloques de longitud definida (MBB por sus siglas en inglés: moving block bootstrap) que permite emplear datos correlacionados (como es el caso de las velocidades registradas en un flujo turbulento), en lugar de utilizar remuestreo de datos individuales que destruyen la correlación real de la señal que uno está tratando de caracterizar. La técnica de MBB ha sido validada por García et al (2006) como herramienta que proporciona una buena aproximación de los intervalos de confianza de velocidades medias y parámetros de la turbulencia.

Efron y Tibshirani (1993) demostraron que rara vez es necesario generar más de 200 muestras sintéticas para estimar la varianza del error, mientras que para determinar intervalos de confianza se requieren generar alrededor de 1000 muestra sintéticas. Un parámetro clave en la implementación de esta técnica es determinar la longitud óptima del bloque. Un remuestreo con bloques que tengan mayor cantidad de datos que el óptimo genera una subestimación de la varianza del error del parámetro, puesto que las señales sintéticas generadas se parecen más unas con otras. Si los bloques son más cortos que el óptimo también podría subestimarse la varianza debido a que la correlación de la señal se destruye.

García et al. (2006) ajustaron la siguiente expresión que permite relacionar la longitud de bloque óptima,  $b_{opt}$  con el tiempo de muestreo  $T_m$  y la escala de tiempo integral de la señal de velocidad T.

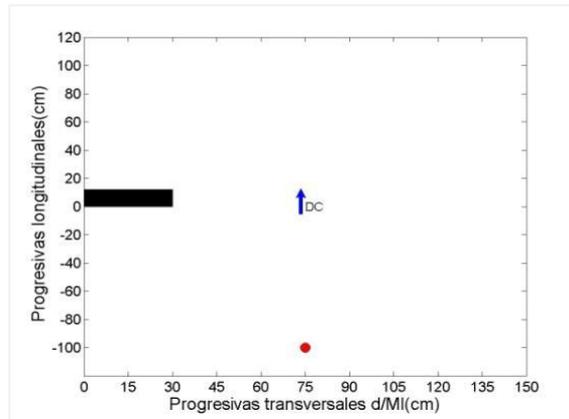
$$b_{opt} = 0.788 * T^{2/3} * T_m^{1/3} \quad (II.7)$$

A continuación se analizan los tiempos de medición empleados, a partir del análisis de la incertidumbre esperada en la estimación de los diferentes parámetros estadísticos. Estos fueron calculados sobre la base de series de velocidad de larga duración, registradas en diversas localizaciones en torno al estribo, para las condiciones experimentales del ensayo EIV. Se registraron series de tiempo de velocidad de 16 minutos de duración las que a su vez fueron sub-muestreadas para evaluar los efectos de la longitud de registro. Para ello se utilizaron intervalos de 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12 y 14 minutos. La frecuencia de registro,  $f_R$  utilizada fue de 50 Hz y la altura del volumen de medición,  $h_v$  de 7 mm. Para cada una de las sub-series conformadas se aplicó la técnica de MBB para estimar la incertidumbre en la estimación de los siguientes parámetros: a) valor medio de cada componente de velocidad  $\langle u \rangle$ ,  $\langle v \rangle$ ,  $\langle w \rangle$  en las direcciones longitudinal, transversal y vertical ( $x$ ,  $y$  y  $z$ ) respectivamente; b) varianzas de las señales de las componentes de velocidad  $\langle u'^2 \rangle$ ,  $\langle v'^2 \rangle$ ,  $\langle w'^2 \rangle$ ; c) la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad,  $k$ ; y d) tensiones de Reynolds  $\langle u'w' \rangle$ ;  $\langle u'v' \rangle$ ;  $\langle v'w' \rangle$ . La técnica MBB se aplicó con 1000 réplicas. Sobre la base de los resultados proporcionados se calcularon los correspondientes coeficientes de variación, CV, es decir, la relación entre el desvío estándar y el valor medio de cada estimación. El análisis de incertidumbre realizado está implementado en el programa computacional TuDe (turbulence description) desarrollado por el grupo de trabajo del Centro de Estudios y Tecnología del Agua, CETA, (UNC).

Las señales se recolectaron en diversas localizaciones (sin erosión), de modo tal de poder analizar la evolución de la longitud de registro óptima asociada a las características espaciales de que se trate. Se consideraron cuatro situaciones de referencia para el análisis: a) Flujo no perturbado por la presencia del estribo; b) Línea longitudinal coincidente con la progresiva transversal 45 cm; c) Zona de recirculación aguas arriba del estribo; y d) Zona de recirculación aguas abajo del estribo.

II.6.2.4.a Flujo no perturbado por la presencia del estribo:

Las mediciones utilizadas para analizar esta situación se localizaron 100 cm aguas arriba del estribo, en una progresiva transversal de 75cm (Fig II.46). Se consideraron dos puntos en la vertical, uno ubicado a 1cm y el otro a 11cm, con respecto al nivel del lecho.

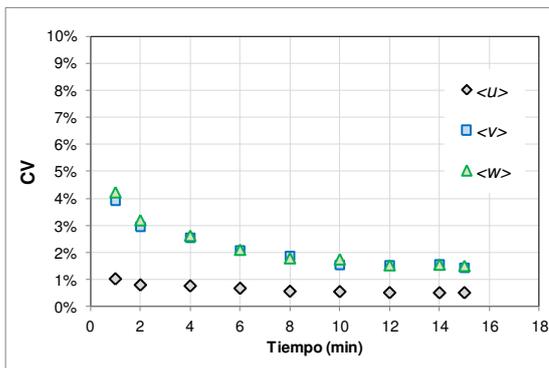


**Figura II.46.-** Localización de las mediciones representativas del flujo no perturbado

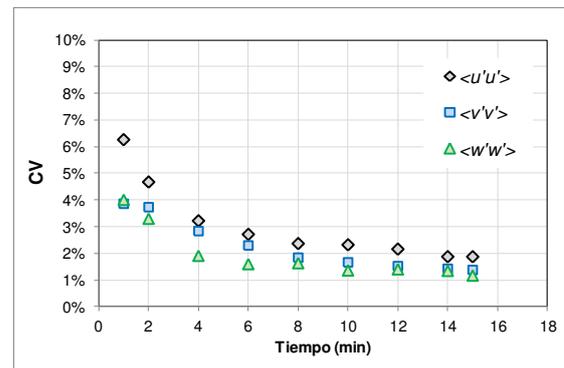
En las figuras II.47 a II.50 se presentan los coeficientes de variación,  $CV$ , obtenidos para las velocidades medias, las varianzas, la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad y las tensiones de Reynolds  $\langle u'w' \rangle$ , a partir de la aplicación de la técnica MBB a las submuestras de distintas duraciones, derivadas de la serie medida de 16 minutos, en las proximidades del fondo ( $z=1$  cm). En todos los casos mencionados se destaca la tendencia decreciente del  $CV$  en la medida que se considera un tiempo de medición mayor. Si particularmente analizamos los valores de  $CV$  correspondientes a 6 minutos de medición (tiempo mayoritariamente empleado en esta tesis para las mediciones del flujo sin o con muy poca perturbación) y  $z = 1$  cm (Tabla II.4) podemos considerar que la incertidumbre en la determinación de los parámetros turbulentos resulta relativamente pequeña, entre 1% y 2 % para las velocidades medias  $\langle u \rangle$ ,  $\langle v \rangle$ ,  $\langle w \rangle$ ; entre 2% y 3 % para las varianzas en las tres direcciones  $\langle u'^2 \rangle$ ,  $\langle v'^2 \rangle$ ,  $\langle w'^2 \rangle$ ; del orden del 2 % para la energía  $k$  y 3 % para las tensiones  $\langle u'w' \rangle$ .

**Tabla II.4** Coeficientes de variación, CV, en la determinación de los distintos parámetros turbulentos correspondientes a 6 minutos de medición. Flujo no perturbado por la presencia del estribo

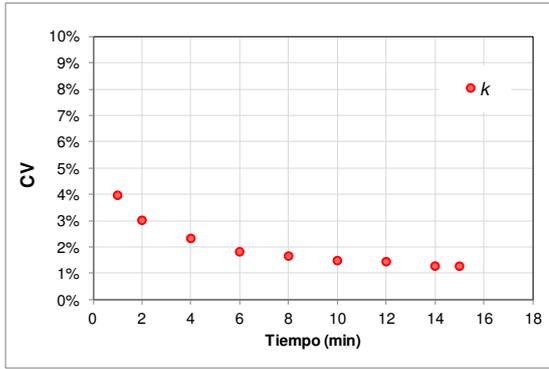
Parámetro	z = 1cm	z = 11cm
	CV (6 minutos) (%)	CV (6 minutos) (%)
$\langle u \rangle$	0.7	0.7
$\langle v \rangle$	2.1	2.1
$\langle w \rangle$	2.1	5.7
$\langle u'^2 \rangle$	2.7	5.3
$\langle v'^2 \rangle$	2.3	2.9
$\langle w'^2 \rangle$	1.6	4.1
$k$	1.8	3.9
$\langle u'w' \rangle$	3.1	9
$\langle u'v' \rangle$	---	--
$\langle v'w' \rangle$	---	--



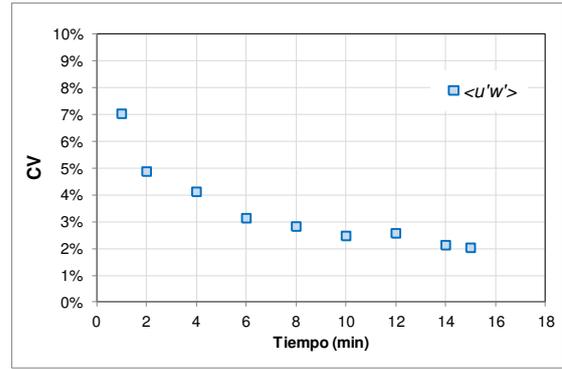
**Figura II.47.-** Coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de las tres componentes de velocidad,  $\langle u \rangle$ ,  $\langle v \rangle$ ,  $\langle w \rangle$ . z = 1cm



**Figura II.48.-** Coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de las varianzas de las tres componentes de velocidad,  $\langle u'^2 \rangle$ ,  $\langle v'^2 \rangle$ ,  $\langle w'^2 \rangle$ . z = 1cm

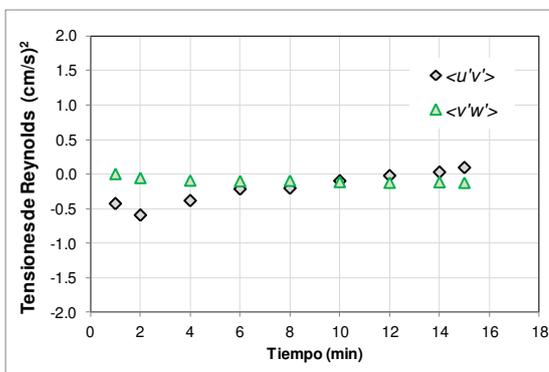


**Figura II.49.-** Coeficientes de variación de las estimaciones de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad,  $k$ .  $z = 1\text{ cm}$

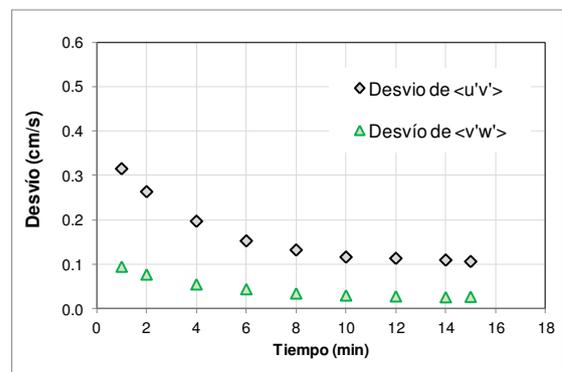


**Figura II.50.-** Coeficiente de variación de las estimaciones de las tensiones de Reynolds  $\langle u'w' \rangle$ .  $z = 1\text{ cm}$

En el análisis mostrado no se han incluido los gráficos de variación de  $CV$  para el caso de las tensiones de Reynolds  $\langle u'v' \rangle$  y  $\langle vw' \rangle$ , ya que los valores pequeños evidenciados por estos parámetros generan que la incertidumbre relativa no sea representativa. Por ello, en las figuras II.51 y II.52 se presentan las variaciones de los valores medios de dichos parámetros y los desvíos resultantes del MBB, en la medida que se consideraron tiempos de medición mayores. Tal como se observa, si bien el desvío disminuyó con el incremento del tiempo de medición, el valor muy pequeño del parámetro, reflejado por su valor medio (Figura II.51), justifica que los  $CV$  sean muy elevados en estos casos. En la Figura II.52 se muestra como para 6 minutos de medición las medias de las tensiones oscilan entorno a cero y el desvío tiende a estabilizarse sin variaciones de significación.

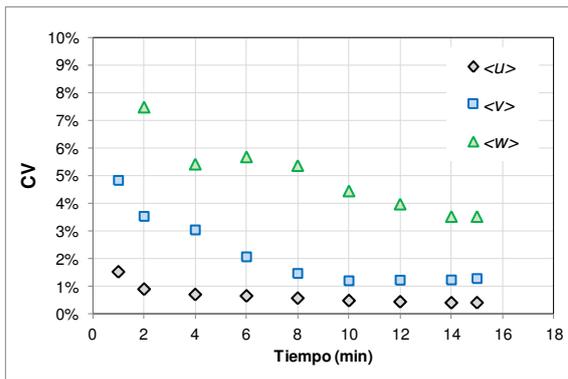


**Figura II.51.-** Tensiones de Reynolds medias  $\langle u'v' \rangle$  y  $\langle v'w' \rangle$  como una función del tiempo.  $z = 1\text{ cm}$

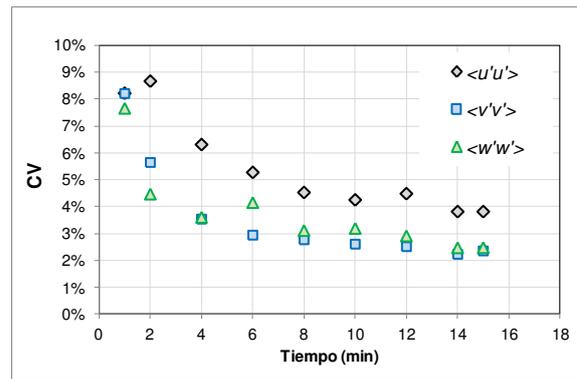


**Figura II.52.-** Desvíos de las estimaciones de las tensiones de Reynolds  $\langle u'v' \rangle$  y  $\langle v'w' \rangle$  como una función del tiempo.  $z = 1\text{ cm}$

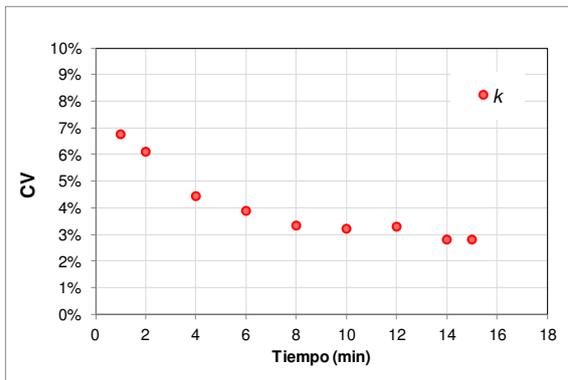
El análisis MBB realizado a partir de las mediciones correspondientes a  $z=11\text{cm}$  arrojó resultados semejantes a los obtenidos para el caso de  $z=1\text{ cm}$ . Si bien los CV correspondientes a 6 minutos de medición (Tabla II.4) resultaron superiores a los que se tuvieron para igual tiempo en las proximidades del fondo (resultado esperable ya que las estructuras turbulentas observadas para  $z = 11\text{cm}$  tienen tiempos característicos mayores que las observadas cerca del fondo), siempre presentaron valores menores al 10 % (Figuras II.53 a II.58).



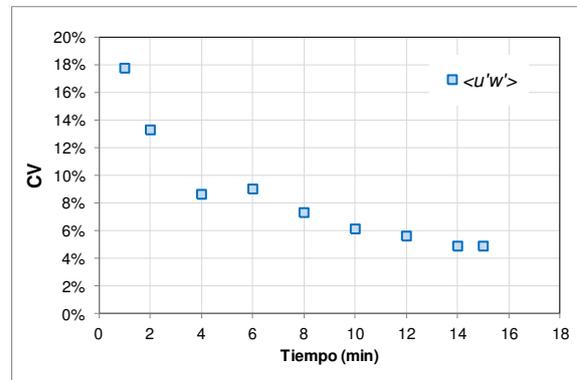
**Figura II.53.-** Coeficientes de variación de las estimaciones de las tres componentes de velocidad,  $\langle u \rangle$ ,  $\langle v \rangle$ ,  $\langle w \rangle$ .  $z = 11\text{cm}$



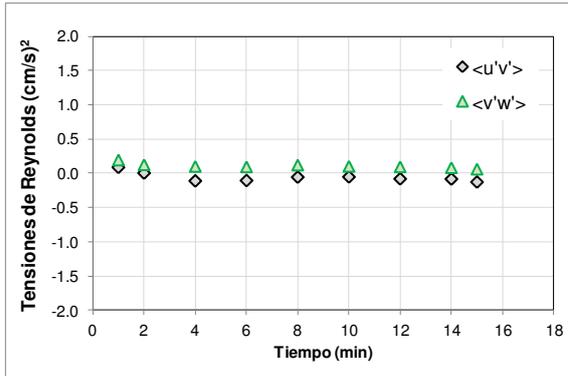
**Figura II.54.-** Coeficientes de variación de las estimaciones de las varianzas de las tres componentes de velocidad,  $\langle u'^2 \rangle$ ,  $\langle v'^2 \rangle$ ,  $\langle w'^2 \rangle$ .  $z = 11\text{cm}$



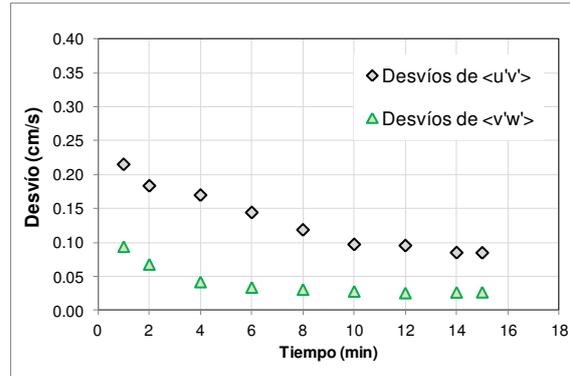
**Figura II.55.-** Coeficientes de variación de las estimaciones de la energía cinética turbulenta,  $k$ .  $z = 11\text{ cm}$



**Figura II.56.-** Coeficientes de variación de las estimaciones de las tensiones de Reynolds  $\langle u'w' \rangle$ .  $z = 11\text{ cm}$



**Figura II.57.-** Tensiones de Reynolds medias  $\langle u'v' \rangle$  y  $\langle v'w' \rangle$  como una función del tiempo. z = 11 cm



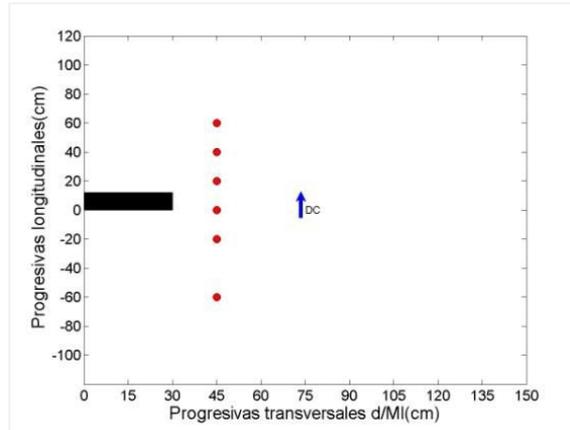
**Figura II.58.-** Desvíos de las estimaciones de las tensiones de Reynolds  $\langle u'v' \rangle$  y  $\langle v'w' \rangle$  como una función del tiempo. z = 11 cm

Sobre la base del análisis realizado a las dos profundidades de flujo evaluadas se concluye que, en el flujo no perturbado por la presencia del estribo, medir con 6 minutos permite caracterizar adecuadamente a las velocidades medias, las varianzas, energía cinética turbulenta y tensiones de Reynolds.

#### II.6.2.4.b Línea longitudinal coincidente con la progresiva transversal 45 cm:

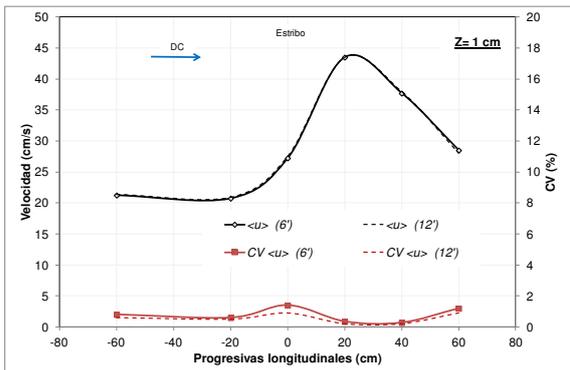
Se analizan en esta sección series de velocidades de flujo medidas en las progresivas longitudinales -60 cm, -20 cm, 0 cm, 20 cm, 40 cm y 60 cm; todas posicionadas transversalmente en la progresiva 45 cm (Figura II.59). Las localizaciones se han considerado como representativas de la zona del flujo contraído por la presencia del estribo, estando las progresivas de más aguas abajo en una región de flujo compleja determinada por la presencia de la capa de corte desprendida del estribo. En cada punto se midió para los mismos niveles respecto del lecho, esto es z=1 cm y z= 11 cm.

La tendencia a disminuir del coeficiente de variación, CV, en la medida que se consideran tiempos de medición más grandes, en general, se repite para todos los puntos examinados, salvo en aquellas situaciones en donde la magnitud del parámetro en cuestión resultó muy pequeña. En dichos casos se recomienda utilizar a los desvíos, en lugar del CV, como representativos de las incertidumbres.

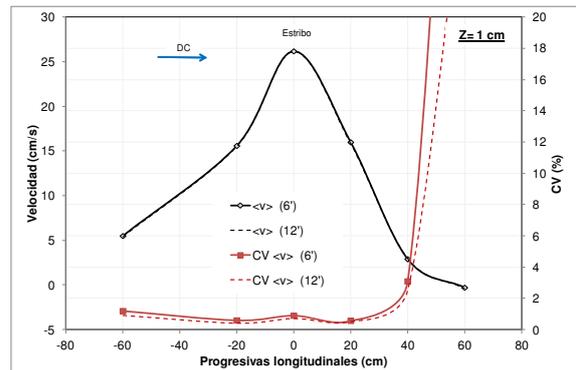


**Figura II.59.-** Localización de las mediciones representativas del flujo contraído y afectado por la capa de corte desprendida desde el estribo

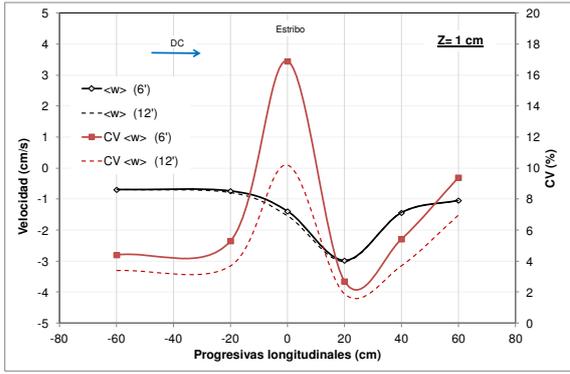
En las Figuras II.60 a II.68 se ofrecen los resultados obtenidos de las mediciones realizadas en todas las progresivas consideradas, para una distancia desde el fondo  $z=1\text{cm}$ . En esas figuras se representaron el CV y el valor medio de la estimación de cada parámetro analizado, asociados a 6 minutos y 12 minutos de tiempo de medición.



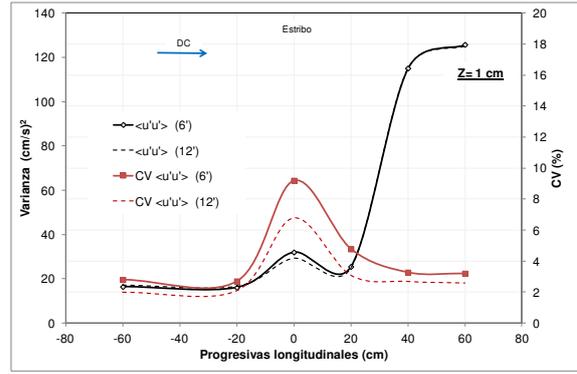
**Figura II.60.-** Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de la componente longitudinal del vector velocidad,  $\langle u \rangle$ , en diferentes localizaciones.  $z = 1\text{cm}$



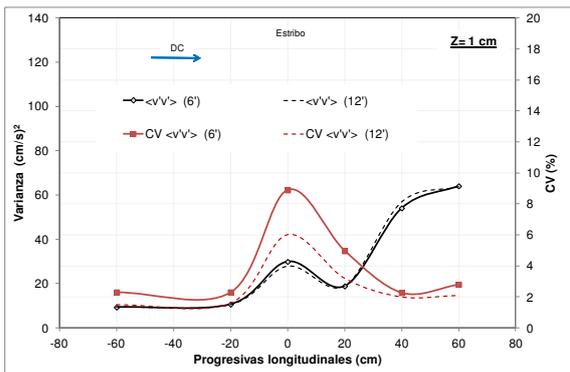
**Figura II.61.-** Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de la componente transversal del vector velocidad,  $\langle v \rangle$ , en diferentes localizaciones.  $z = 1\text{cm}$



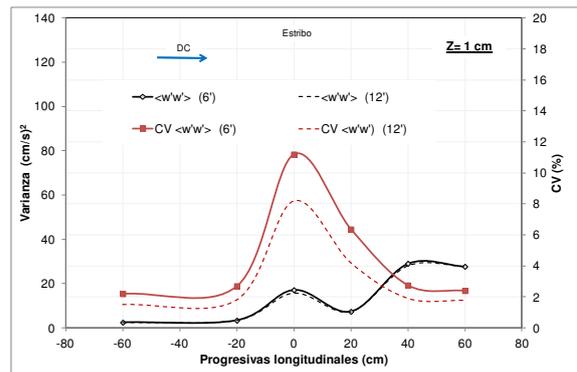
**Figura II.62.-** Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de la componente vertical del vector velocidad,  $\langle w \rangle$ , en diferentes localizaciones.  $z = 1\text{ cm}$



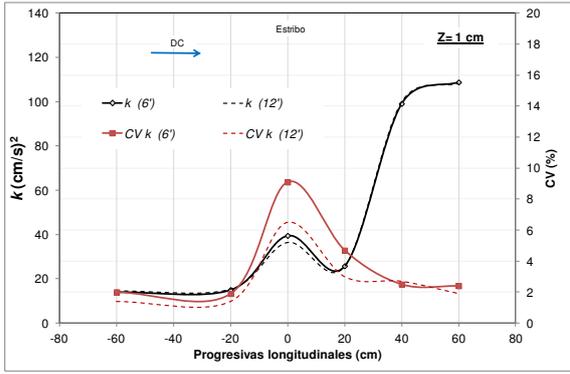
**Figura II.63.-** Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de la varianza de la componente longitudinal del vector velocidad,  $\langle u^2 \rangle$ , en diferentes localizaciones.  $z = 1\text{ cm}$



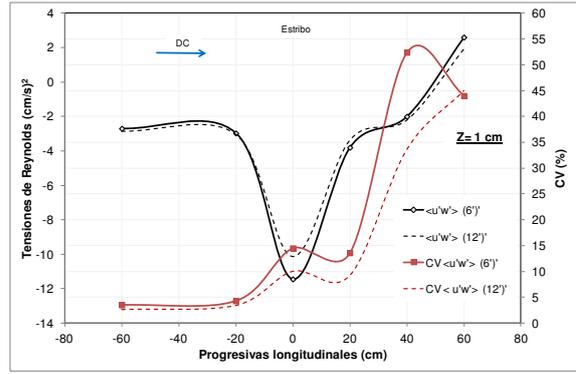
**Figura II.64.-** Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de la varianza de la componente transversal del vector velocidad,  $\langle v^2 \rangle$ , en diferentes localizaciones.  $z = 1\text{ cm}$



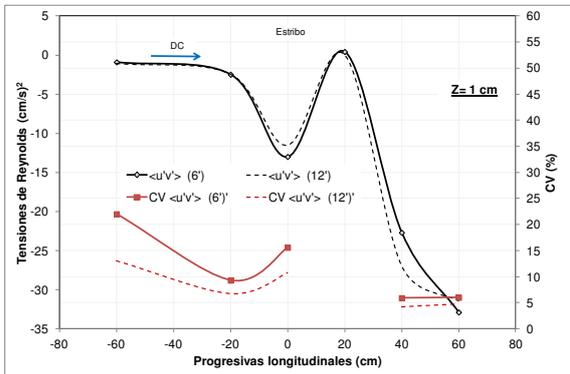
**Figura II.65.-** Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de la varianza de la componente vertical del vector velocidad,  $\langle w^2 \rangle$ , en diferentes localizaciones.  $z = 1\text{ cm}$



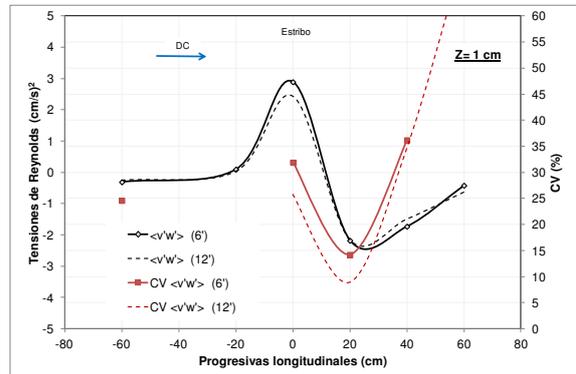
**Figura II.66.-** Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad,  $k$ , en diferentes localizaciones.  $z = 1\text{ cm}$



**Figura II.67.-** Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de las tensiones de Reynolds  $\langle u'w' \rangle$  en diferentes localizaciones.  $z = 1\text{ cm}$



**Figura II.68.-** Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de las tensiones de Reynolds  $\langle u'v' \rangle$  en diferentes localizaciones.  $z = 1\text{ cm}$



**Figura II.69.-** Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de las tensiones de Reynolds  $\langle v'w' \rangle$  en diferentes localizaciones.  $z = 1\text{ cm}$

A partir de estas figuras se puede concluir que:

Las velocidades medias longitudinales (Figura II.60) están bien caracterizadas (valores de CV menores a 1.5%) en todas las progresivas. Las velocidades medias en la transversal (Figura II.61), están bien caracterizadas entre los progresivos -60 cm a 40 cm, con un máximo valor de CV encontrado entre esas localizaciones de 3 %. En la posición más aguas abajo analizada CV resultó 55% (tiempo de 6 minutos) o 29 % (tiempo de 12 minutos), los cuales se asocian con el valor medio de velocidad transversal en esa localización que fue próximo a cero. En estos casos un indicador más robusto de la

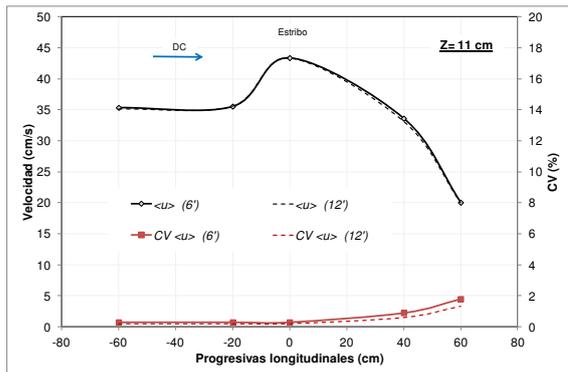
incertidumbre es el desvío estándar, como se discutió previamente. Se observa que el CV correspondiente a las velocidades medias en la vertical (Figura II.62) resultó menor al 10 % en todas las localizaciones, excepto en la sección donde se implanta el estribo (progresiva 0 cm), en la que para un tiempo de medición de 6 minutos el CV fue de 17 %, mejorando al 10 % aproximadamente, cuando se considera un tiempo de medición de 12 minutos. Las varianzas de las componentes longitudinal, transversal y vertical de velocidad ( $\langle u'^2 \rangle$ ,  $\langle v'^2 \rangle$ ,  $\langle w'^2 \rangle$ ), (Figuras II.63, II.64 y II.65) están bien caracterizadas en todas las posiciones analizadas. En progresiva 0 cm (sección del estribo) los CV alcanzan su mayor valor. Por esa razón, los valores de  $k$  (Figura II.66) están bien caracterizados en todo el sector analizado. El valor del CV en progresiva 0 cm fue de 9%, para 6 minutos y de 6.5 % para 12 minutos. En el resto de las localizaciones se mantuvo por debajo de 5%.

Con respecto a los esfuerzos de Reynolds, en particular  $\langle u'w' \rangle$  (Figura II.67), se observa que el CV resultó menor a 5 % aguas arriba de la sección donde se encuentra el estribo. Para progresivas entre 0 y 20 cm, el CV fue 15 % para 6 minutos y 10 % para 12 minutos. Secciones más aguas abajo, el CV es del orden de 55% (6 minutos) y 35 % (12 minutos).

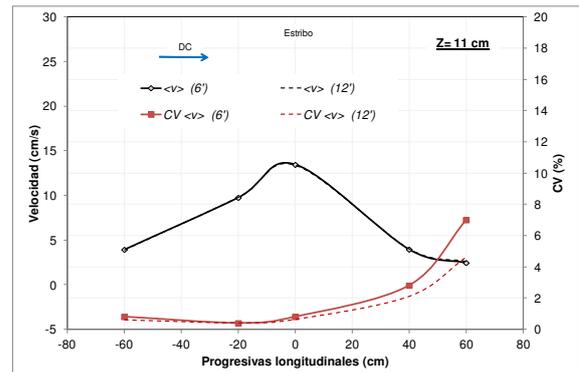
En lo que se refiere al esfuerzo  $\langle u'v' \rangle$  (Figura II.68), se destaca que la magnitud de dicho parámetro resulta significativa en las inmediaciones del estribo y aguas abajo a partir de la progresiva  $x=40$  cm, sectores donde de acuerdo a los valores de los CV encontrados este parámetro se encuentra bien caracterizado. En efecto para  $x=0$  cm, el CV fue de 15% (6 minutos) y de 10% (12 minutos).

Aguas abajo de la progresiva longitudinal 40 cm el CV fue del orden del 5%. Finalmente, se observan valores significativos del coeficiente de variación correspondiente a  $\langle v'w' \rangle$  (Figura II.69) aguas abajo del estribo.

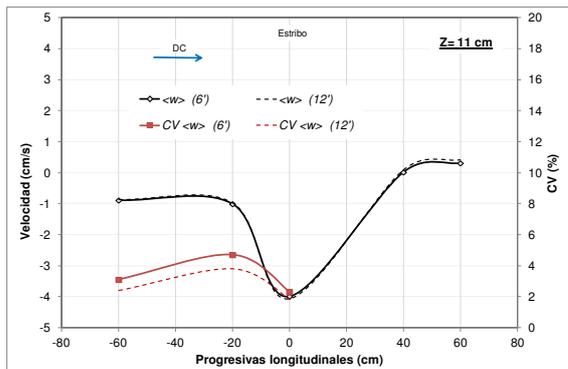
Las Figuras II.70 a II.79 resumen los resultados encontrados a partir del análisis de incertidumbre realizado a los datos derivados de las mediciones efectuadas en todas las progresivas consideradas, correspondientes a una distancia desde el fondo de  $z=11$  cm.



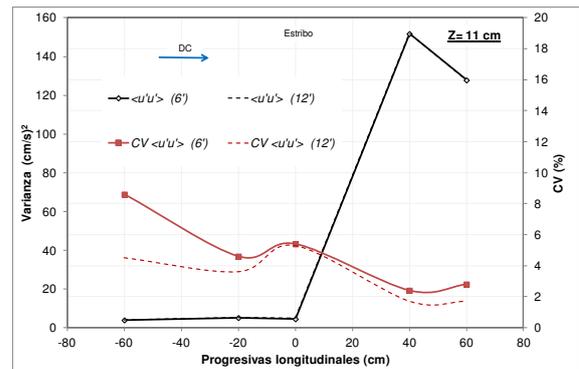
**Figura II.70.-** Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de la componente longitudinal del vector velocidad,  $\langle u \rangle$  en diferentes localizaciones.  $z=11\text{ cm}$



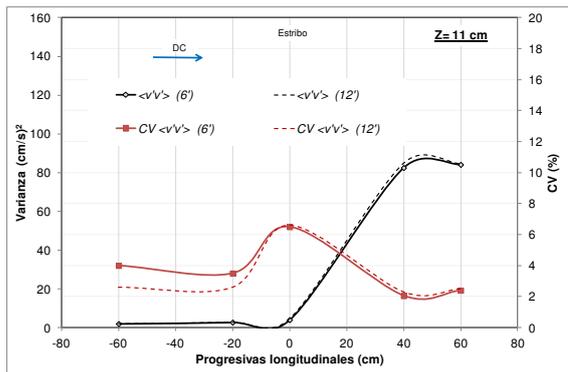
**Figura II.71.-** Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de la componente transversal del vector velocidad,  $\langle v \rangle$ , en diferentes localizaciones.  $z=11\text{ cm}$



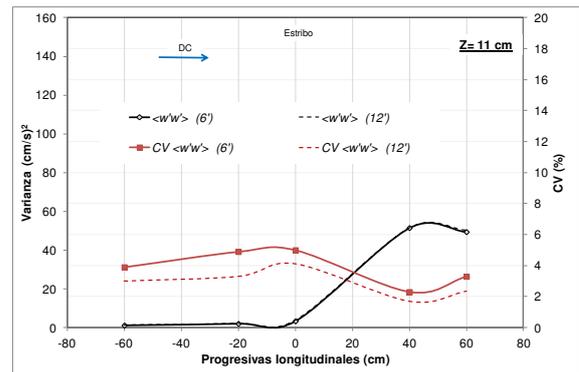
**Figura II.72.-** Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de la componente vertical del vector velocidad,  $\langle w \rangle$ , en diferentes localizaciones.  $z=11\text{ cm}$



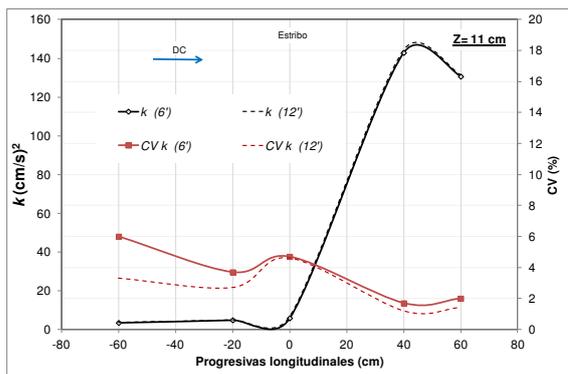
**Figura II.73.-** Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de la varianza de la componente longitudinal del vector velocidad,  $\langle u'^2 \rangle$ , en diferentes localizaciones.  $z=11\text{ cm}$



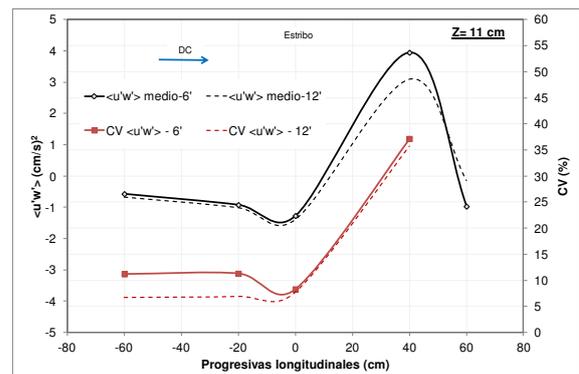
**Figura II.74.-** Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de la varianza de la componente transversal del vector velocidad,  $\langle v'^2 \rangle$ , en diferentes localizaciones.  $z = 11\text{cm}$



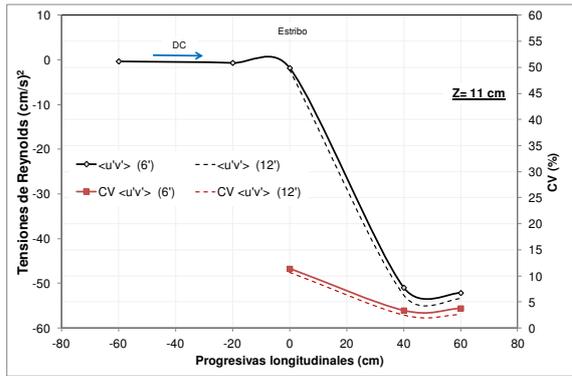
**Figura II.75.-** Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de la varianza de la componente vertical del vector velocidad,  $\langle w'^2 \rangle$ , en diferentes localizaciones.  $z = 11\text{cm}$



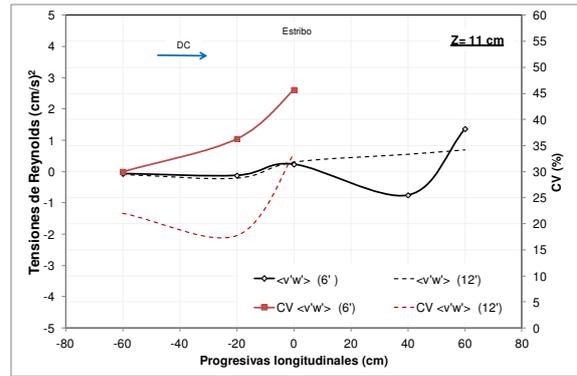
**Figura II.76.-** Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad,  $k$ , en diferentes localizaciones.  $z = 11\text{cm}$



**Figura II.77.-** Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de las tensiones de Reynolds  $\langle u'w' \rangle$  en diferentes localizaciones.  $z = 11\text{cm}$



**Figura II.78.-** Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de las tensiones de Reynolds  $\langle u'v' \rangle$  en diferentes localizaciones.  $z = 11\text{cm}$



**Figura II.79.-** Valores medios y coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de las tensiones de Reynolds  $\langle v'w' \rangle$  en diferentes localizaciones.  $z = 11\text{cm}$

A partir de estas figuras se puede concluir que las velocidades medias longitudinales,  $\langle u \rangle$ , (Figura II.70) están bien caracterizadas con los tiempos de medición empleados. En todos los casos el coeficiente de variación, CV, fue menor al 2 %. Las velocidades medias en la transversal,  $\langle v \rangle$ , (Figura II.71), están bien caracterizadas ya que los valores de CV hasta la progresiva  $x=40\text{ cm}$  fue menor al 3%. Para  $x=60\text{ cm}$  el valor de  $CV=7\%$  (6 minutos) y  $CV=4.6\%$  (12 minutos). Las velocidades medias en la vertical,  $\langle w \rangle$ , (Figura II.72) están bien caracterizadas con los tiempos de medición empleados hasta  $x=0$  (sección donde se emplaza el estribo). Aguas abajo del estribo las velocidades  $\langle w \rangle$  presentaron magnitudes muy pequeñas, por lo que el CV no permite concluir respecto de la incertidumbre de dicha variable. Las varianzas de las componentes longitudinal, transversal y vertical de velocidad ( $\langle u'^2 \rangle$ ,  $\langle v'^2 \rangle$ ,  $\langle w'^2 \rangle$ ), (Figuras II.73, II.74 y II.75) están bien caracterizadas en todas las posiciones analizadas, razón por lo cual también lo está la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad,  $k$ , (Figura II.76).

En lo que se refiere a los esfuerzos de Reynolds, en particular  $\langle u'w' \rangle$  (Figura II.77), los valores de CV encontrados aguas arriba del estribo, hasta  $x=0\text{ cm}$ , fueron menores al 10 %, por lo que este parámetro se encuentra bien caracterizado cuando se mide con los tiempos considerados. En las secciones aguas abajo de esa localización, aumenta el nivel de incertidumbre para este parámetro, con valores de CV del orden del 35 %. Con respecto al esfuerzo  $\langle u'v' \rangle$  (Figura II.78), se destaca que aguas arriba de la sección de emplazamiento del estribo la magnitud del parámetro es pequeña, por lo no se reporta el CV. Aguas abajo

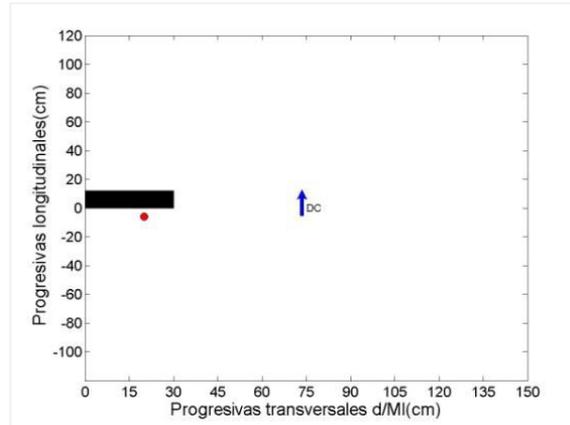
del estribo, el parámetro resulta más significativo; los CV encontrados, menores al 10% (5% en la sección más aguas abajo) indican que en este sector los valores de las tensiones que se obtengan resultarán representativas. Finalmente, se observaron en general magnitudes muy pequeñas de  $\langle v'w' \rangle$  (Figura II.79), por lo que el CV no permite concluir respecto de la incertidumbre de dicha variable.

En síntesis, el análisis de incertidumbre realizado en función del tiempo de medición, para las dos profundidades estudiadas en la línea longitudinal coincidente con la progresiva transversal 45cm resulta un acuerdo entre las observaciones que se derivan de las mediciones en las proximidades del fondo y de las que se adquirieron en  $z=11$  cm. En este análisis se concluye que las velocidades medias, varianzas y la energía cinética turbulenta están bien caracterizadas con los tiempos de medición empleados. Por otra parte las tensiones de Reynolds  $\langle u'w' \rangle$  presentan baja incertidumbre hasta la sección donde se ubica el estribo mientras que en el sector aguas abajo, donde está presente la capa de corte, la incertidumbre aumenta (CV=35-50% aproximadamente).

Las tensiones de Reynolds  $\langle u'v \rangle$  presentan magnitudes significativas a partir de la sección donde se ubica el estribo. Este sector se encuentra bien caracterizado con el tiempo de medición empleado. Finalmente se observaron incertidumbres significativas en las tensiones de Reynolds  $\langle v'w' \rangle$ .

#### II.6.2.4.c Zona de recirculación aguas arriba del estribo

Se analizaron series de velocidad registradas a 6 cm de la cara aguas arriba del estribo en la progresiva transversal  $y=20$  cm (Figura II.80). Se contó con una medición realizada en las proximidades del fondo, esto es  $z=1$  cm y otra en un nivel más elevado,  $z=13$  cm.

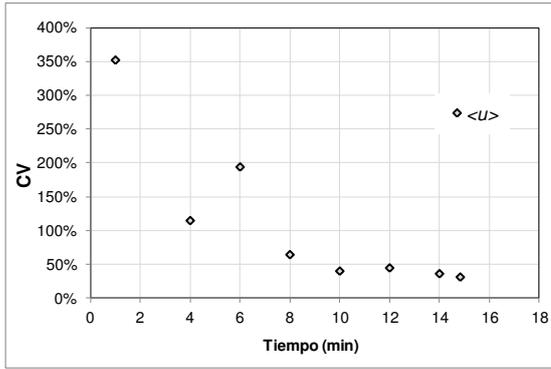


**Figura II.80.-** Localización de las mediciones representativas del flujo aguas arriba del estribo

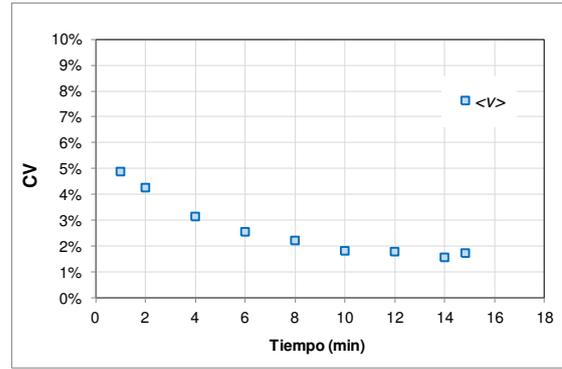
En las figuras II.81 a II.85 se presentan los coeficientes de variación correspondientes a las estimaciones de  $\langle u \rangle$ ,  $\langle v \rangle$ ,  $\langle w \rangle$ ,  $\langle u'^2 \rangle$ ,  $\langle v'^2 \rangle$ ,  $\langle w'^2 \rangle$ ,  $k$ ,  $\langle u'w' \rangle$ ,  $\langle u'v' \rangle$  y  $\langle v'w' \rangle$  evaluados a partir de los resultados que arrojó la aplicación de la técnica MBB a la serie de velocidades obtenidas en  $z=1$  cm. De la observación de estos resultados se desprende que:

Para lograr una buena caracterización de  $\langle u \rangle$ , (Fig. II.81), se requiere de un tiempo de medición muy largo, superior al que presentó la serie que aquí se analizó. Con 12 minutos se logra una pobre caracterización, con un coeficiente de variación,  $CV \cong 50 \%$ . La incertidumbre en la determinación de  $\langle v \rangle$  (Fig. II.82) resultó pequeña, con un CV inferior a 3%. Los coeficientes de variación para la estimación de las varianzas  $\langle u'^2 \rangle$ ,  $\langle v'^2 \rangle$ ,  $\langle w'^2 \rangle$ , (Fig. II.83), variaron entre 5%-8%, para un tiempo de medición de 6 minutos y entre 3%-5%, para un tiempo de 12 minutos, por lo que se considera que las mismas están bien caracterizadas. Del mismo modo, se observa que la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad,  $k$ , (Fig. II.84) será representativa, con  $CV \cong 4\%$  para 6 minutos y  $CV \cong 2.6 \%$  para 12 minutos de medición. Los coeficientes de variación para las tensiones de Reynolds,  $\langle u'w' \rangle$ ,  $\langle u'v' \rangle$ ,  $\langle v'w' \rangle$ , (Fig. II.85) estuvieron entre 16%-23%, para un tiempo de medición de 6 minutos y entre 10%-16%, para 12 minutos, por lo que se considera que el grado de incertidumbre para dichos parámetros es aceptable, sobre todo cuando se evalúan a partir de series de velocidades medidas durante 12 minutos.

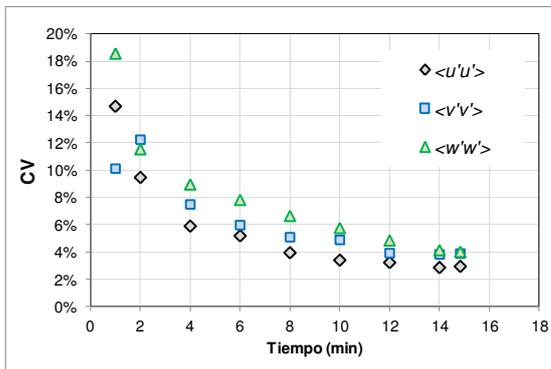
Las figura II.86 demuestra que la magnitud de  $\langle w \rangle$  resulta próxima a cero, por lo que el CV no permite concluir respecto de la incertidumbre de dicha variable. La figura II.87 permite observar como el desvío disminuye en la medida que el tiempo de medición aumenta.



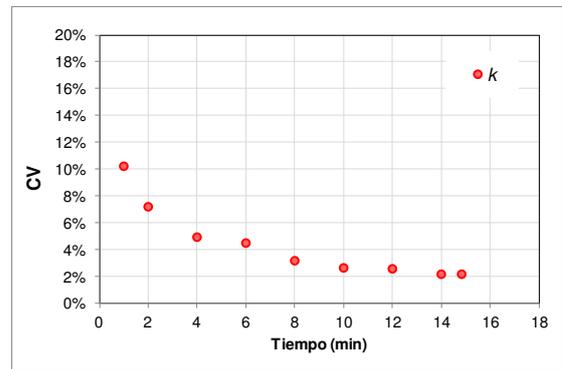
**Figura II.81.-** Coeficientes de variación de las estimaciones de la componente longitudinal de velocidad,  $\langle u \rangle$ .  $z = 1\text{cm}$



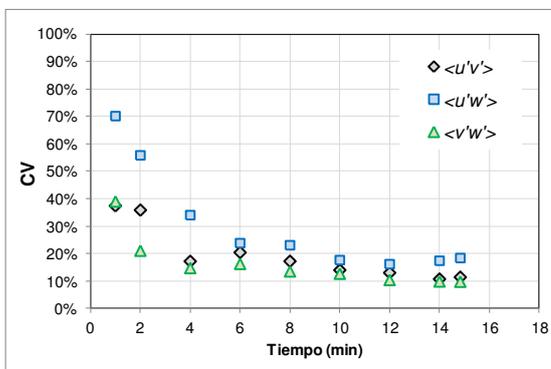
**Figura II.82.-** Coeficientes de variación de las estimaciones de la componente transversal de velocidad,  $\langle v \rangle$ .  $z = 1\text{cm}$



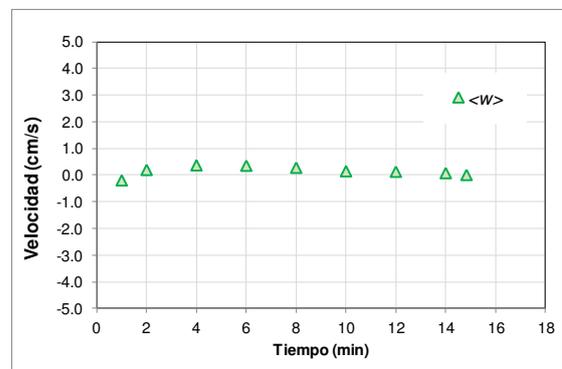
**Figura II.83.-** Coeficientes de variación de las estimaciones de las varianzas,  $\langle u'^2 \rangle$ ,  $\langle v'^2 \rangle$ ,  $\langle w'^2 \rangle$ .  $z = 1\text{cm}$



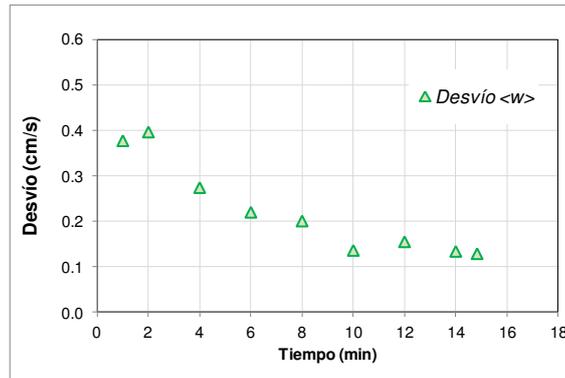
**Figura II.84.-** Coeficientes de variación de las estimaciones de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad,  $k$ .  $z = 1\text{cm}$



**Figura II.85.-** Coeficientes de variación de las estimaciones de las tensiones de Reynolds  $\langle u'w' \rangle$ ,  $\langle u'v' \rangle$ ,  $\langle v'w' \rangle$ .  $z = 1\text{cm}$



**Figura II.86.-** Velocidades medias verticales,  $\langle w \rangle$ , como una función del tiempo.  $z = 1\text{cm}$



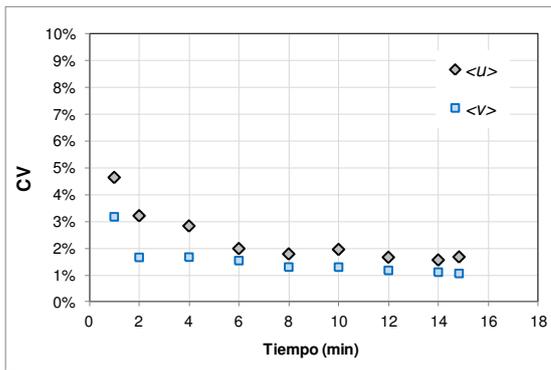
**Figura II.87.-** Desvíos correspondientes a las estimaciones de las velocidades medias verticales,  $\langle w \rangle$ , como una función del tiempo.  $z = 1\text{cm}$

En las figuras II.88 a II.91 se presentan los coeficientes de variación de las estimaciones de  $\langle u \rangle$ ,  $\langle v \rangle$ ,  $\langle u'^2 \rangle$ ,  $\langle v'^2 \rangle$ ,  $\langle w'^2 \rangle$ ,  $k$ ,  $\langle u'w' \rangle$ ,  $\langle u'v' \rangle$ ,  $\langle v'w' \rangle$  evaluados a partir de los resultados que arrojó la aplicación de la técnica de MBB a la serie de velocidades obtenida en  $z=13$  cm. Dichas figuras sugieren que las velocidades medias,  $\langle u \rangle$ , (Fig. II.88), están bien caracterizadas con los tiempos de medición empleados, así lo indican los coeficientes de variación encontrados,  $CV=2\%$ , cuando se considera un tiempo de 6 minutos y  $CV= 1.7\%$  para un tiempo de 12 minutos. Para las velocidades medias transversales,  $\langle v \rangle$  (Fig. II.88) valen las mismas consideraciones que para las velocidades longitudinales, con  $CV= 1.5\%$  para 6 minutos y  $CV=1.2\%$  para 12 minutos. Los coeficientes de variación para las estimaciones de las varianzas  $\langle u'^2 \rangle$ ,  $\langle v'^2 \rangle$ ,  $\langle w'^2 \rangle$  resultaron entre  $6\%-7.5\%$  para 6 minutos y entre  $4\%-6\%$  para 12 minutos, por lo que se considera que estos parámetros estarán bien caracterizados en esta localización con los tiempos de medición utilizados.

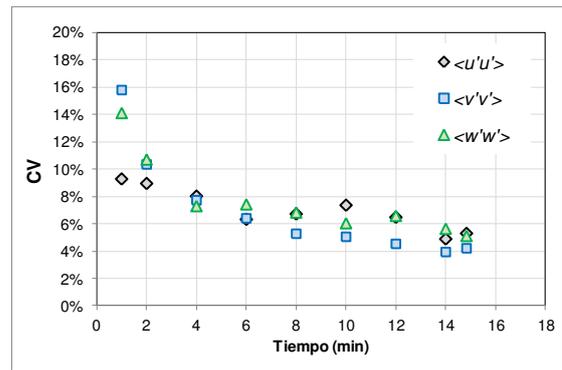
El análisis realizado para la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad,  $k$ , (Fig. II.90) indica que este parámetro presenta el mismo comportamiento que el obtenido para el caso de las varianzas, siendo los CV del orden del  $5\%$  para los dos tiempos considerados. Los resultados encontrados para el caso de las tensiones de Reynolds,  $\langle u'w' \rangle$ , (Fig. II.91) indican que se requiere de un tiempo relativamente largo para lograr una adecuada caracterización. Los coeficientes obtenidos fueron  $CV= 40\%$  para 6 minutos de medición y  $CV=20\%$  para 12 minutos de medición. Con respecto a las tensiones de Reynolds,  $\langle u'v' \rangle$ , (Fig. II.91), se puede concluir que se logra una caracterización adecuada, para 6 minutos

CV= 25% y para 12 minutos CV=20%. Las tensiones de Reynolds  $\langle v'w' \rangle$  son las que presentan menor incertidumbre (Fig. II.91), tal como lo demuestran los coeficientes encontrados, CV=15 % (6minutos) y CV= 13% (12 minutos).

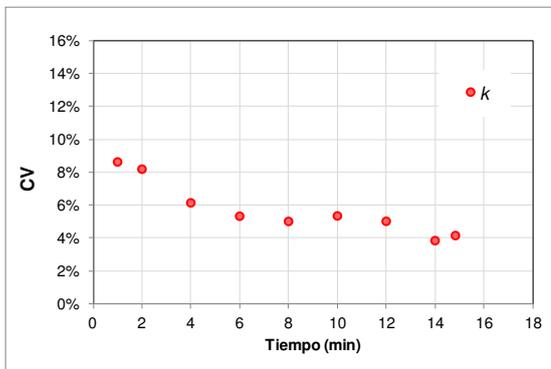
Las figuras II.92 y II.93 muestran la variación de la media correspondiente a la componente vertical del vector velocidad,  $\langle w \rangle$  y los desvíos asociados, en función del tiempo de medición. De dichas figuras se concluye que CV no puede proporcionar información respecto de la incertidumbre en la determinación de este parámetro.



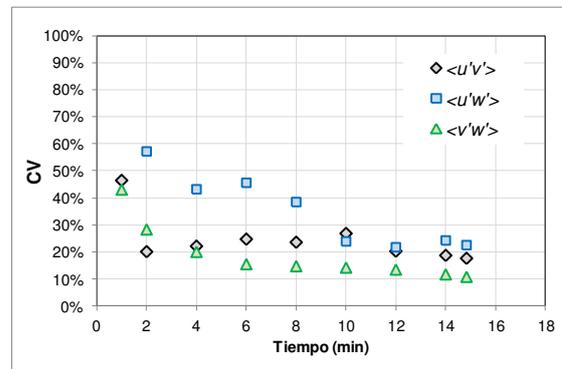
**Figura II.88.-** Coeficientes de variación de las estimaciones de las componentes longitudinal y transversal de velocidad,  $\langle u \rangle$  y  $\langle v \rangle$ .  $z = 13\text{cm}$



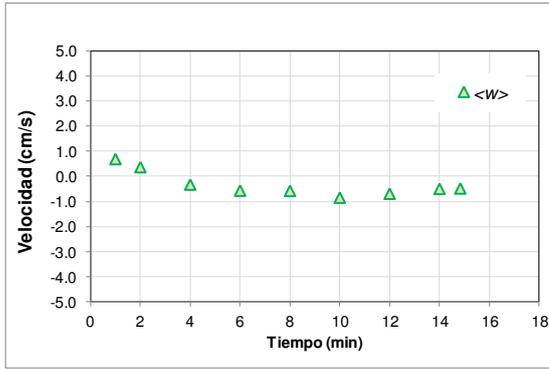
**Figura II.89.-** Coeficientes de variación de las estimaciones de las varianzas  $\langle u'^2 \rangle$ ,  $\langle v'^2 \rangle$ ,  $\langle w'^2 \rangle$ .  $z = 13\text{cm}$



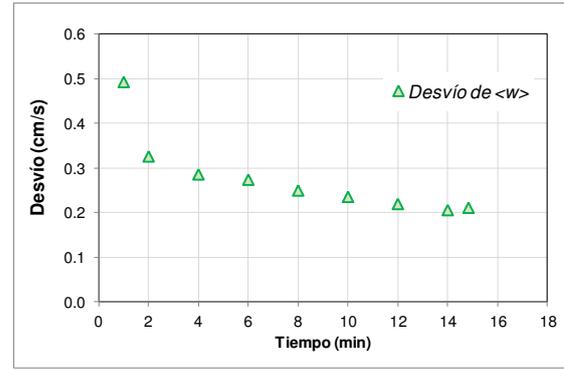
**Figura II.90.-** Coeficientes de variación de las estimaciones de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad,  $k$ .  $z = 13\text{cm}$



**Figura II.91.-** Coeficientes de variación de las estimaciones de las tensiones de Reynolds  $\langle u'w' \rangle$ ,  $\langle u'v' \rangle$ ,  $\langle v'w' \rangle$ .  $z = 13\text{cm}$



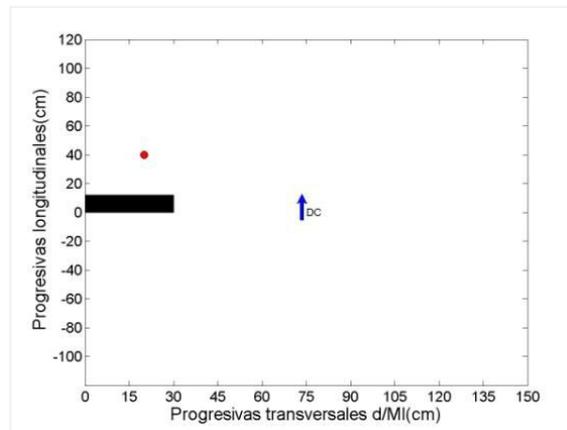
**Figura II.92.-** Velocidades medias verticales,  $\langle w \rangle$ , como una función del tiempo.  $z = 13\text{cm}$



**Figura II.93.-** Desvíos de las estimaciones de las velocidades medias verticales,  $\langle w \rangle$ , como una función del tiempo.  $z=13\text{cm}$

II.6.2.4.d Zona de recirculación aguas abajo del estribo

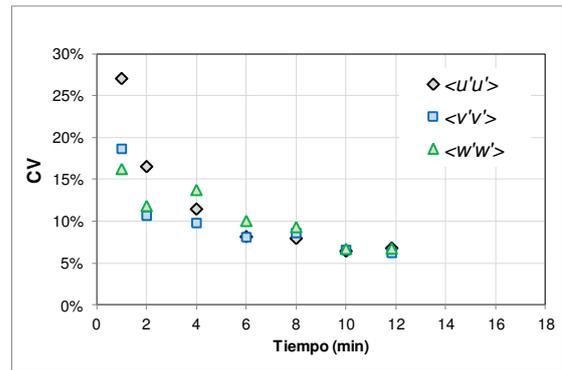
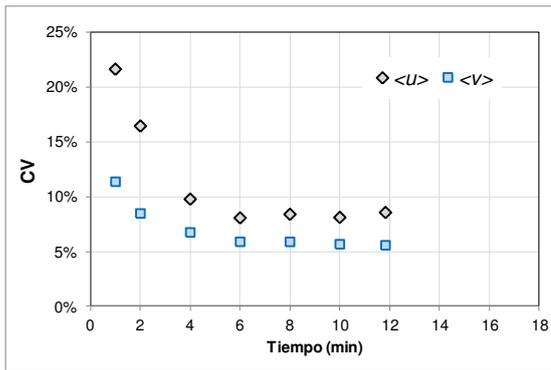
La incertidumbre en la estimación de los parámetros de la turbulencia en la zona de recirculación que se genera aguas abajo del estribo se analizó a 40 cm, en esa dirección, de la cara aguas arriba del estribo, en la progresiva transversal 20 cm (Figura II.94). En ese lugar las mediciones se realizaron en dos posiciones respecto del fondo,  $z=1\text{cm}$  y  $z=13\text{ cm}$ . La duración total de ambas mediciones fue de 15 minutos.



**Figura II.94.-** Localización de las mediciones representativas del flujo aguas abajo del estribo

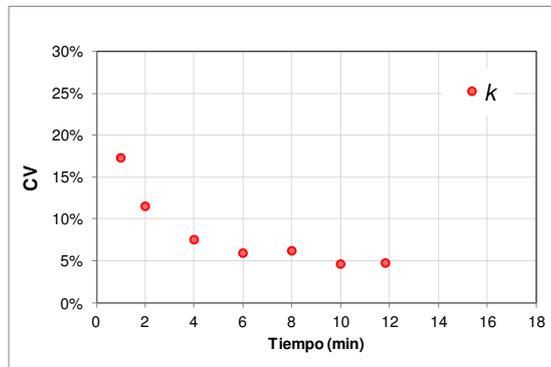
En las figuras II.95 a II.101 se resumen los principales resultados de la aplicación de la técnica de MBB en el punto ubicado 1 cm por encima del lecho ( $z = 1\text{cm}$ ). Se representa la variación de los coeficientes de variación,  $CV$ , con el tiempo de medición, para las componentes longitudinal y transversal del vector velocidad,  $\langle u \rangle$  y  $\langle v \rangle$  (Fig. II.95) las varianzas de las tres componentes de velocidad,  $\langle u'^2 \rangle$ ,  $\langle v'^2 \rangle$ ,  $\langle w'^2 \rangle$  (Fig. II.96) y de la

energía asociada a las fluctuaciones de velocidad,  $k$ , (Fig. II.97). No se muestran el comportamiento de  $CV$  para la componente vertical de velocidades,  $\langle w \rangle$ , y para las tensiones de Reynolds  $\langle u'w' \rangle$ ,  $\langle u'v' \rangle$ ,  $\langle v'w' \rangle$ . En su lugar se incluye la variación con el tiempo de los valores medios (Fig. 98 y Fig. 100), los cuales resultaron próximos a cero, y los desvíos correspondientes (Fig. 99 y Fig. 101). Del análisis de las figuras II.95 a II.101 se observa que la incertidumbre en la determinación de los parámetros turbulentos resulta aceptable para las velocidades medias,  $\langle u \rangle$ , ( $CV \cong 8\%$ ) y  $\langle v \rangle$  ( $CV \cong 5\%$ ); para las varianzas de las tres componentes de velocidad ( $CV \cong 9\%$ , tiempo de 6 minutos;  $CV \cong 6\%$ , tiempo de 12 minutos) y para la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad ( $CV \cong 6\%$ , tiempo de 6 minutos;  $CV \cong 4.5\%$ , tiempo de 12 minutos).

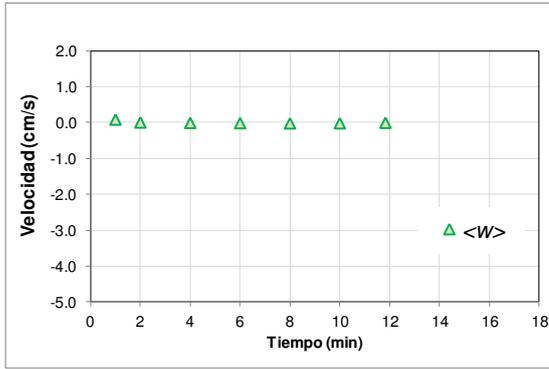


**Figura II.95.-** Coeficientes de variación de las estimaciones de las componentes longitudinal y transversal de la velocidad,  $u$  y  $v$ .  $z = 1$  cm

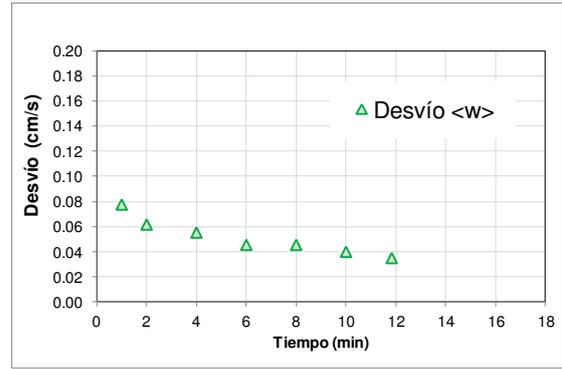
**Figura II.96.-** Coeficientes de variación de las estimaciones de las varianzas,  $\langle u'^2 \rangle$ ,  $\langle v'^2 \rangle$ ,  $\langle w'^2 \rangle$ .  $z = 1$  cm



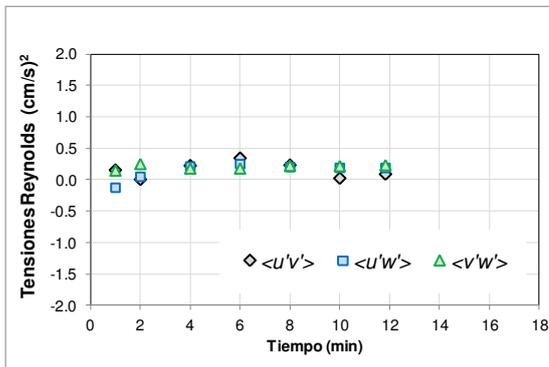
**Figura II.97.-** Coeficientes de variación de las estimaciones de la energía asociada a la fluctuaciones de velocidad,  $k$ .  $z = 1$  cm



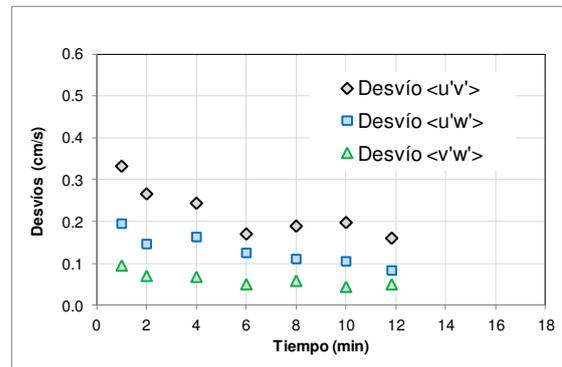
**Figura II.98.-** Velocidades medias  $\langle w \rangle$  como una función del tiempo.  $z = 1\text{ cm}$



**Figura II.99.-** Desvíos de las estimaciones de las velocidades medias  $\langle w \rangle$  como una función del tiempo.  $z = 1\text{ cm}$



**Figura II.100.-** Tensiones medias  $\langle u'v' \rangle$ ,  $\langle u'w' \rangle$ ,  $\langle v'w' \rangle$  como una función del tiempo.  $z = 1\text{ cm}$

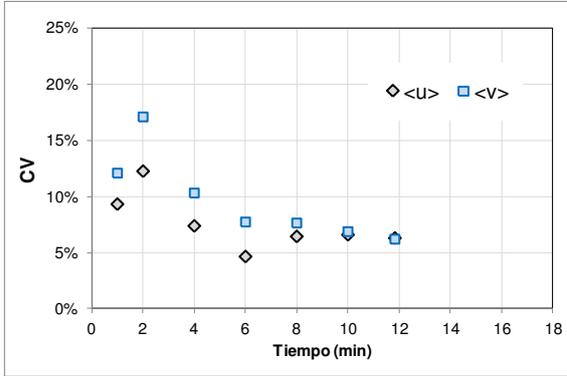


**Figura II.101.-** Desvíos de las estimaciones de las tensiones  $\langle u'v' \rangle$ ,  $\langle u'w' \rangle$ ,  $\langle v'w' \rangle$ , como una función del tiempo.  $z = 1\text{ cm}$

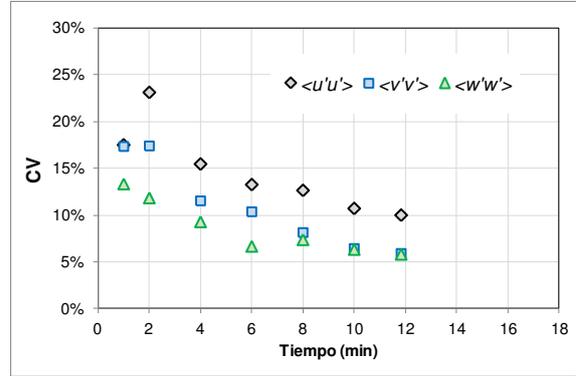
Los resultados obtenidos al aplicar la técnica de MBB a las mediciones realizadas en el punto ubicado 13 cm por encima del nivel del lecho se presentan en las figuras II.102 a II.109. Se muestra el comportamiento de los coeficientes de variación,  $CV$ , con el tiempo para las estimaciones de  $\langle u \rangle$ ,  $\langle v \rangle$ ,  $\langle u'^2 \rangle$ ,  $\langle v'^2 \rangle$ ,  $\langle w'^2 \rangle$ ,  $k$ ,  $\langle u'v' \rangle$ ,  $\langle v'w' \rangle$ . Las magnitudes de  $\langle w \rangle$  y de las tensiones  $\langle u'w' \rangle$ , ambas próximas a cero (Fig. II.106 y Fig. II.108), justifican el hecho que para ambos parámetros se presente la variación con el tiempo de sus valores medios y desvíos correspondientes (Fig. II.107 y Fig. II.109).

Se observa que las velocidades medias  $\langle u \rangle$  y  $\langle v \rangle$ , (Fig. II.102), se encuentran bien caracterizadas cuando las mediciones se realizan con 6 o 12 minutos, ya que los coeficientes de variación encontrados para ambos parámetros fue del orden de 6%; lo

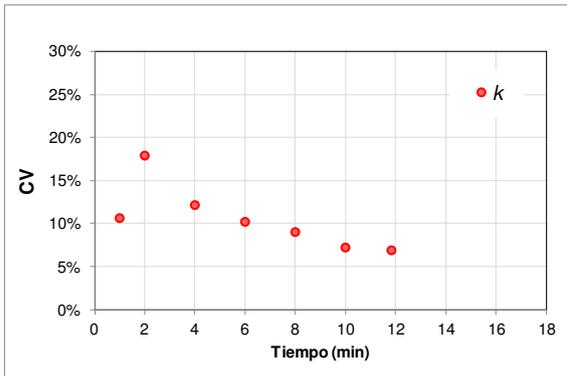
mismo ocurre para las varianzas  $\langle u'^2 \rangle$ ,  $\langle v'^2 \rangle$ ,  $\langle w'^2 \rangle$  (Fig. II.103), y la energía  $k$ , (Fig. II.104), las que presentaron un  $CV \cong 10\%$  para 6 minutos y  $CV \cong 6\%$  para 12 minutos, respectivamente.



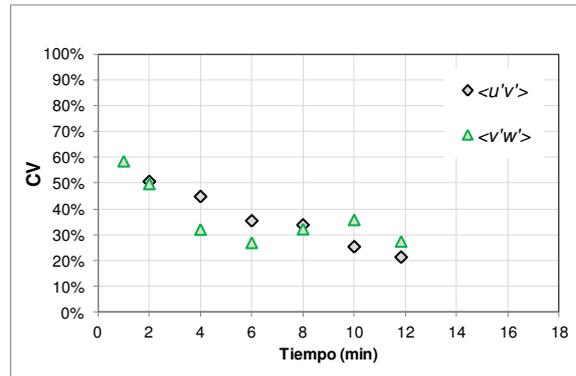
**Figura II.102.-** Coeficientes de variación de las estimaciones de las componentes longitudinal y transversal de la velocidad,  $\langle u \rangle$  y  $\langle v \rangle$ .  $z = 13$  cm



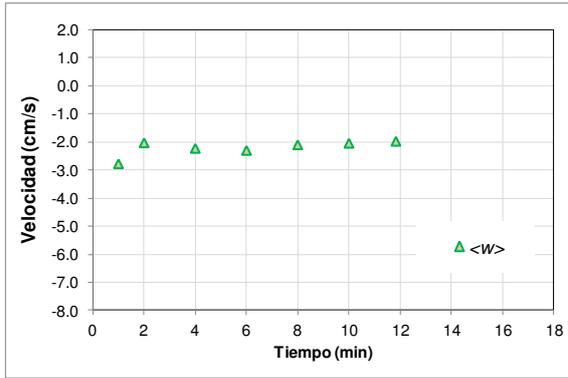
**Figura II.103.-** Coeficientes de variación de las estimaciones de las varianzas  $\langle u'^2 \rangle$ ,  $\langle v'^2 \rangle$ ,  $\langle w'^2 \rangle$ .  $z = 13$  cm



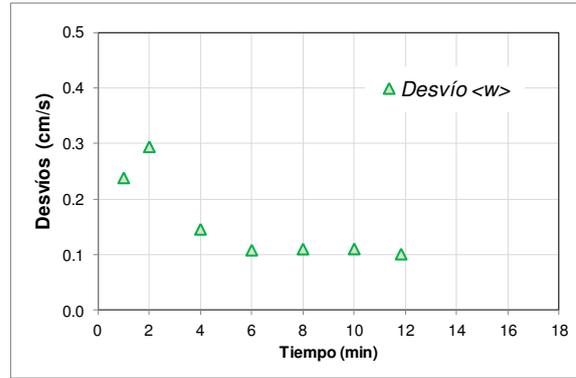
**Figura II.104.-** Coeficientes de variación de la estimación de la energía asociada a la fluctuaciones de velocidad,  $k$ .  $z = 13$  cm



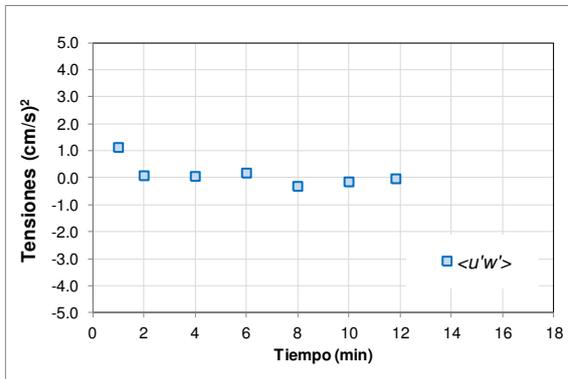
**Figura II.105.-** Coeficientes de variación de las estimaciones de las tensiones de Reynolds  $\langle u'v' \rangle$ ,  $\langle v'w' \rangle$ .  $z = 13$  cm



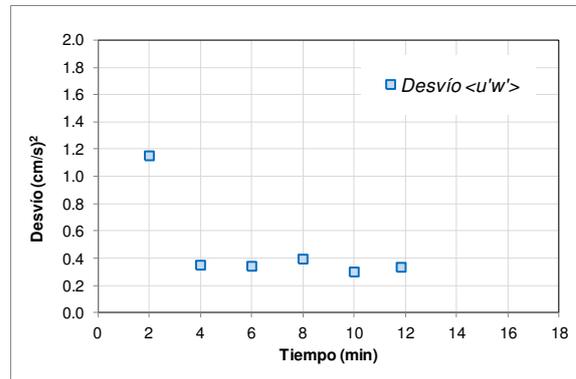
**Figura II.106.-** Velocidades medias  $\langle w \rangle$  como una función del tiempo.  $z = 13\text{ cm}$



**Figura II.107.-** Desvíos de las estimaciones de las velocidades medias  $\langle w \rangle$  como una función del tiempo.  $z = 13\text{ cm}$



**Figura II.108.-** Tensiones medias  $\langle u'w' \rangle$  como una función del tiempo.  $z = 13\text{ cm}$



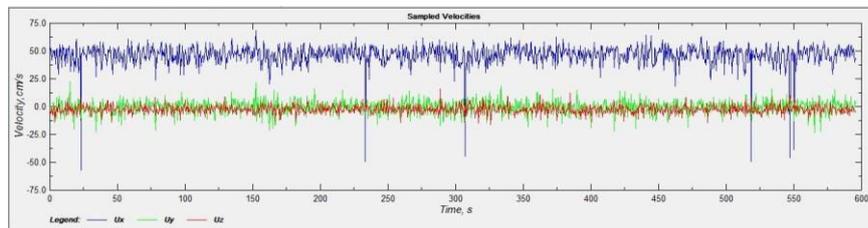
**Figura II.109.-** Desvíos de las estimaciones de las tensiones medias,  $\langle u'w' \rangle$ , como una función del tiempo.  $z = 13\text{ cm}$

### II.6.2.5 Procesamiento de las señales de velocidad registradas con ADV

Aun cuando en las secciones precedentes se detallaron las actividades requeridas para optimizar la implementación de los ADV en relación a la presencia de partículas suspendidas en el flujo, la existencia de zonas de interferencia acústica, resolución espacial y temporal de registro del instrumento y tiempos de medición óptimos, las señales de velocidad del flujo presentan un determinado nivel de ruido y en algunos casos, valores anómalos de velocidad (denominados “Spikes” en inglés). A continuación se detallan las actividades de procesamiento realizadas para minimizar estos efectos en los parámetros turbulentos estimados en base a las señales de velocidad registrados con el ADV Vectrino.

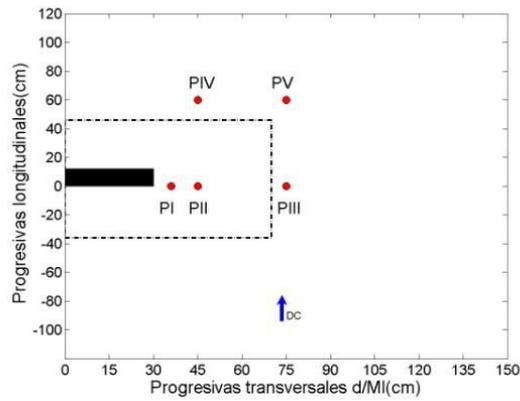
#### II.6.2.5.a Evaluación y reemplazo de valores anómalos

Las señales de velocidad del flujo pueden presentar, en algunos casos, valores extremos anómalos (Fig. II.110) originados por distintas razones, como por ejemplo, la presencia de velocidades de flujo que exceden al rango de velocidad seleccionado en la configuración del instrumento, por contaminación de pulsos previos, reflejados desde contornos de geometrías complejas, por falta de partículas trazadoras en el agua, por niveles de turbulencia muy elevados, etc. Estos valores anómalos presentes en la señal generan errores (sesgo) en la determinación de los parámetros de la turbulencia que se estiman sobre la base de estas series. Existen diversos métodos en la actualidad que permiten identificar y remover los valores anómalos, los que deben usarse en conjunto con alguna estrategia de reemplazo del dato removido. El reemplazo del valor anómalo identificado no es requerido para el cálculo de los momentos estadísticos pero es esencial para los cálculos de todos los parámetros de la turbulencia derivados a partir del espectro de energía y de las funciones de autocorrelación.



**Figura II.110.-** Ejemplo de señales de velocidad del flujo con presencia de valores extremos anómalos

Con el fin de definir estrategias óptimas de procesamiento de señales de velocidades medidas con ADV se evaluaron las diferencias relativas entre los valores de los parámetros turbulentos estimados utilizando señales de velocidad procesadas con distintas técnicas de detección, remoción y reemplazo de esos valores anómalos. Para ello, se utilizaron series de velocidades medidas para las condiciones experimentales correspondientes al EVI, posicionadas en las verticales que se muestran en la figura II.111.



**Figura II.111.-** Localizaciones en las cuales se registraron señales de velocidad para evaluar métodos de detección, remoción y reemplazo de valores anómalos.

En la tabla II.5 se resumen las coordenadas  $(x,y,z)$  de cada punto de medición considerado para el análisis.

**Tabla II.5** Coordenadas de las localizaciones en las cuales se registraron señales de velocidad para evaluar métodos de detección, remoción y reemplazo de valores anómalos.

Punto	x (cm)	y (cm)	z (cm)
PI-1	0	36	2.8
PI-3	0	36	10.3
PII-1	0	45	2.9
PII-3	0	45	10.2
PIII-1	0	75	1.2
PIII-4	0	75	11.3
PIV-1	60	45	1.0
PIV-4	60	45	11.1
PV-1	60	75	1.0
PV-4	60	75	11.1

A las series de velocidad seleccionadas se les aplicaron tres combinaciones de técnicas que

permiten identificar y remover valores anómalos (filtrado) y métodos de reemplazo del dato removido.

Las técnicas de filtrado utilizadas fueron:

- Umbral en un diagrama fase–espacio (PST, por sus siglas en inglés). Goring y Nikora (2002) propusieron una técnica que usa un mapa 3D fase-espacio, en el que se representan las fluctuaciones turbulentas,  $u'$ , sus primeras y segundas derivadas,  $\Delta u'$  y  $\Delta^2 u'$ . Las primeras y segundas derivadas son aproximadas a partir de una serie de tiempo discreta de  $u'$  usando el método de diferencia centrado

$$\Delta u'_i \cong u'_{i+1} - u'_{i-1} \quad (\text{II.8})$$

$$\Delta^2 u'_i \cong \Delta u'_{i+1} - \Delta u'_{i-1} \cong u'_{i+2} - u'_{i-2} \quad (\text{II.9})$$

Se obtienen tres gráficas  $u'$  vs  $\Delta u'$ ;  $u'$  vs  $\Delta^2 u'$  y  $\Delta u'$  vs  $\Delta^2 u'$ . Para que un dato se considere inválido debe caer fuera de la elipse prescrita. Por ejemplo, si se considera  $u' - \Delta u'$  las coordenadas del centro de la elipse serán las medias, mientras que las longitudes de los ejes serán:

$$l_u = \lambda_N \langle u'^2 \rangle^{1/2}; \quad l_{\Delta u} = \lambda_N \langle \Delta u'^2 \rangle^{1/2} \quad (\text{II.10})$$

Donde:  $\lambda_N = \sqrt{2 \ln N_m}$

$N_m$ : número de mediciones de la muestra

$\langle u'^2 \rangle^{1/2}$ ,  $\langle \Delta u'^2 \rangle^{1/2}$ : desvío estándar de  $u$  y  $\Delta u$

- Umbral modificado en un diagrama de fase–espacio (mPST, por sus siglas en inglés). Parsheh et al. (2010) propusieron una versión modificada en la cual se utilizan constantes proporcionadas por el usuario ( $C_1$  y  $C_2$ ) para marcar datos de modo tal que nunca sean identificados como valores anómalos si  $-C_1 \theta_u \leq u' \leq C_1 \theta_u$  (donde  $\theta_u$  es la desviación absoluta media de la velocidad) y sean excluidos si  $|u'| > C_2 \theta_u \lambda_N$ . El valor  $C_2$  se usa para prefiltrar los datos, antes que el método PST se aplique.
- Aceleración Crítica (CA). Esta técnica considera como datos anómalos aquellos valores de velocidad de flujo que generen aceleraciones mayores o (menores) que un cierto valor crítico “ $\lambda_g g$ ” (donde  $g$  aceleración de la gravedad).

Como técnicas de reemplazo del valor anómalo se consideraron:

- Último valor correcto (LGV, por sus siglas en inglés). Con este método se reemplaza el valor anómalo con el último dato correcto registrado previamente.
- Polinomio en base a 12 puntos vecinos (12PP). Esta técnica, propuesta por Goring y Nikora, (2002), reemplaza al valor anómalo con el interpolado a partir del ajuste a un polinomio de tercer grado, utilizando 12 puntos válidos a cada lado del dato anómalo (24 datos en total).
- Interpolación lineal (LI). El valor de reemplazo se obtiene por una simple interpolación lineal entre los datos válidos registrados antes y después del valor anómalo.

Las combinaciones de técnicas de filtrado y reemplazo de valores anómalos utilizadas en este estudio se resumen en la tabla siguiente:

**Tabla II.6** Técnicas de filtrado y reemplazo de valores anómalos utilizadas en este estudio

Combinación	Método de filtrado	Método de reemplazo
F1	mPST	LGV
F2	PST	12PP
F3	CA	LI

Las combinaciones F1 y F2 han sido presentadas y evaluadas por Jesson et al.(2013), quienes desarrollaron una aplicación Java para análisis de datos experimentales, la cual se puede bajar libremente de [www.mikejesson.com](http://www.mikejesson.com). La opción F3 esta implementada en el software ExploreV, recomendado por Nortek para procesar los datos de velocidad obtenidos con un ADV Vectrino como el utilizado.

En la tabla II.7 se muestran las velocidades y varianzas en las direcciones  $x$ ,  $z$ ; esto es,  $\langle u \rangle$ ;  $\langle w \rangle$ ;  $\langle u'^2 \rangle$ ;  $\langle w'^2 \rangle$  y las tensiones  $\langle u'v' \rangle$ ;  $\langle u'w' \rangle$  evaluadas a partir de las series de velocidades medidas sin filtrar y las series filtradas y rellenas con la combinación de métodos antes señalados (F1, F2, F3).

**Tabla II.7** Resumen de parámetros turbulentos evaluados a partir de las series de velocidades sin filtrar valores anómalos y filtradas y rellenadas con las combinaciones de métodos seleccionados (F1, F2, F3)

Punto	Combinación métodos	$\langle u \rangle$ (cm/s)	$\langle w \rangle$ (cm/s)	$\langle u'^2 \rangle$ (cm/s) <sup>2</sup>	$\langle w'^2 \rangle$ (cm/s) <sup>2</sup>	$\langle u'v' \rangle$ (cm/s) <sup>2</sup>	$\langle u'w' \rangle$ (cm/s) <sup>2</sup>
PI-1	S/F	32.82	-7.10	245.54	18.31	-79.93	-31.61
PI-1	F1	35.30	-7.60	13.99	12.49	6.47	0.67
PI-1	F2	35.28	-7.83	12.95	12.08	5.49	1.23
PI-1	F3	35.26	-7.63	14.85	14.13	6.95	1.11
PI-3	S/F	41.96	-3.15	20.30	8.10	2.82	-1.48
PI-3	F1	42.16	-3.48	5.15	7.59	3.24	0.54
PI-3	F2	42.16	-3.51	5.07	7.71	3.23	0.54
PI-3	F3	42.13	-3.18	5.51	7.86	3.44	0.57
PII-1	S/F	33.71	-1.41	24.83	17.18	7.06	-8.53
PII-1	F1	33.77	-1.52	21.83	15.09	6.57	-7.24
PII-1	F2	33.74	-1.43	21.39	16.03	6.80	-7.78
PII-1	F3	33.73	-1.17	21.97	16.29	7.05	-8.02
PII-3	S/F	43.75	-4.23	4.77	2.99	1.81	-0.73
PII-3	F1	43.78	-4.27	3.93	2.87	1.74	-0.64
PII-3	F2	43.78	-4.26	3.86	2.85	1.72	-0.66
PII-3	F3	43.76	-3.94	3.99	2.92	1.76	-0.66
PIII-1	S/F	30.78	-2.25	15.18	3.38	0.44	-3.26
PIII-1	F1	30.78	-2.26	14.94	3.36	0.37	-3.25
PIII-1	F2	30.79	-2.26	14.87	3.31	0.31	-3.23
PIII-1	F3	30.76	-2.01	14.91	3.45	0.39	-3.41
PIII-4	S/F	42.62	-1.83	4.22	1.67	0.17	-1.06
PIII-4	F1	42.62	-1.84	4.16	1.65	0.15	-1.04
PIII-4	F2	42.63	-1.84	4.10	1.61	0.15	-1.02
PIII-4	F3	42.62	-1.52	4.13	1.64	0.17	-1.02
PIV-1	S/F	24.43	-1.36	111.98	29.58	32.06	-2.86
PIV-1	F1	24.44	-1.35	110.51	29.50	31.44	-2.85
PIV-1	F2	24.43	-1.37	109.76	28.90	31.16	-2.98
PIV-1	F3	24.43	-1.17	110.40	29.23	31.30	-2.10
PIV-4	S/F	18.78	-1.23	133.68	48.16	46.76	-9.59
PIV-4	F1	18.82	-1.22	132.27	46.88	46.59	-9.70
PIV-4	F2	18.80	-1.24	130.57	46.78	45.95	-9.58
PIV-4	F3	18.76	-1.35	132.23	50.07	46.18	-10.21
PV-1	S/F	39.12	-1.61	15.43	4.02	2.14	-2.24
PV-1	F1	39.12	-1.61	15.31	4.01	2.02	-2.24
PV-1	F2	39.13	-1.61	15.07	3.99	1.94	-2.21
PV-1	F3	39.11	-1.31	14.89	4.04	1.95	-2.27
PV-4	S/F	50.95	-2.29	5.18	2.16	0.04	-1.09
PV-4	F1	50.98	-2.30	3.48	2.06	-0.02	-1.12
PV-4	F2	50.98	-2.30	3.45	2.08	-0.03	-1.12
PV-4	F3	50.97	-1.92	3.54	2.10	-0.02	-1.12

Nota: S/F: serie de datos sin filtrar

En la tabla II.8 se muestran diferencias relativas,  $DR$ , entre las velocidades  $\langle u \rangle$ ;  $\langle w \rangle$ ; las varianzas  $\langle u'^2 \rangle$ ;  $\langle w'^2 \rangle$  y tensiones de Reynolds  $\langle u'v' \rangle$  y  $\langle u'w' \rangle$  estimadas a partir de las series de velocidades en las cuales no se han filtrado los valores anómalos y las mismas señales a la que se les aplicó algunas de las combinaciones de métodos de filtrado y de reemplazo de esos valores.

**Tabla II.8** Diferencias relativas entre parámetros turbulentos estimados a partir de las series de velocidades sin filtrar y la misma serie a la que se le aplicó alguna de las combinaciones de métodos de filtrado y de reemplazo de valores anómalos

Punto	Combinación métodos	Diferencia relativa, $DR$ (%)					
		$DR_{\langle u \rangle}$	$DR_{\langle w \rangle}$	$DR_{\langle u'^2 \rangle}$	$DR_{\langle w'^2 \rangle}$	$DR_{\langle u'v' \rangle}$	$DR_{\langle u'w' \rangle}$
PI-1	F1	7.55	7.06	94.30	31.81	108.09	102.12
PI-1	F2	7.50	10.33	94.72	34.02	106.87	103.88
PI-1	F3	7.43	7.54	93.95	22.87	108.69	103.52
PI-3	F1	0.48	10.56	74.65	6.37	14.68	136.25
PI-3	F2	0.47	11.56	75.04	4.83	14.25	136.66
PI-3	F3	0.40	1.13	72.86	2.94	21.82	138.94
PII-1	F1	0.16	7.78	12.07	12.14	6.62	15.10
PII-1	F2	0.09	1.12	13.97	6.68	3.77	8.74
PII-1	F3	0.04	17.46	11.50	5.13	0.16	5.97
PII-3	F1	0.05	0.58	17.58	4.10	3.63	12.61
PII-3	F2	0.07	0.30	19.00	4.74	5.08	9.99
PII-3	F3	0.02	7.27	16.33	2.41	2.48	10.25
PIII-1	F1	0.02	0.44	1.55	0.61	16.21	0.35
PIII-1	F2	0.03	0.52	2.07	2.10	28.73	0.98
PIII-1	F3	0.07	10.72	1.78	2.53	10.16	4.66
PIII-4	F1	0.01	0.22	1.42	1.01	13.44	1.71
PIII-4	F2	0.03	0.47	2.99	3.67	12.46	2.46
PIII-4	F3	0.01	17.08	2.15	1.97	4.65	3.42
PIV-1	F1	0.07	0.24	1.31	0.29	1.95	0.53
PIV-1	F2	0.01	0.84	1.98	2.30	2.80	4.10
PIV-1	F3	0.00	13.70	1.41	1.20	2.38	26.47
PIV-4	F1	0.20	0.14	1.05	2.66	0.36	1.19
PIV-4	F2	0.08	1.06	2.33	2.85	1.73	0.08
PIV-4	F3	0.10	10.32	1.09	3.98	1.23	6.47
PV-1	F1	0.01	0.04	0.80	0.29	5.31	0.18
PV-1	F2	0.03	0.03	2.36	0.78	9.03	1.03
PV-1	F3	0.03	18.40	3.49	0.50	8.61	1.42
PV-4	F1	0.06	0.18	32.90	4.57	146.90	3.26
PV-4	F2	0.05	0.29	33.41	3.68	164.52	2.94
PV-4	F3	0.03	16.13	31.67	2.87	139.29	3.16

En tabla II.8 se aprecia que en las localizaciones PI, PII, PV posicionados en las inmediaciones de la capa de corte, se encontraron diferencias importantes en los parámetros evaluados cuando se aplicaron las metodologías de filtrado y reemplazo mencionadas, pudiendo identificarse correcciones del orden del 70%-90 % para las varianzas y superiores al 100 % para las tensiones de Reynolds. En correspondencias con dichos valores, las velocidades medias presentaron correcciones próximas al 7 %. Generalmente las tres combinaciones empleadas (*F1*, *F2* y *F3*) no presentaron diferencias significativas entre ellas.

A partir de los resultados obtenidos se consideró adecuado para este estudio, el procesamiento de la totalidad de las señales de velocidades registradas con ADV aplicando como técnica de filtrado de valores anómalos a la técnica basada en el umbral de un diagrama fase-espacio, PST, (Goring y Nikora, 2002) y como técnica de reemplazo del valor anómalo identificado a la que utiliza el polinomio ajustado a 12 puntos vecinos (12PP), propuesto por Goring y Nikora, (2002).

#### **II.6.2.6 Evaluación de los niveles de ruido en las señales de velocidad registradas**

La presencia de ruido en las señales de velocidad puede afectar la estimación de ciertos parámetros de la turbulencia. Nikora y Goring (1998) señalaron que la principal fuente de ruido en las mediciones que se realizan con velocímetros acústico Doppler, es el ruido Doppler. García et al. (2005) analizaron la importancia relativa de la energía del ruido Doppler con respecto al total de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad capturada con los ADV, señalando que cuando el impacto del ruido es alto se requieren correcciones a los parámetros de la turbulencia que se estimen.

El ruido Doppler tiene las características del ruido blanco (Nikora y Goring 1998; Lemming y Lhermitte 1999; Mc Lelland y Nicholas 2000) con una distribución de probabilidad Gaussiana, esto es, media cero y varianza finita (Nikora y Goring 1998), así como también un espectro de potencia plano (Anderson y Lohrmann 1995), es decir afecta de igual modo a todas las componentes de frecuencias de la señal ( espectro de potencia constante sobre el rango de frecuencias muestreadas) lo cual indica la presencia de ruido sin correlación.

La presencia de ruido blanco en las señales de velocidad medidas con ADV no afecta el cálculo de sus valores medios (Nikora y Goring, 1998; Voulgaris y Trowbridge 1998) ni el de las Tensiones de Reynolds (McLelland y Nicholas, 2000), mientras que las estimaciones de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad se encuentra sesgada hacia valores más altos (Nikora y Goring 1998). Puesto que el ruido blanco produce falta de correlación en la señal la función de autocorrelación reduce su valor a cero más rápido que cuando se verifica presencia de ruido, al tiempo que el espectro de potencia resulta sesgado a valores altos (Lohrmann et al. 1994; Nikora y Goring 1998).

Para algunas condiciones de medición el ruido blanco se puede identificar como un aplanamiento del espectro próximo a la frecuencia de Nyquist ( $f_R/2$ ) (García et al. 2005). En esos casos Nikora y Goring (1998) sugieren que el espectro de dicho ruido se puede representar por una línea horizontal recta cuya ordenada es igual al promedio de las ordenadas espectrales del ruido. Esta técnica fue llamada “Análisis espectral” por Voulgaris y Trowbridge (1998), quienes proponen calcular la energía asociada al ruido a partir del nivel de energía detectado en la cola del espectro, en un rango de frecuencias tal que garantice 10 estimaciones para el cálculo del promedio estadístico, por ej 11.5-12.5 Hz para una frecuencia de registro de 25 Hz (García et al. 2005).

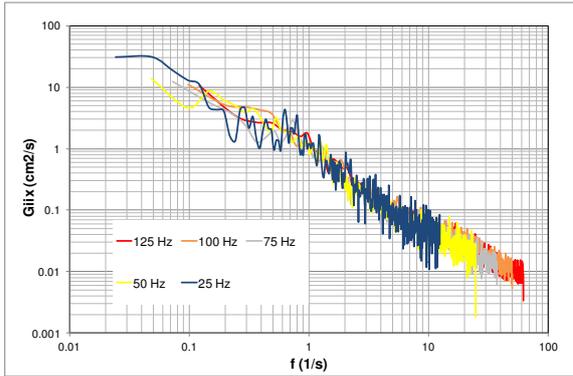
Nikora y Goring (1998) identificaron una frecuencia característica  $f_n$  (frecuencia a partir de la cual se detecta el aplanamiento en el espectro debido a la presencia de ruido), la cual divide al espectro de potencia en dos regiones. La primera de ellas corresponde a las frecuencias menores que  $f_n$ , para las que la energía real es mucho más grande que la energía del ruido, mientras que en la otra parte, con frecuencias mayores que  $f_n$ , la energía real es más débil que la del ruido. Para que la meseta o aplanamiento en el espectro resulte visible  $f_n$  debe ser menor que la frecuencia de Nyquist. García et al. (2005) demostraron que en aquellos casos en los que la energía del ruido Doppler es importante en relación a la energía verdadera de la señal se puede usar el método de “análisis espectral” para determinar el nivel de energía del ruido blanco. El espectro de potencia de cada componente de velocidad se puede corregir simplemente restando el nivel del ruido al espectro calculado a partir de los datos medidos. Las varianzas de cada componente de velocidad, y por lo tanto la energía cinética turbulenta, se pueden calcular a partir de la integración del espectro de potencia corregido. A partir de la transformada inversa de

Fourier puede estimarse la función de autocorrelación corregida por la presencia de ruido en la señal.

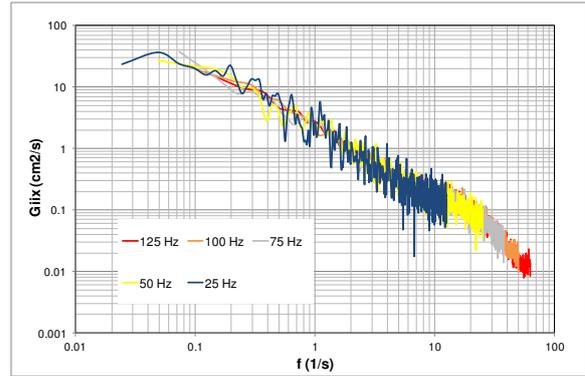
En aquellos casos en que la energía del flujo es alta y que se verifica que la frecuencia  $f_n$  es mayor a la frecuencia de Nyquist el método del “análisis espectral” no puede ser aplicado. Sin embargo García et al. (2005) demostraron que en dichos casos la contribución del ruido Doppler a la energía medida total es menor que el 10 % de la energía total verdadera.

Con el fin de analizar la importancia del ruido Doppler en las señales de velocidad medidas se presentan las figuras II.112 y II.113. En ellas se han superpuesto los espectros de energía obtenidos a partir de las componentes de velocidades longitudinales registradas con el ADV utilizando frecuencias de registro de 25, 50, 75, 100 y 125 Hz. La figura II.112 corresponde a un punto localizado en las inmediaciones del fondo, esto es  $z = 1\text{cm}$ , mientras que la figura II.113 a un punto medido en  $z = 10.7\text{ cm}$ . Ambos pertenecen a una vertical ubicada en el centro del canal, inmersa en condiciones de flujo no perturbado por la presencia del estribo, ya que los mismos se consiguieron en el *EI*.

Las figuras II.112 y II.113 demuestran que aún para las mayores frecuencias de medición no resulta visible meseta alguna o aplanamiento en los respectivos espectros, lo cual sugiere que la frecuencia  $f_n$  para los casos mostrados resultaría mayor a  $125/2\text{ Hz}$  (62.5 Hz). Tal cual fuera dicho anteriormente la frecuencia de registro adoptada fue de 50 Hz, razón por la cual se ha considerado no conveniente implementar el método de “análisis espectral” a las series de velocidades registradas, como metodología de corrección del ruido en las señales medidas. Dichas consideraciones se corresponden con la presunción de una energía del ruido Doppler relativamente pequeña, en relación a la energía real de la señal medida (García et al. 2005). De modo tal que, si se aplicara la metodología de corrección por presencia del ruido lo que se estaría extrayendo sería parte de la energía real de la señal, tal como se observa en las figuras II.112 y II.113.



**Figura II.112.-** Comparación entre espectros de energía derivados de mediciones de velocidades con 25, 50, 75, 100 y 125 Hz. Flujo no perturbado.  $z = 10.7$  cm. Componente longitudinal  $\langle u \rangle$ .



**Figura II.113.-** Comparación entre espectros de energía derivados de mediciones de velocidades con 25, 50, 75, 100 y 125 Hz. Flujo no perturbado.  $z = 1$  cm. Componente longitudinal  $\langle u \rangle$ .

Para construir las figuras II.112 y II.113 de modo tal que se observen claramente las pendientes de los espectros de energía se utilizó la función “pwelch” de Matlab, la cual estima la densidad espectral de potencia por medio del Periodograma modificado promedio de Welch (Promedia periodogramas). Por medio de esta función la serie de velocidades está segmentada en ocho secciones de igual longitud, cada una con 50% de superposición. A cada segmento se le aplica una ventana de Hamming.

# **Capítulo III: caracterización del flujo no perturbado por la presencia del estribo y la protección**

## **III.1 Introducción**

La caracterización del flujo turbulento no perturbado por la presencia del estribo, su protección y la erosión local generada es importante para contar con un patrón de flujo de referencia. Esta caracterización experimental se realiza en este estudio evaluando las distribuciones transversales de velocidades medias en la vertical y de caudales acumulados, perfiles verticales de velocidades medias en el sector central de la sección transversal del canal y su contraste con las leyes universales de resistencia del lecho. En función de ello se presentan los valores de los principales números adimensionales que caracterizan a las condiciones experimentales sostenidas en cada uno de los ensayos realizados en el marco de la presente Tesis.

Por último se contrastan las relaciones universales disponibles con las distribuciones verticales de parámetros de la turbulencia (energía cinética turbulenta, esfuerzos de Reynolds, etc.), obtenidos a partir de los datos de velocidades medidos.

## **III.2 Distribución transversal de velocidades y caudales**

Para cumplir con los objetivos planteados para esta instancia del estudio se realizaron una serie de mediciones de velocidades en la sección del canal en la que a posteriori se materializó el estribo de puente representado en la secuencia de ensayos, cuyos resultados se analizan en los capítulos siguientes.

Las mediciones de velocidad involucraron 13 perfiles distribuidos a lo ancho de la sección. En la figura III.1 se puede observar la localización de cada uno de ellos y la distribución vertical de puntos medidos en cada caso.

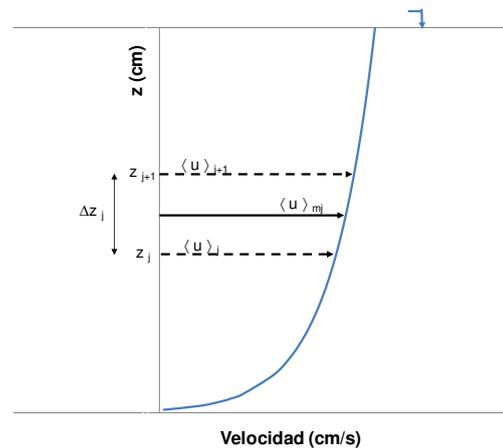
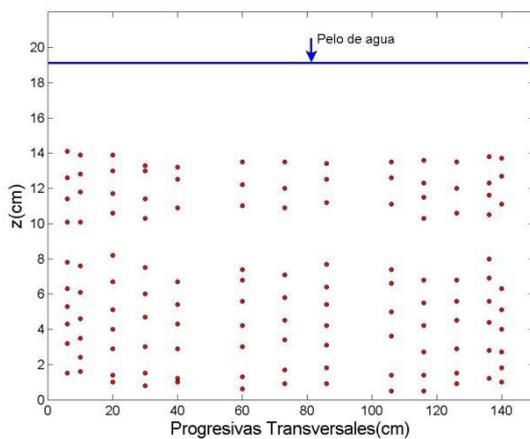
A partir de las velocidades medias,  $\langle u \rangle$ , correspondiente a cada punto, se calcularon las

velocidades medias en cada vertical,  $U$ , realizando una integración en la vertical del siguiente modo:

$$U = \frac{\sum \left( \frac{\langle u \rangle_j + \langle u \rangle_{j+1}}{2} \right) * \Delta z_j}{h} \quad (\text{III.1})$$

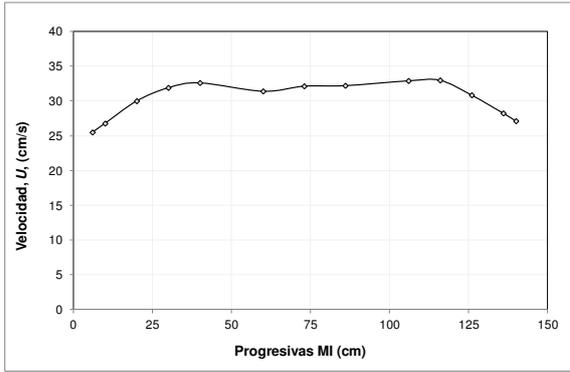
Donde:  $\langle u \rangle_j$ ,  $\langle u \rangle_{j+1}$  son las velocidades medias en dos puntos de una vertical separados una distancia  $\Delta z_j$ , (Fig. III.2)

$h$ : tirante del escurrimiento en la vertical considerada

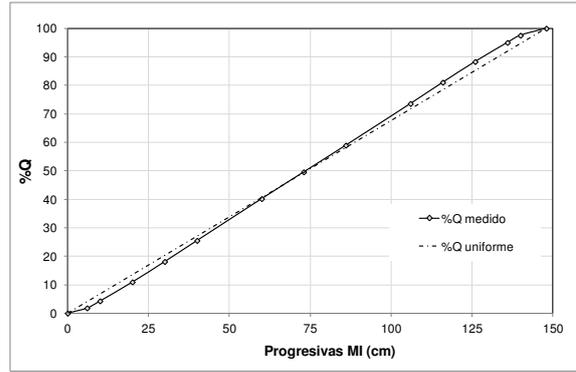


**Figura III.1.-** Localización de verticales y distribución vertical de puntos medidos para caracterizar el flujo no perturbado **Figura III.2.-** Definición de variables utilizadas en el cálculo de la velocidad media en la vertical

En la figura III.3 se representa la distribución transversal de velocidades medias en la vertical y en la figura III.4 la de caudales acumulados, en forma porcentual, obtenida a partir de las  $U$ , previamente evaluadas. Estas Figuras demuestran que el canal utilizado para los ensayos presenta un tramo central de la sección transversal en el cual puede considerarse que la distribución del flujo es aproximadamente uniforme, sector que se extiende aproximadamente durante un metro en la región central del canal.



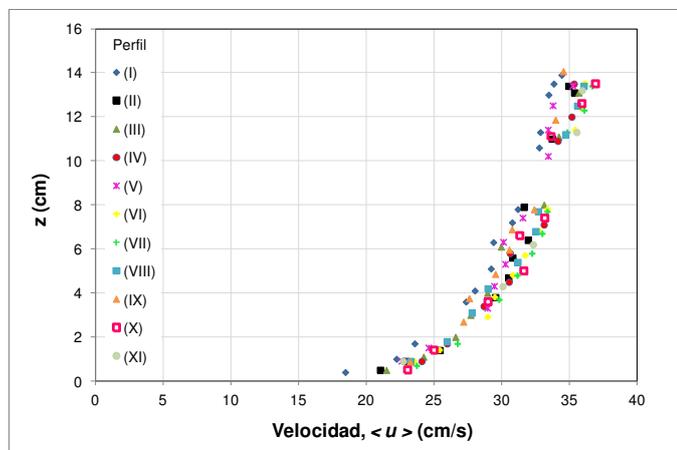
**Figura III.3.-** Distribución transversal de velocidades medias en la vertical,  $U$ , en el canal de ensayos para el flujo no perturbado



**Figura III.4.-** Comparación entre la distribución porcentual transversal de caudales acumulados, medida en el flujo no perturbado, y la distribución uniforme

### III.3 Perfiles de velocidades medias y leyes de resistencia en la región central de la sección transversal del canal

Sobre la base de perfiles de velocidades medidos en el sector central de la sección del canal, en el ensayo experimental *EI*, se caracterizó el flujo no perturbado por la presencia del estribo, el cual constituye el flujo de aproximación al mismo. Se seleccionaron para ello 11 perfiles de velocidades, los cuales se muestran en la figura III.5.



**Figura III.5.-** Perfiles de velocidad representativos del flujo no perturbado

Si se considera un flujo a superficie libre en un canal abierto, uniforme, turbulento y permanente, que tiene una profundidad promedio  $h$  y una velocidad media  $U$ , se considera

a partir de argumentos experimentales y de análisis dimensional (Schlichting 1979; Nezu y Rodi 1986) que la distribución vertical de velocidades medias del flujo está bien representada por la ley:

$$\frac{\langle u \rangle}{U_*} = \frac{1}{k_K} \ln \left[ \frac{z}{z_0} \right] \quad (\text{III.2})$$

donde:  $\langle u \rangle$ : velocidad media temporal localizada a una distancia “z” respecto del lecho

$z_0$ : altura de rugosidad, es decir la distancia respecto del lecho para la cual la velocidad del flujo tiende a cero

$k_K$ : Constante de Von Karman,  $k_K \cong 0.41$  (Nezu y Rodi 1986)

$U_*$ : velocidad de corte del flujo

Esta ley es conocida como la ley de la pared y la misma aplica solo a una capa relativamente delgada en las proximidades del lecho ( $z/h < 0.2$ ) si bien, en muchos casos, se usa como una razonable aproximación a través de la mayor parte de la profundidad del flujo.

Si el contorno del fondo es suficientemente liso, la turbulencia estará acotada en una capa extremadamente delgada cerca del lecho, conocida como subcapa viscosa. En esta región se verifica un perfil de velocidad lineal (O'Connor 1995):

$$\frac{\langle u \rangle}{U_*} = \frac{U_* z}{\nu} \quad (\text{III.3})$$

donde:  $\nu$ : viscosidad cinemática del agua

Esta ley coincide con la ley logarítmica en  $z = \delta_\nu$ , siendo  $\delta_\nu$  el espesor de la subcapa viscosa;

$$\delta_\nu = 11.6 \frac{\nu}{U_*} \quad (\text{III.4})$$

En la región logarítmica, la constante de integración que se introduce conduce a la expresión:

$$\frac{\langle u \rangle}{U_*} = \frac{1}{k_K} \ln \left[ \frac{U_* z}{\nu} \right] + 5.5 \quad (\text{III.5})$$

Por lo que en este caso:

$$z_0 = \frac{\nu}{9 U_*} \quad (\text{III.6})$$

Si  $k_s/\delta_v > 1$ , siendo  $k_s$  una altura de rugosidad efectiva, la subcapa viscosa no existe ya que los elementos de rugosidad sobresalen a dicha capa. En este caso, denominado flujo hidrodinámicamente rugoso, el perfil de velocidad está dado por:

$$\frac{\langle u \rangle}{U_*} = \frac{1}{k_K} \ln \left[ \frac{z}{k_s} \right] + 8.5 = \frac{1}{k_K} \ln \left( 30 \frac{z}{k_s} \right) \quad (\text{III.7})$$

Por lo que aquí:

$$z_0 = \frac{k_s}{30} \quad (\text{III.8})$$

Se considera flujo hidrodinámicamente liso cuando:

$$\frac{k_s}{\delta_v} \ll 1 \rightarrow \frac{U_* k_s}{\nu} \ll 11.6 \quad (\text{III.9})$$

mientras que el fondo hidrodinámicamente rugoso está presente cuando:

$$\frac{k_s}{\delta_v} \gg 1 \rightarrow \frac{U_* k_s}{\nu} \gg 11.6 \quad (\text{III.10})$$

Yalin (1992) reúne a las expresiones (III.5) y (III.7) en una única general

$$\frac{\langle u \rangle}{U_*} = \frac{1}{k_K} \ln \left[ \frac{z}{k_s} \right] + B_s \quad (\text{III.11})$$

Siendo  $B_s = f(R_{e*})$  ;

$R_{e*}$ : número de Reynolds de corte,

$$R_{e*} = \frac{k_s U_*}{\nu} \quad (\text{III.12})$$

Se tiene entonces:

→ flujo hidrodinámicamente liso:

$$R_{e*} < \approx 5 \rightarrow B_s = 5.5 + \frac{1}{k_K} \ln(R_{e*}) \quad (\text{III.13})$$

→ flujo hidrodinámicamente rugoso:

$$R_{e*} > \approx 70 \rightarrow B_s = 8.5 \quad (\text{III.14})$$

García (2008) propone estimar  $B_s$  mediante el siguiente ajuste empírico, el cual sería válido para flujos hidrodinámicamente lisos, rugosos y en transición.

$$B_s = 8.5 + (2.5 \ln(R_{e*}) - 3)e^{(-0.121[\ln(R_{e*})]^{2.42})} \quad (\text{III.15})$$

Una alternativa cuando no se conocen las características de la rugosidad del lecho es trabajar con la ley del defecto de velocidad, también conocida como la forma exterior de la ley de la pared (Schlichting 1979):

$$\frac{\langle u \rangle_{sup} - \langle u \rangle}{U_*} = -\frac{1}{k_K} \ln \left[ \frac{z}{h} \right] \quad (\text{III.16})$$

Donde:  $\langle u \rangle_{sup}$ : velocidad en la superficie del agua.

Se consideraron 11 perfiles de velocidad medidos en el ensayo **EI**, posicionados en el sector central de la sección transversal del canal. Puesto que en **EI** el estribo no estaba colocado, los perfiles se consideran representativos del flujo no perturbado por su presencia.

En primer lugar a cada perfil se le ajustó la ley del defecto de velocidad (Ecuación III.16), solo que en lugar de la velocidad superficial ( $\langle u \rangle_{sup}$ ) se consideró la velocidad medida con el ADV Vectrino más cerca de la superficie de agua. La representación de las mismas

en escala semi-logarítmica permitió obtener la velocidad de corte,  $U_*$ .

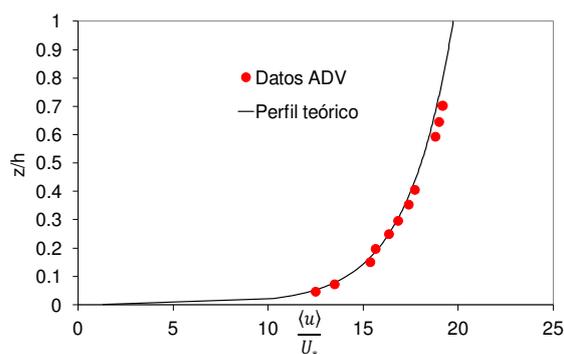
A partir del valor de  $U_*$  estimado se calculó un coeficiente de rugosidad para cada punto en que se registraron velocidades pertenecientes a un perfil dado,  $k_{sz}$ , mediante el empleo conjunto de las ecuaciones (III.11) y (III.15). Del promedio de todos los coeficientes obtenidos por perfil se consiguió un coeficiente de rugosidad representativo de cada perfil de velocidad,  $k_s$ .

En la tabla III.1 se han consignado los valores de velocidad de corte,  $U_*$ , coeficiente de rugosidad,  $k_s$ , velocidad media en la vertical,  $U$  y el número de Reynolds de corte (evaluado con la ecuación (III.12)) correspondientes a cada uno de los perfiles analizados. Se han incluido también las progresivas transversales en donde se localizó cada perfil.

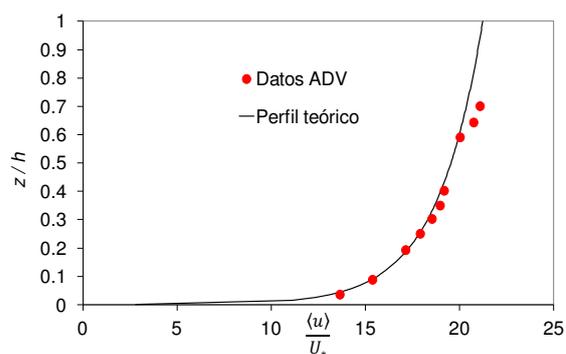
**Tabla III.1** Velocidad media en la vertical ( $U$ ), velocidad de corte ( $U_*$ ), coeficiente de rugosidad superficial ( $k_s$ ), y Reynolds de corte  $R_{e*}$  obtenidos a partir del ajuste a todos los perfiles de velocidad medidos y estadísticos de los parámetros estimados

Perfil	Progresiva Transversal (cm)	$U$ (cm/s)	$U_*$ (cm/s)	$k_s$ (cm)	$R_{e*}$
(I)	75	31.06	1.79	0.252	45.18
(II)	75	32.41	1.70	0.147	25.10
(III)	73	32.30	1.70	0.147	24.90
(IV)	73	32.64	1.70	0.139	23.64
(V)	75	31.96	1.76	0.191	33.48
(VI)	75	33.45	1.89	0.220	41.53
(VII)	75	33.52	1.74	0.137	23.82
(VIII)	86	32.75	1.93	0.283	54.67
(IX)	75	31.67	1.68	0.157	26.39
(X)	106	33.01	1.66	0.111	18.31
(XI)	105	33.32	2.00	0.313	62.59
	Promedio	32.55	1.78	0.191	
	Desvío	0.78	0.11	0.067	
	CV	2.39%	6.39%	35.22%	

En las figuras III.6 y III.7 se presentan a modo de ejemplo el ajuste logarítmico a dos de los perfiles de velocidades medidos.



**Figura III.6.-** Ajuste logarítmico del perfil de velocidades medido (VI)



**Figura III.7.-** Ajuste logarítmico del perfil de velocidades medido (VII)

A partir de los ajustes realizados se puede analizar el efecto relativo de la rigidización del lecho sobre la rugosidad superficial ( $k_s$ ). Para ello se evalúa en primer lugar el tipo de régimen de escurrimiento en las inmediaciones del lecho (rugoso, liso o transición) a partir del número de Reynolds de corte ( $Re^*$ ). Los resultados mostrados en tabla III.1 indican, que de acuerdo al régimen de transición señalado por el Reynolds de corte ( $18 < Re^* < 63$ ), la altura de rugosidad no es el único factor determinante de las condiciones del escurrimiento en las proximidades del lecho, sino que también intervienen efectos viscosos que reducen la importancia relativa de la altura de rugosidad superficial.

Por otra parte utilizando la hipótesis que si las perturbaciones introducidas a la rugosidad por el proceso de rigidización son menores a la incertidumbre en la determinación experimental de los coeficientes de rugosidad superficial,  $k_s$ , estimada para condiciones de lecho no rigidizado (coeficiente de variación  $CV=35.22\%$ , tabla III.1), podría considerarse que rigidizar el lecho con la metodología empleada, donde prácticamente no se altera la conformación superficial del mismo, no introduce variaciones apreciables en las condiciones de rugosidad asociadas con el fenómeno en estudio.

### **III.4 Parámetros y números adimensionales característicos del flujo no perturbado**

En función de los resultados obtenidos a partir del ajuste de los perfiles de velocidad antes mencionados (Tabla III.1) se presentan a continuación los principales parámetros y

números adimensionales característicos del flujo de aproximación:

- ✓ Tirante,  $h_a = 19.1$  cm
- ✓ Velocidad media en la vertical,  $U_a = 32.55$  cm (Tabla III.1)
- ✓ Velocidad de corte,  $U_{*a} = 1.78$  cm/s, (Tabla III.1)
- ✓ Número de Froude,  $F_{Ra} = \frac{U_a}{\sqrt{g h_a}} = 0.24$
- ✓ Número de Reynolds,  $R_{ea} = \frac{U_a h_a}{\nu} = 62170.5$
- ✓ Número de Reynolds de corte (en base al tamaño del sedimento),  $R_{e*} = \frac{U_{*a} d_s}{\nu} = 17.8$
- ✓ Número de Reynolds de corte (en base  $k_s$ , Tabla III.1),  $R_{e*} = \frac{U_{*a} k_s}{\nu} = 33.82$
- ✓ Velocidad de corte adimensional,  $\frac{U_{*a}}{U_{*c}} = 0.78$

### III.5 Relaciones universales de parámetros de la turbulencia

Nezu (1977) propuso las siguientes funciones universales, sobre la base de un “modelo simplificado k- $\epsilon$ ” y la teoría de auto semejanza, para la intensidad de la turbulencia en las direcciones longitudinal y transversal,  $\langle u'^2 \rangle^{\frac{1}{2}}$ ,  $\langle v'^2 \rangle^{\frac{1}{2}}$  respectivamente y para la energía cinética turbulenta,  $TKE$

$$\frac{\langle u'^2 \rangle^{\frac{1}{2}}}{U_*} = 2.3 e^{\left(-\frac{z}{h}\right)} \quad (\text{III.17})$$

$$\frac{\langle v'^2 \rangle^{\frac{1}{2}}}{U_*} = 1.63 e^{\left(-\frac{z}{h}\right)} \quad (\text{III.18})$$

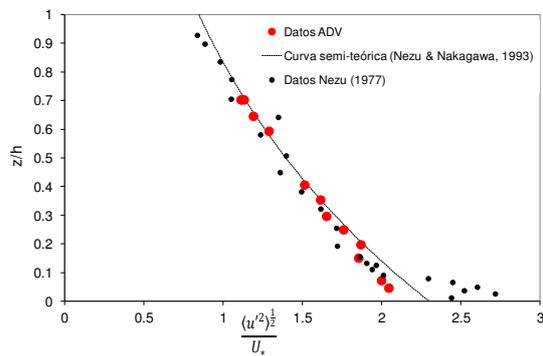
$$\frac{TKE}{U_*^2} = 4.78 e^{\left(-2\frac{z}{h}\right)} \quad (\text{III.19})$$

Para las tensiones de Reynolds  $\langle -u'w' \rangle$  se utilizó la siguiente ecuación derivada analíticamente de las expresiones del perfil de velocidades logarítmico y de cantidad de movimiento para un flujo 2D en un canal abierto (Nezu 2005):

$$\frac{\langle -u'w' \rangle}{U_*^2} = 1 - \frac{z}{h} - V_t \left( \frac{z}{h} \right) \quad (\text{III.20})$$

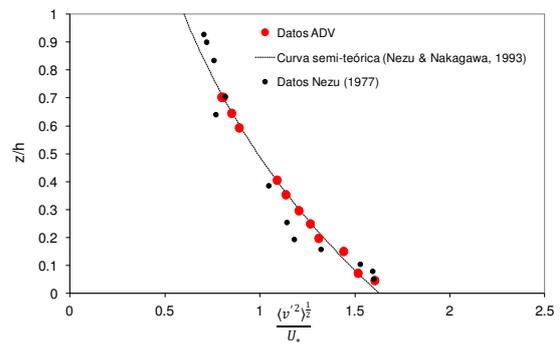
donde el término viscoso,  $V_b$ , resulta despreciable en la capa exterior.

Sobre la base de las series de velocidades medidas en esta instancia del estudio se calcularon los parámetros de la turbulencia antes señalados y se contrastó la distribución vertical de cada uno de ellos con las leyes teóricas y semi-teóricas propuestas por Nezu (1977) y datos experimentales reportados en el mismo trabajo. Se pudo contrastar el muy buen grado de ajuste de los parámetros calculados con las leyes universales (Ecuaciones (III.17) a (III.20)), tal cual como lo demuestran, a modo de ejemplo, las figuras III.8 a III.11 para el perfil (VI) y las III.12 a III.15 para el perfil (VII).



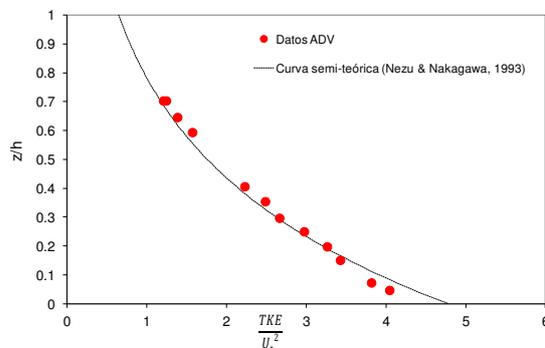
**Figura III.8.-** Distribución vertical de  $\frac{\langle u'^2 \rangle^{1/2}}{U_*}$ .

Contraste entre el perfil teórico y el obtenido a partir de datos medidos con ADV. Perfil (VI)



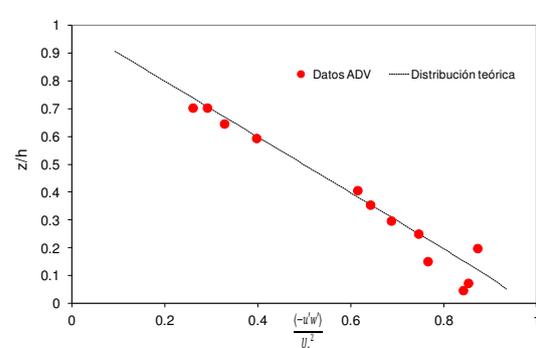
**Figura III.9.-** Distribución vertical de  $\frac{\langle v'^2 \rangle^{1/2}}{U_*}$ .

Contraste entre el perfil teórico y el obtenido a partir de datos medidos con ADV. Perfil (VI)



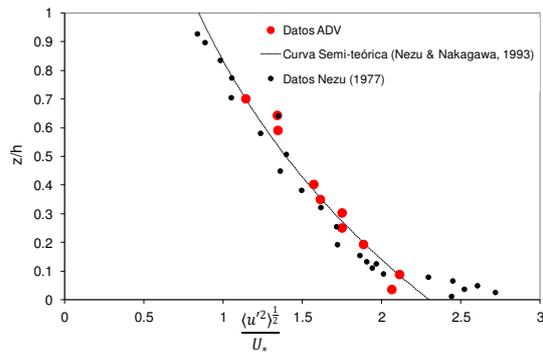
**Figura III.10.-** Distribución vertical de  $\frac{TKE}{U_*^2}$ .

Contraste entre el perfil teórico y el obtenido a partir de datos medidos con ADV. Perfil (VI)



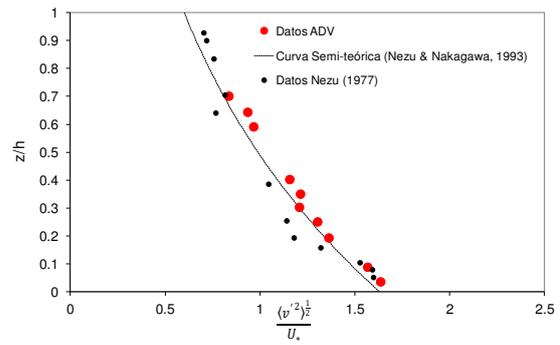
**Figura III.11.-** Distribución vertical de  $\frac{\langle -u'w' \rangle}{U_*^2}$ .

Contraste entre el perfil teórico y el obtenido a partir de datos medidos con ADV. Perfil (VI)



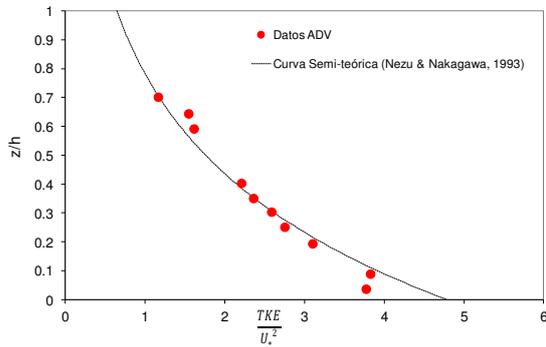
**Figura III.12.-** Distribución vertical de  $\frac{\langle u'^2 \rangle^{1/2}}{U_*}$ .

Contraste entre el perfil teórico y el obtenido a partir de datos medidos con ADV. Perfil (VII)



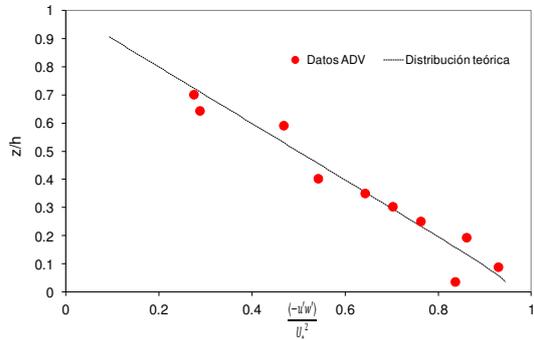
**Figura III.13.-** Distribución vertical de  $\frac{\langle v'^2 \rangle^{1/2}}{U_*}$ .

Contraste entre el perfil teórico y el obtenido a partir de datos medidos con ADV. Perfil (VII)



**Figura III.14.-** Distribución vertical de  $\frac{TKE}{U_*^2}$ .

Contraste entre el perfil teórico y el obtenido a partir de datos medidos con ADV. Perfil (VII)



**Figura III.15.-** Distribución vertical de  $\frac{\langle -u'w' \rangle}{U_*^2}$ .

Contraste entre el perfil teórico y el obtenido a partir de datos medidos con ADV. Perfil (VII)

## **Capítulo IV: evolución temporal de la erosión junto al estribo**

### **IV.1 Introducción**

Previo al análisis de la evolución de la configuración del flujo asociada al proceso de erosión junto al estribo protegido, se ha considerado conveniente presentar en este Capítulo algunos aspectos distintivos encontrados en el desarrollo de las erosiones para el caso particular que se considera en el presente estudio. Para ello se describe, en primera instancia, la evolución del lecho con el tiempo en algunas localizaciones específicas, como por ejemplo, en el punto de máxima erosión y en otros considerados de interés, tanto para la situación en que el estribo no estuvo protegido, como para la que se ensayó con protección. Luego se analiza la evolución temporal de los contornos batimétricos en todo el dominio durante el proceso erosivo, describiendo las batimetrías y perfiles transversales asociados a las configuraciones del lecho en distintos tiempos. Estos contornos batimétricos son los que se han representado en los ensayos *EIV*, *EV*, *EVI*, *EVII*, *EVIII*, *EIX*, los que, tal como fuera dicho, mantuvieron su lecho rigidizado, con una morfología correspondiente a la relevada al cabo de un determinado tiempo de progreso del proceso de erosión, (ver Capítulo II).

### **IV.2 Evolución temporal de la erosión en algunas localizaciones específicas**

#### **IV.2.1 Estribo sin protección**

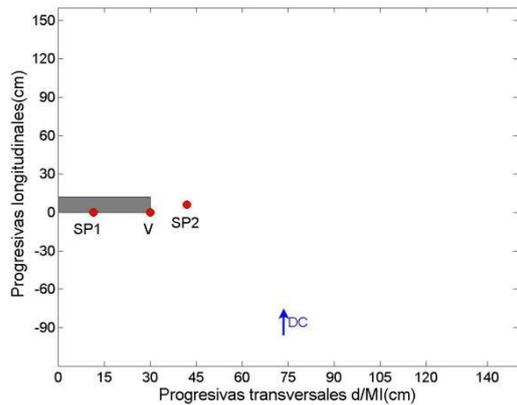
Las observaciones realizadas en el *EII* permitieron identificar el sector en donde se inicia el proceso erosivo, esto es, junto al extremo aguas arriba del estribo (punto V de figura IV.1), ya que es allí en donde las líneas de corriente se contraen dando lugar a un gran incremento en las velocidades y tensiones de corte (Kwan 1984, Ahmed y Rajaratnam 2000). La profundidad de erosión,  $Z_e$ , rápidamente se incrementa, alcanzando su máximo valor,  $Z_{eMax}$ , también en dicha posición. Con el desarrollo del proceso, erosiones de gran significación se desplazan junto a la cara aguas arriba del estribo, hasta encontrar a la pared del canal, dando lugar a la existencia de una fosa paralela a la alineación del estribo, con profundidades semejantes a la máxima relevada.

En cuanto a la dinámica de las profundizaciones se destaca que la hoya erosionada, que inicialmente es pequeña, rápidamente crece en profundidad. Los descensos del lecho junto al estribo son acompañados por deslizamientos del material del fondo ubicado en el contorno anterior de la hoya, lo que genera un aumento en su extensión. El sedimento depositado por este efecto es removido hacia aguas abajo por la acción del flujo.

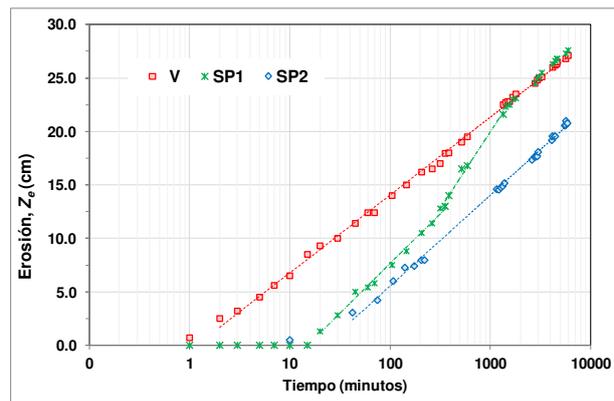
Cardoso y Bettess (1999), Ballio y Orsi (2001), Capuano et al. (2004), Radice et al. (2009) señalan, sobre la base de estudios experimentales, que en la evolución temporal de la máxima profundidad de erosión junto a un estribo de puente se pueden identificar tres fases principales: a) inicial, b) principal y c) equilibrio. Cuando se grafica la profundidad de erosión versus el logaritmo del tiempo, estas fases pueden identificarse por diferentes pendientes en torno a las cuales se agrupan los datos, correspondiéndole a la fase de equilibrio una pendiente próxima a cero.

En la figura IV.2 se ha representado en un gráfico semi-logarítmico la variación de la profundidad de erosión,  $Z_e$ , relevada en el punto V (figura IV.1) durante EII, en función del tiempo transcurrido. Se observa como los datos relevados en el punto V se ajustan a una única tendencia de variación logarítmica, demostrando un incremento continuo en la erosión, pero con una tasa que decrece con el tiempo. La información relevada durante el tiempo de desarrollo de EII demuestra que el tiempo de ensayo no fue suficientemente largo como para alcanzar la fase de equilibrio en el punto V. No obstante ello las variaciones de la profundidad de erosión en la etapa final del experimento fue relativamente pequeña, habiéndose registrado un incremento de la erosión en este punto durante las últimas 24 hs de 4.0% aproximadamente.

En la figura IV.2 se han incluido también las evoluciones temporales de la erosión relevadas en los puntos SP<sub>1</sub>, junto a la cara aguas arriba del estribo y SP<sub>2</sub> ubicado a 12 cm del borde exterior del mismo (figura IV.1).



**Figura IV.1.-** Localizaciones en donde se midió la evolución de la erosión con el tiempo durante el ensayo EII. Estribo sin protección



**Figura IV.2.-** Evolución de la erosión,  $Z_e$ , con el tiempo durante el ensayo EII en las localizaciones V,  $SP_1$  y  $SP_2$  de figura IV.1. Estribo sin protección

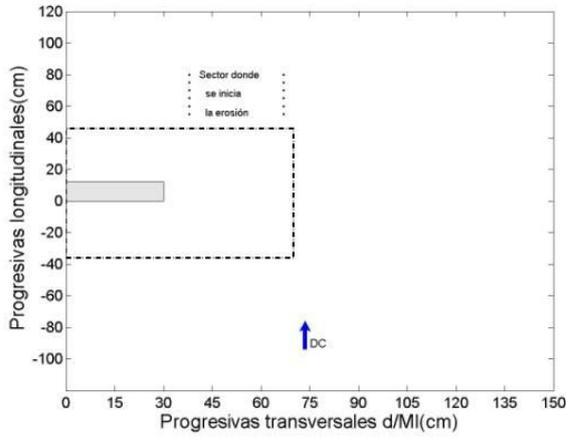
En figura IV.2 se observa que, en la posición de  $SP_1$  las erosiones se inician con un ritmo de evolución semejante al que manifiesta el punto V, durante los primeros 200 minutos de desarrollo del proceso erosivo. A posteriori la erosión aumenta con una celeridad mayor, hasta encontrar a la curva de evolución de V. Transcurridos 1000 minutos, la posición del lecho en  $SP_1$  coincide con la relevada junto al vértice anterior del estribo.

La dinámica del lecho en  $SP_2$  (Fig. IV.2) está determinada por los continuos desmoronamientos en el borde de la hoya de erosión, en la medida que el lecho desciende en las inmediaciones de V, hecho condicionado por el ángulo de reposo del material utilizado. Los puntos que en figura IV.2 representan la evolución de la erosión con el tiempo en  $SP_2$  se alinearon en torno a una recta cuya pendiente es aproximadamente paralela a la que refleja el comportamiento del lecho en V.

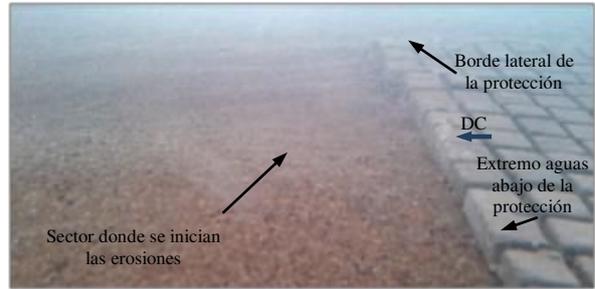
#### IV.2.2 Estribo protegido

Las evidencias experimentales surgidas en el marco del presente trabajo permitieron determinar que las erosiones del lecho, cuando el estribo estuvo protegido, se inician en las inmediaciones del borde aguas abajo de la protección, aproximadamente entre las progresivas transversales 40 y 65 cm (Figs. IV.3 y IV.4). Al poco tiempo (30 a 50 minutos aproximadamente) se forma en el extremo aguas abajo de la protección un canal lateral, dando lugar a dos franjas de flujo de algún modo diferenciables. Rápidamente, este sector

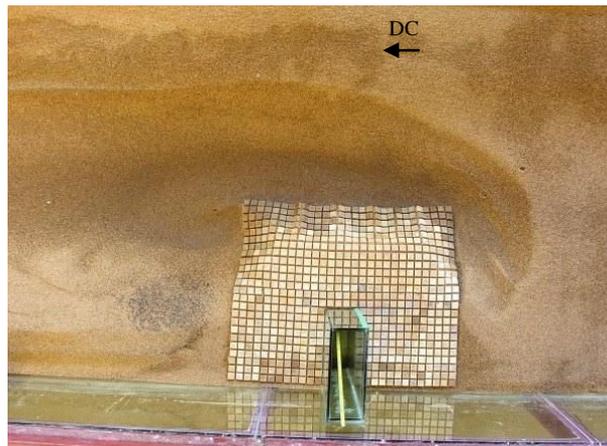
progresa tanto en profundidad como lateralmente. Con el paso del tiempo las erosiones “viajan” hacia aguas arriba, junto al costado de la protección, llegando a “envolverla” casi totalmente al final del ensayo EIII, tal como se muestra en figura IV.5.



**Figura IV.3.-** Localización del sector donde se inician las erosiones para el caso de estribo protegido. EIII



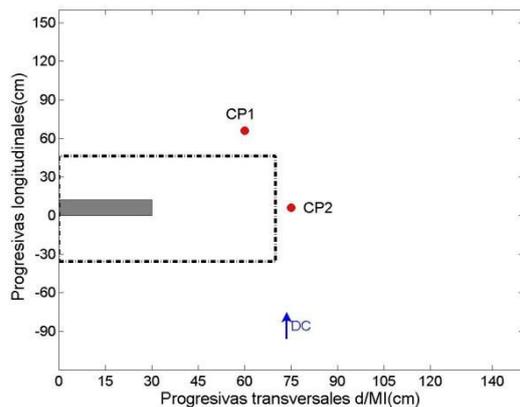
**Figura IV.4.-** Ubicación del sector donde comienza el proceso erosivo. Imagen tomada durante el desarrollo de EIII. Estribo protegido. DC indica la dirección de la corriente principal



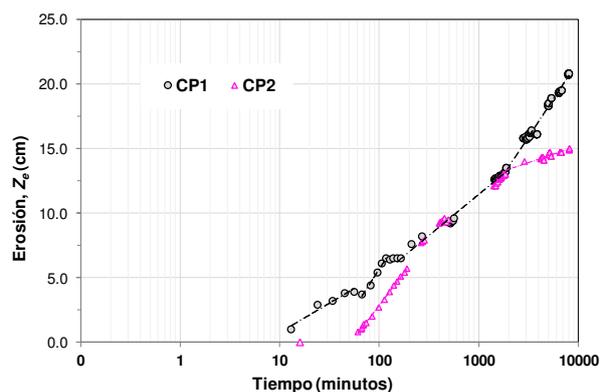
**Figura IV.5.-** Conformación del lecho al finalizar el ensayo EIII. Fotografía tomada una vez que el canal fue drenado

Durante el desarrollo de EIII se registró la posición del lecho en diferentes tiempos en los puntos identificados como CP<sub>1</sub> y CP<sub>2</sub> de figura IV.6.

En la figura IV.7 se representa la variación con el tiempo de la máxima profundidad de erosión junto al estribo protegido, la cual siempre tuvo lugar en las inmediaciones del punto CP<sub>1</sub> (Fig.IV.6). Se presenta también la evolución temporal de la erosión obtenida a partir de las mediciones realizadas en CP<sub>2</sub>, localizado en la sección transversal determinada por el eje del estribo, en la posición lateral en donde tuvieron lugar las mayores profundizaciones de dicha sección (progresiva transversal 75 cm). Del mismo modo que en figura IV.2, el eje de abscisas está dado en escala logarítmica.



**Figura IV.6.-** Localizaciones en donde se midió la evolución de la erosión con el tiempo durante el ensayo EIII. Estribo protegido. La línea de puntos representa la posición de la protección al comienzo del proceso



**Figura IV.7.-** Evolución de la erosión,  $Z_e$ , con el tiempo durante el ensayo EIII en las localizaciones CP<sub>1</sub> y CP<sub>2</sub> de figura IV.6. Estribo protegido

La información consignada en figura IV.7, tanto para CP<sub>1</sub> como para CP<sub>2</sub>, evidencian tendencias de evolución temporal de la erosión de forma logarítmica, pudiendo distinguirse durante el desarrollo del proceso erosivo diferentes pendientes de las rectas de ajuste a los datos. Se destaca que, si bien el descenso del lecho en CP<sub>2</sub> comienza más tarde que CP<sub>1</sub>, su tasa de cambio durante los primeros 150 minutos fue más rápida que la que se observó en el sector de máximas erosiones. A partir de los 200 minutos y hasta aproximadamente 2000 minutos las erosiones en las dos localizaciones analizadas se comportaron de manera idéntica, de modo tal que durante dicho lapso de tiempo los niveles del lecho al costado de la protección y al final de la misma resultaron comparables (figura IV.7). Entre 3000 y 8000 minutos la evolución del lecho al costado de la protección se atenúa, sugiriendo que

este sitio se encuentra próximo a la fase de equilibrio en el proceso de erosión y que el aporte de sedimentos desde aguas arriba al sector de máxima erosión declina, dando lugar a variaciones en los niveles del lecho en  $CP_1$  de mayor significación. En este sitio la tendencia de los datos disponibles no muestra una fase de equilibrio para el proceso, ya que la pendiente en la recta de ajuste a los datos observados no se aproxima a cero, y ni siquiera disminuye.

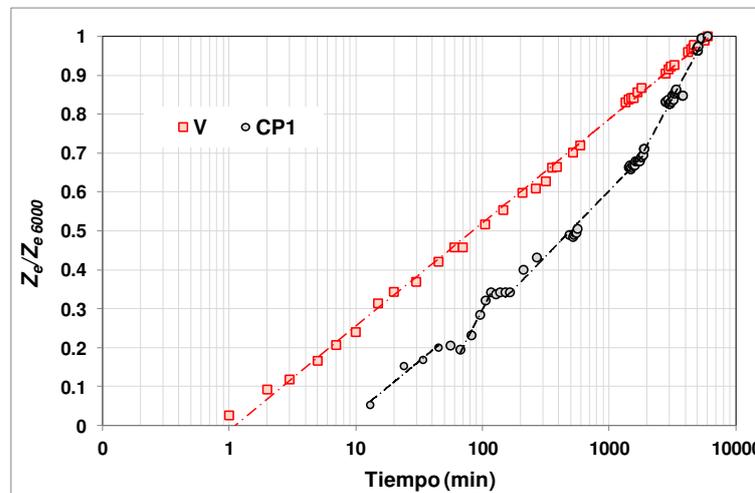
#### **IV.2.3 Contraste entre la situación de estribo protegido y la de estribo sin protección**

En la figura IV.8 se analiza en conjunto la evolución de la profundidad de erosión,  $Z_e$ , en cada una de las localizaciones en donde se dieron las máximas profundidades de erosión: V, para el caso de estribo sin protección y  $CP_1$  para el estribo protegido. Para construir dicha figura la erosión  $Z_e$ , relevada en un determinado tiempo, ha sido adimensionalizada con el valor alcanzado al cabo de 6000 minutos (tiempo de duración de *EII*),  $Z_{e6000}$ , en cada una de las ubicaciones consideradas, representándose dicha variable en el eje de ordenadas. En el eje de abscisas se han volcado los correspondientes tiempos de medición. La consideración del valor de erosión a los 6000 minutos para adimensionalizar la profundidad de erosión se funda en el hecho que durante este tiempo existieron registro de evolución del lecho para las situaciones de estribo con y sin protección, aspecto que se consideró necesario ya que lo que se pretende es un análisis comparativo.

En figura IV.8 se observa que el progreso de las erosiones durante los primeros momentos fue más rápido para la situación de estribo sin protección respecto de la del estribo protegido. Los resultados indican que al cabo de los 20 minutos iniciales en el punto V (*EII*) la profundidad de erosión fue un 35 % de la máxima considerada en ese punto, mientras que en  $CP_1$  (*EIII*) dicha relación solo fue del 10 %. A partir de dicho momento, y mientras las erosiones no tienen lugar al costado de la protección (hasta aproximadamente 40 minutos), las tasas de evolución del lecho en ambos sitios resultaron semejantes. Los datos de evolución de la erosión para el período de tiempo comprendido entre 40 y 150 minutos se ajustan a una serie de rectas de pendientes variables para el caso de estribo protegido, destacándose una secuencia de momentos de estabilidad-crecimiento-estabilidad, comportamiento que difiere de lo observado para el caso de estribo no protegido, cuyos datos se ajustan a una recta de pendiente única, tal como se observa en

figura IV.8. Esta particular evolución de la máxima profundidad de erosión visualizada en CP<sub>1</sub> (EIII) posiblemente esté relacionada con la etapa inicial del desarrollo de erosiones al costado de la protección, caracterizada por un aporte variable de sedimento hacia el sector de máxima erosión.

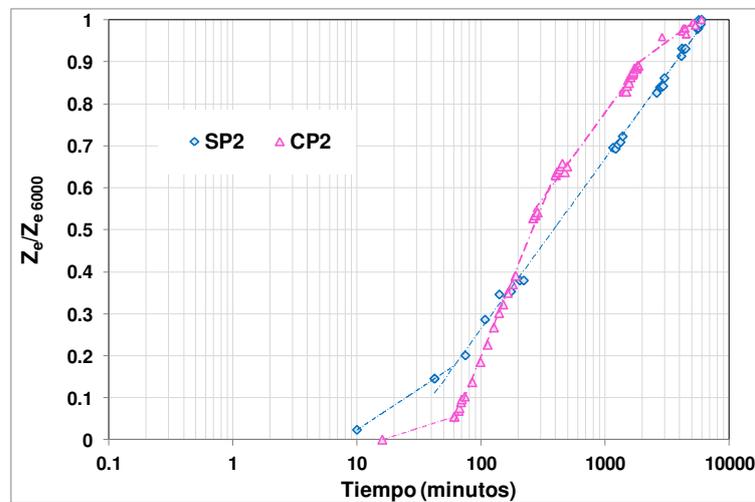
La figura IV.8 permite identificar un extenso período de tiempo, aproximadamente el 30 % del total ensayado (entre 150 y 2000 minutos), en el que la tasa de cambio experimentada por las máximas profundidades de erosión resultaron equivalentes para ambas situaciones, tal como lo reflejan las pendientes de las rectas de ajuste a los datos. Durante la etapa final de la evolución de los procesos de erosión (t>2000 minutos) las mayores variaciones se dieron para el caso de estribo protegido, (punto CP<sub>1</sub>, EII), período durante el cual se produce una declinación de las erosiones al costado de la protección, tal como se observa en figura IV.7.



**Figura IV.8.-** Relación entre la profundidad de erosión medida en un determinado tiempo “ $Z_e$ ” y la existente al cabo de 6000 minutos de ensayo,  $Z_{e6000}$ . Se incluyen los datos correspondientes al punto V (EII, Fig. IV.1) y al punto CP1 (EIII, Fig. IV.6)

En la figura IV.9 se ha representado la evolución conjunta del lecho en los puntos seleccionados en la sección transversal coincidente con el eje del estribo, SP<sub>2</sub> (EII, Fig. IV.1) y CP<sub>2</sub> (EIII, Fig. IV.6). Para volcar la información disponible la profundidad de erosión medida en un tiempo determinado ha sido adimensionalizada del mismo modo que el presentado en figura IV.8. En el eje de abscisas el tiempo se ha considerado en escala logarítmica. Al igual que lo visto cuando se compararon los datos de erosión provenientes

de los puntos en los que se dio la máxima erosión (Fig. IV.8) la profundizaciones del lecho al comienzo del proceso erosivo crecieron con mayor velocidad cuando se ensayó el estribo sin protección. En esta situación puede observarse que al cabo de los primeros 60 minutos de ensayo la erosión se desarrolló un 17 %, mientras que en el sitio elegido cuando la protección del lecho estuvo presente fue tan solo de un 6 %. Durante la mayor parte del tiempo (superados los 60 minutos) las profundidades de erosión recolectadas en SP<sub>2</sub> se ajustan a una única recta, con igual pendiente con la que se alinearon los datos derivados del punto V (Fig. IV.2), a diferencia de lo que ocurre con los datos medidos en CP<sub>2</sub>. En este caso se advierte que primero las erosiones experimentaron mayores variaciones respecto de las que ocurrieron en SP<sub>2</sub>, luego crecieron con igual ritmo (pendientes paralelas entre 300 y 2000 minutos) y durante la fase final del proceso en CP<sub>2</sub> el lecho se erosionó con menor velocidad.



**Figura IV.9.-** Relación entre la profundidad de erosión medida en un determinado tiempo “ $Z_e$ ” y la existente al cabo de 6000 minutos de ensayo,  $Z_{e6000}$ . Se incluyen los datos correspondientes al punto SP<sub>2</sub> (EII, Fig. IV.1) y al punto CP<sub>2</sub> (EIII, Fig. IV.6)

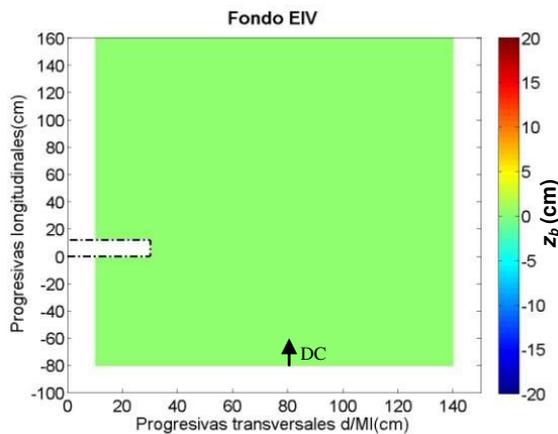
### IV.3 Evolución temporal de los contornos batimétricos durante el proceso erosivo

A continuación se presentan los mapas de contornos batimétricos y perfiles transversales batimétricos representativos de las conformaciones del lecho correspondientes a distintos tiempos del desarrollo del proceso de erosión. Estas configuraciones de lecho son

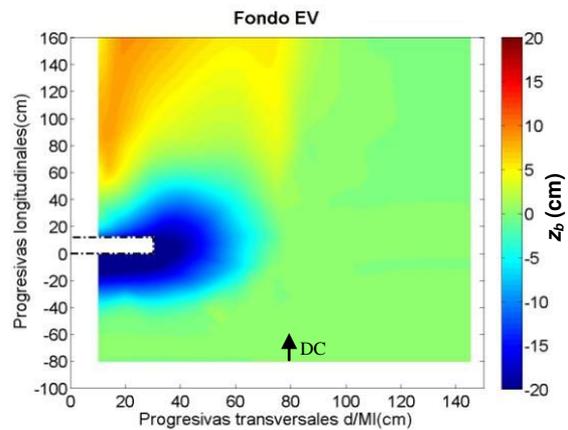
utilizadas luego para el análisis de la estructura del flujo en los capítulos siguientes. Tal como se ha descrito en el Capítulo II, los ensayos *EIV* a *EIX*, en los cuales se evaluará la estructura del flujo, se caracterizaron por tener el lecho rigidizado, cada uno representando una morfología particular que se corresponde con un tiempo determinado en el desarrollo del proceso de erosión que será descrito a continuación. En los ensayos *EIV* y *EV* el estribo ha sido considerado sin presencia de protección alguna y en los restantes protegido con la manta flexible descrita en el Capítulo II.

### IV.3.1 Contornos batimétricos - Estribo sin protección

La forma del lecho representada en los ensayos *EIV* (fondo inicial, previo al desarrollo de erosiones) y *EV* (fondo con erosiones desarrolladas durante 2880 minutos) se muestran en las figuras IV.10 y figura IV.11. En dichas figuras las cotas del lecho,  $z_b$ , por encima del cero (+) se corresponden con procesos de sedimentación, las cotas por debajo del cero (-) con procesos de erosión, mientras que el cero refiere al nivel del lecho original, previo al desarrollo de erosiones, el cual fue inicialmente horizontal en toda el área de experimentación.



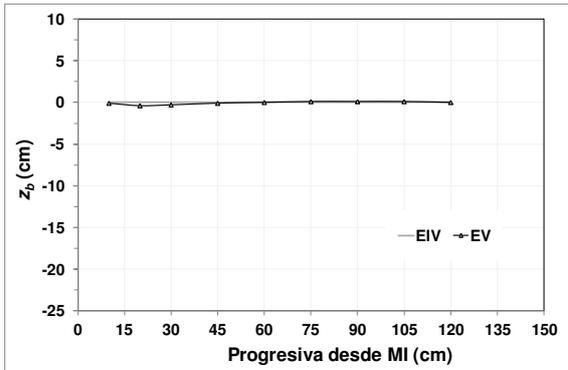
**Figura IV.10.-** Mapa de contornos batimétricos. Estribo sin protección. *EIV* (tiempo de evolución de la erosión  $t=0\text{min}$ )



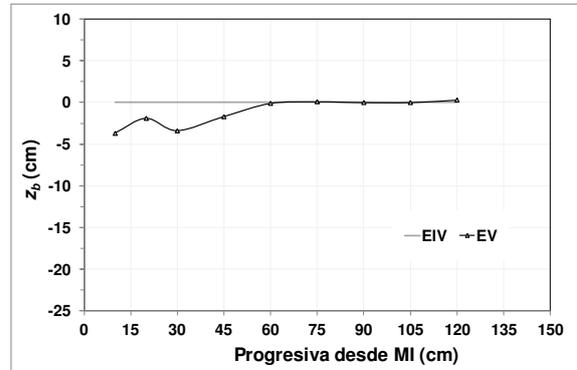
**Figura IV.11.-** Mapa de contornos batimétricos. Estribo sin protección. *EV* (tiempo de evolución de la erosión  $t=2880\text{min}$ )

Sobre la base de los datos con los cuales se construyeron las figuras IV.10 y IV.11 se representaron los perfiles de las secciones transversales en las que se realizaron mediciones de velocidad de flujo, en las figuras IV.12 a IV.21. La representación en forma superpuesta de *EIV* y *EV* permite apreciar la evolución de la erosión en cada sector. Una vez más se

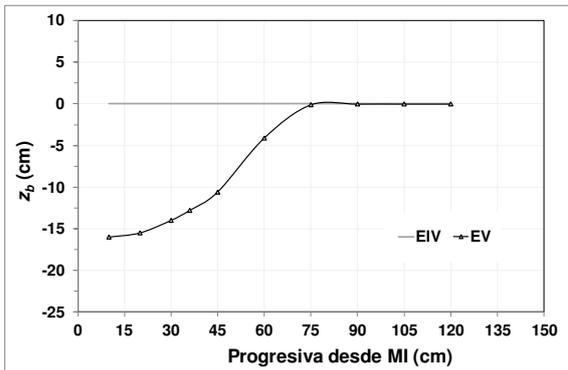
reafirma el hecho que las máximas profundizaciones del lecho tienen lugar junto al estribo, en las proximidades de su vértice exterior aguas arriba (Sección 0 cm). El área erosionada se extendió aproximadamente desde 40 cm aguas arriba del estribo hasta 60 cm aguas abajo (figuras IV.13 a IV.20).



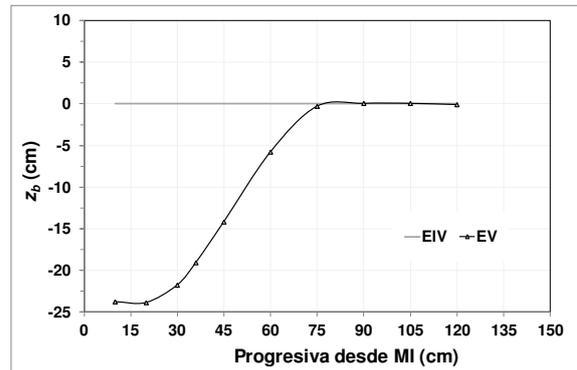
**Figura IV.12.-** Perfiles del lecho. Ensayos EIV (t=0min) – EV (t=2880min). Sección transversal de progresiva longitudinal  $x=-60$ cm. Estribo sin protección



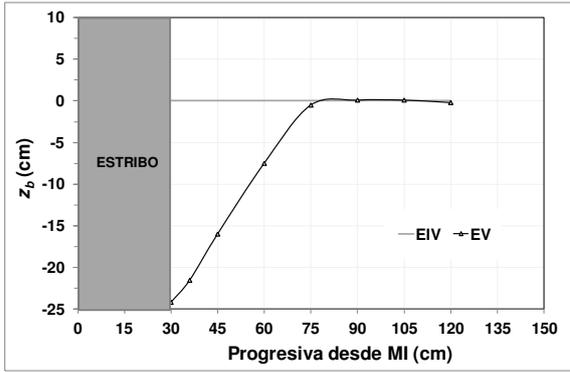
**Figura IV.13.-** Perfiles del lecho. Ensayos EIV (t=0min) – EV (t=2880min). Sección transversal de progresiva longitudinal  $x=-40$ cm. Estribo sin protección



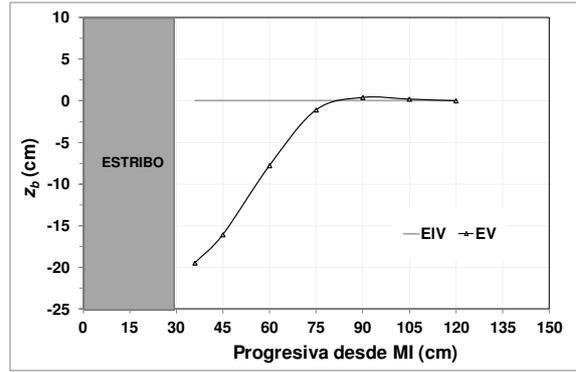
**Figura IV.14.-** Perfiles del lecho. Ensayos EIV (t=0min) – EV (t=2880min). Sección transversal de progresiva longitudinal  $x=-20$ cm. Estribo sin protección



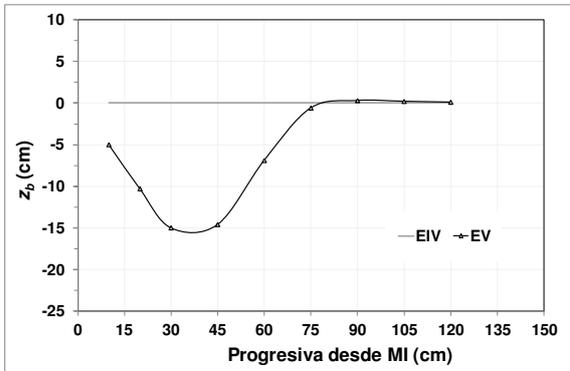
**Figura IV.15.-** Perfiles del lecho. Ensayos EIV (t=0min) – EV (t=2880min). Sección transversal de progresiva longitudinal  $x=-06$ cm. Estribo sin protección



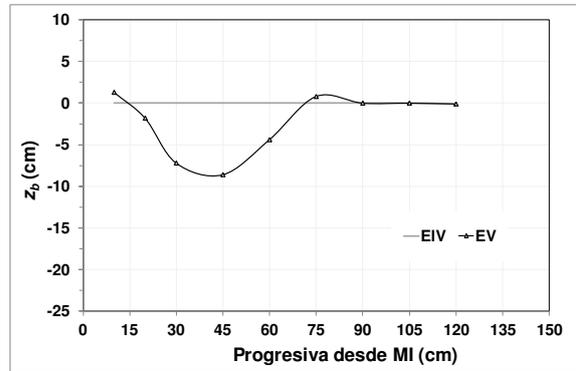
**Figura IV.16.-** Perfiles del lecho. Ensayos EIV (t=0min) – EV (t=2880min). Sección transversal de progresiva longitudinal  $x=0\text{cm}$ . Estribo sin protección



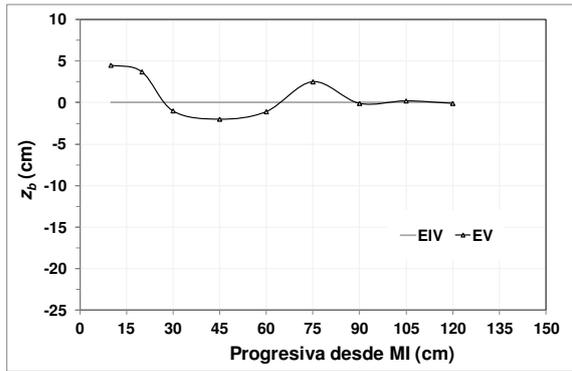
**Figura IV.17.-** Perfiles del lecho. Ensayos EIV (t=0min) – EV (t=2880min). Sección transversal de progresiva longitudinal  $x=12\text{cm}$ . Estribo sin protección



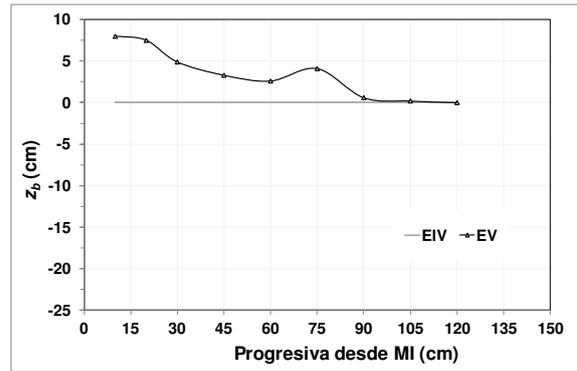
**Figura IV.18.-** Perfiles del lecho. Ensayos EIV (t=0min) – EV (t=2880min). Sección transversal de progresiva longitudinal  $x=20\text{cm}$ . Estribo sin protección



**Figura IV.19.-** Perfiles del lecho. Ensayos EIV (t=0min) – EV (t=2880min). Sección transversal de progresiva longitudinal  $x=40\text{cm}$ . Estribo sin protección



**Figura IV.20.-** Perfiles del lecho. Ensayos EIV (t=0min) – EV (t=2880min). Sección transversal de progresiva longitudinal x=60cm. Estribo sin protección



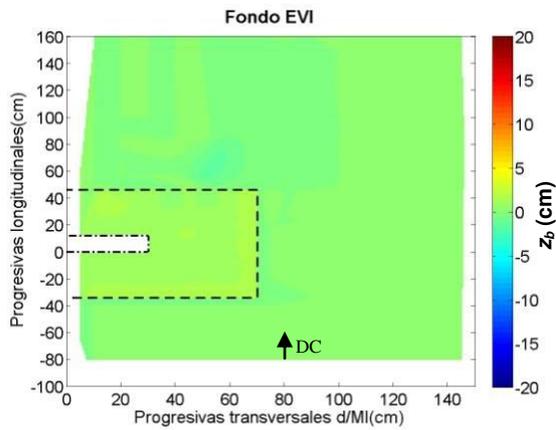
**Figura IV.21.-** Perfiles del lecho. Ensayos EIV (t=0min) – EV (t=2880min). Sección transversal de progresiva longitudinal x=100cm. Estribo sin protección

### IV.3.2 Contornos batimétricos - Estribo protegido

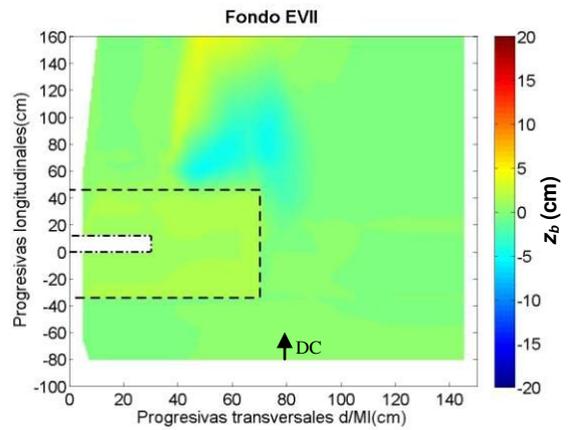
Las configuraciones del lecho representadas en esta secuencia de experimentos se muestran en las figuras IV.22 (*EVI*, condición inicial, previa al desarrollo de erosiones), figura IV.23 (*EVII*, erosiones conformadas al cabo de 100 minutos de ensayo), figura IV.24 (*EVIII*, erosiones correspondientes a 400 minutos de ensayo) y figura IV.25 (*EIX*, erosiones conformadas al cabo de 2880 minutos).

El análisis conjunto de las figuras IV.22 a IV.25 permite visualizar la evolución con el tiempo del área erosionada en torno al estribo protegido. Tal como se observa en figura IV.23 las profundizaciones del lecho comenzaron inmediatamente después del extremo aguas abajo de la protección. Con el paso del tiempo la zona afectada por las erosiones se desplaza hacia aguas arriba, junto al borde lateral de la protección (Fig. IV.24), llegando a envolverla en toda su extensión, tal como lo demuestra la figura IV.25.

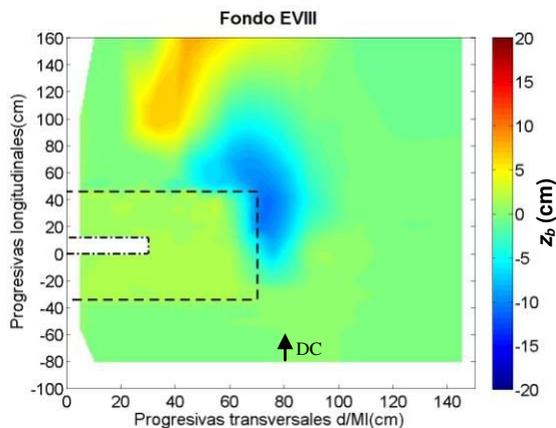
Las figuras IV.26 a IV.36 muestran los perfiles erosionados superpuestos correspondientes a las secciones transversales en donde se midieron velocidades.



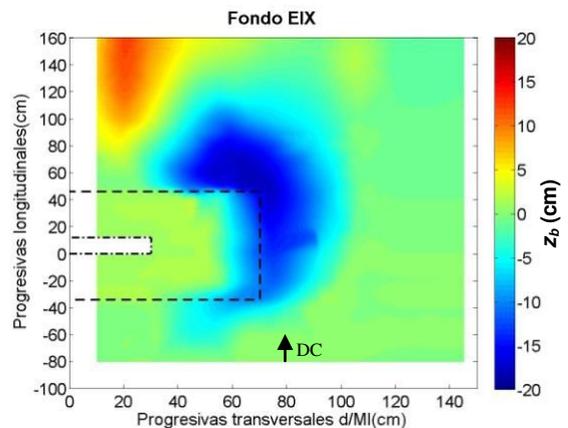
**Figura IV.22.-** Mapa de contornos batimétricos. Estribo protegido. EVI (tiempo de evolución de la erosión  $t=0\text{min}$ ). La línea punteada representa la posición de la protección en el momento inicial del desarrollo de la erosión



**Figura IV.23.-** Mapa de contornos batimétricos. Estribo protegido. EVII (tiempo de evolución de la erosión  $t=100\text{min}$ ). La línea punteada representa la posición de la protección en el momento inicial del desarrollo de la erosión



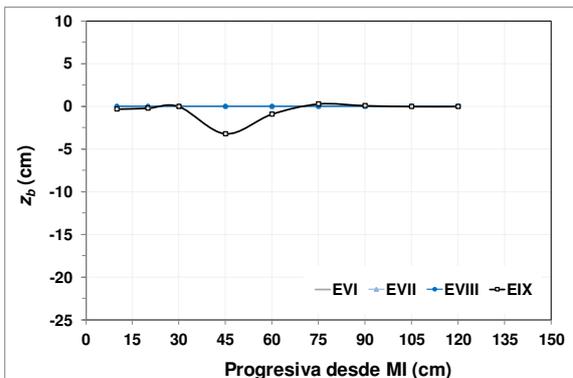
**Figura IV.24.-** Mapa de contornos batimétricos. Estribo protegido. EVIII (tiempo de evolución de la erosión  $t=400\text{min}$ ). La línea punteada representa la posición de la protección en el momento inicial del desarrollo de la erosión



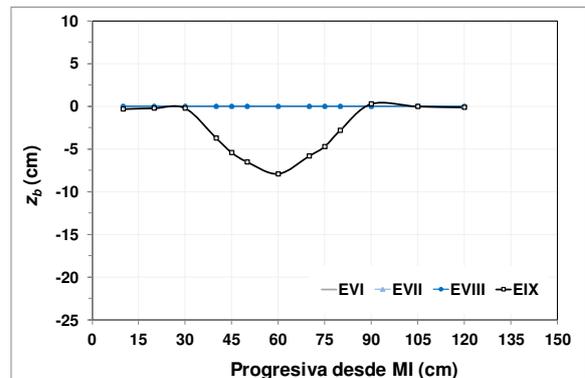
**Figura IV.25.-** Mapa de contornos batimétricos. Estribo protegido. EIX (tiempo de evolución de la erosión  $t=2880\text{min}$ ). La línea punteada representa la posición de la protección en el momento inicial del desarrollo de la erosión

Sobre la base de los resultados expuestos en figuras IV.26 a IV.36 se considerará en adelante a la sección transversal de progresiva longitudinal 60 cm como representativa, tanto del sitio en donde tiene inicio el proceso de erosión, como de la zona en donde se desarrollan las mayores profundidades de erosión, situación considerada válida para las

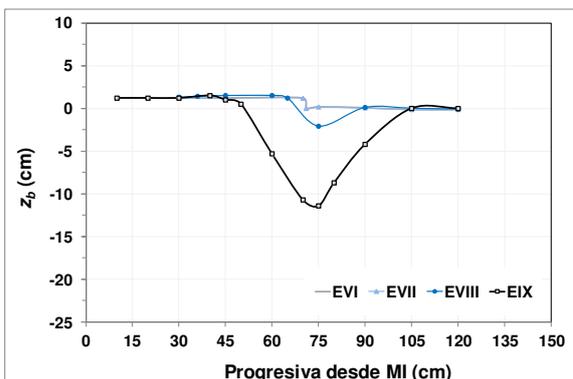
condiciones experimentales contempladas en el presente estudio. Los perfiles de erosión también demuestran que el sector erosionado “acompaña” a la extensión longitudinal de la manta, verificándose la existencia de erosiones para la última condición ensayada (EIX) a 60 cm aguas arriba del estribo (Fig. IV.26), mientras que hacia agua abajo las erosiones estuvieron presentes más allá de los 100 cm aguas abajo del estribo (Fig. IV.35).



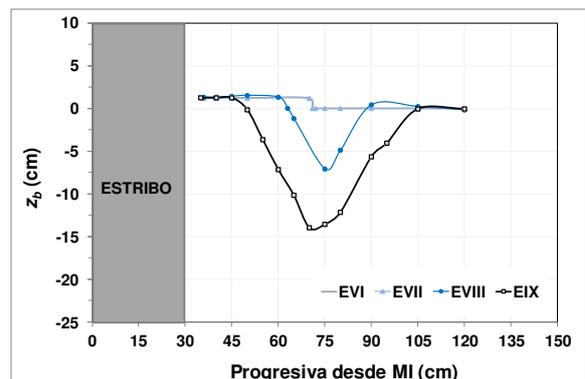
**Figura IV.26.-** Perfiles del lecho. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (t=400min) – EIX (t=2880min). Sección transversal de progresiva longitudinal  $x=-60$ cm. Estribo protegido



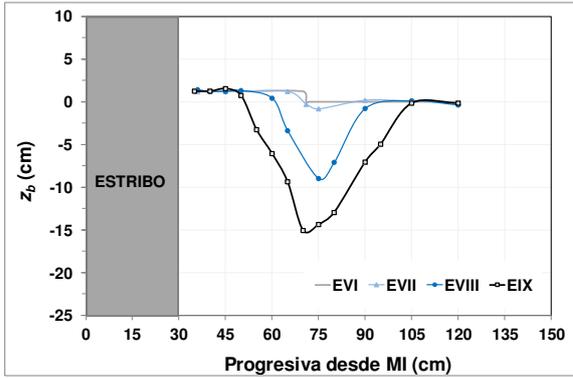
**Figura IV.27.-** Perfiles del lecho. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (t=400min) – EIX (t=2880min). Sección transversal de progresiva longitudinal  $x=-40$ cm. Estribo protegido



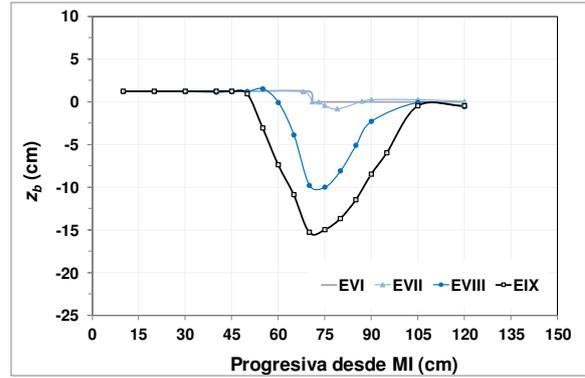
**Figura IV.28.-** Perfiles del lecho. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (t=400min) – EIX (t=2880min). Sección transversal de progresiva longitudinal  $x=-20$ cm. Estribo protegido



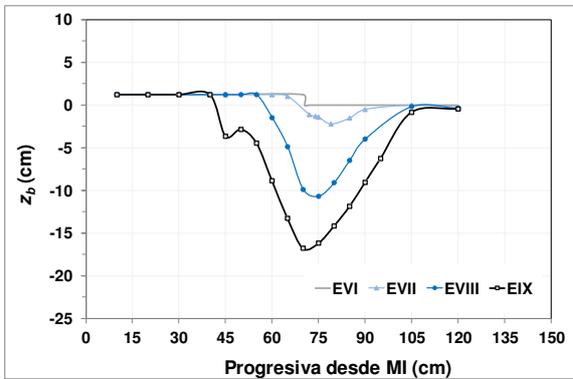
**Figura IV.29.-** Perfiles del lecho. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (t=400min) – EIX (t=2880min). Sección transversal de progresiva longitudinal  $x=0$ cm. Estribo protegido



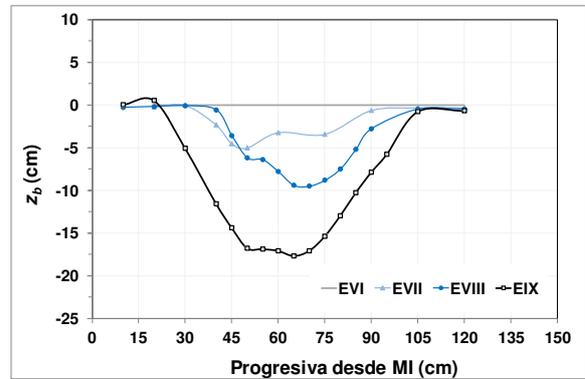
**Figura IV.30.-** Perfiles del lecho. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (t=400min) – EIX (t=2880min). Sección transversal de progresiva longitudinal  $x=12$ cm. Estribo protegido



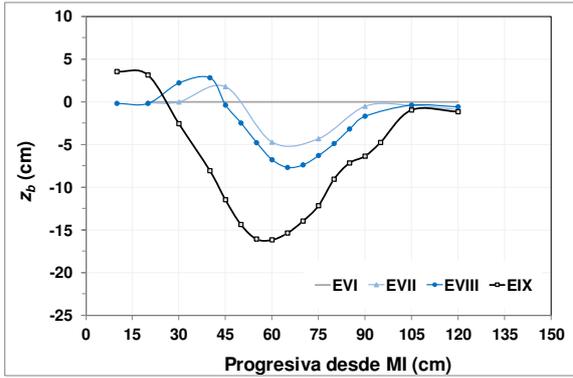
**Figura IV.31.-** Perfiles del lecho. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (t=400min) – EIX (t=2880min). Sección transversal de progresiva longitudinal  $x=20$ cm. Estribo protegido



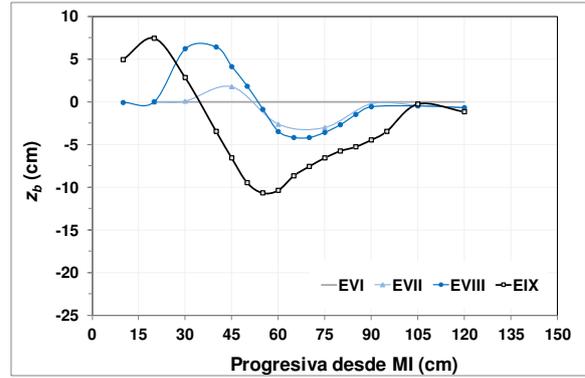
**Figura IV.32.-** Perfiles del lecho. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (t=400min) – EIX (t=2880min). Sección transversal de progresiva longitudinal  $x=40$ cm. Estribo protegido



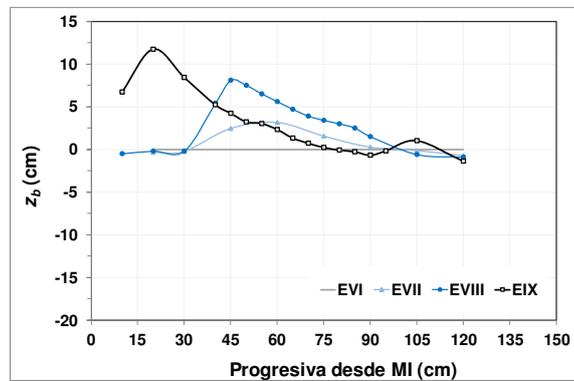
**Figura IV.33.-** Perfiles del lecho. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (t=400min) – EIX (t=2880min). Sección transversal de progresiva longitudinal  $x=60$ cm. Estribo protegido



**Figura IV.34.-** Perfiles del lecho. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (t=400min) – EIX (t=2880min). Sección transversal de progresiva longitudinal  $x=80\text{cm}$ . Estribo protegido



**Figura IV.35.-** Perfiles del lecho. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (t=400min) – EIX (t=2880min). Sección transversal de progresiva longitudinal  $x=100\text{cm}$ . Estribo protegido



**Figura IV.36.-** Perfiles del lecho. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (t=400min) – EIX (t=2880min). Sección transversal de progresiva longitudinal  $x=160\text{cm}$ . Estribo protegido

# **Capítulo V: caracterización bidimensional del campo de flujo**

## **V.1 Introducción**

En este capítulo se realiza una descripción en dos dimensiones (2D) de la evolución del campo del flujo, acorde se modifica la conformación del lecho, tanto para la situación de estribo no protegido (EIV-EV), como en la que la protección estuvo presente (EVI-EVII-EVIII-EIX).

En función de las metodologías empleadas para la medición de velocidades y los datos obtenidos en consecuencia se han considerado dos alternativas para la caracterización bidimensional:

- Campo superficial del flujo: basada en los datos de velocidad superficial del agua, obtenidos a partir de la técnica de velocimetría por imágenes de partículas a gran escala (LSPTV), descrita en el Capítulo II.
- Campo del flujo medio: basada en los datos de velocidad medidos con el velocímetro acústico Doppler (ADV); el término “medio” utilizado en este ítem refiere a la consideración de parámetros integrados en la vertical.

## **V.2 Campo superficial del flujo**

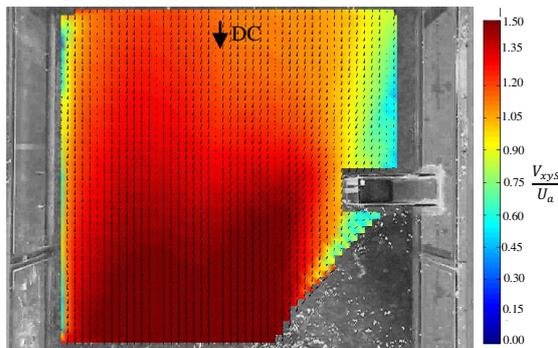
### **V.2.1 Velocidades medias temporales**

Como fue mencionado anteriormente, la técnica de velocimetría LSPTV 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. La localización de cada partícula en dos imágenes consecutivas permite determinar su desplazamiento el que, a partir del tiempo conocido, da por resultado el vector instantáneo de velocidad bidimensional, en el plano superficial, para cada una de las partículas identificadas. Cada campo de velocidades superficiales instantáneo obtenido con LSPTV es interpolado sobre una grilla regular; promediando la totalidad de imágenes instantáneas así generadas se obtiene un campo medio temporal de vectores de velocidad, tal como los que se muestran

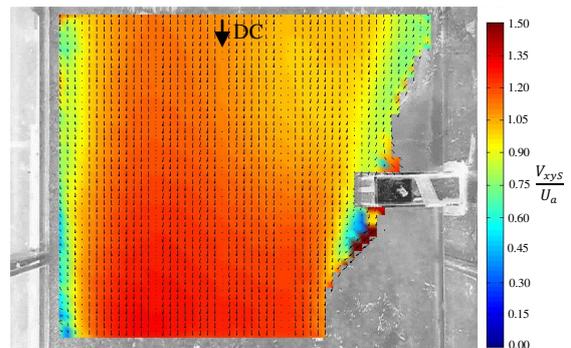
en las figuras V.1 a V.6. En las figuras V.1 y V.2 se representaron los campos de velocidades superficiales correspondientes a las dos configuraciones de lecho consideradas para el caso de estribo sin protección (EIV-EV), mientras que en las figuras V.3 a V.6 las correspondientes a los ensayos para el estribo protegido (EVI-EVII-EVIII-EIX).

Todas estas figuras tienen la misma escala de colores, la que representa la velocidad en el plano “x-y” superficial,  $V_{xyS}$ , adimensionalizada con la velocidad longitudinal media en la vertical, evaluada en la vertical central del flujo de aproximación,  $U_a = 32.5$  cm/s, (Capítulo III).

En las figuras mencionadas puede verse que existen zonas en las que no se han representado vectores velocidad, fundamentalmente en las regiones de recirculación del flujo aguas arriba y aguas abajo del estribo. Esto se debe a que allí no ingresaron partículas durante todo el tiempo de registro de los videos, lo cual es considerado por la interfaz PTVLab (Patalano et al., 2013; Patalano y García, 2016) al momento de evaluar el campo de velocidades.



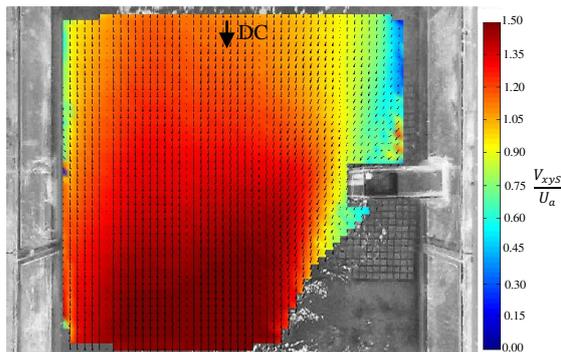
**Figura V.1.-** Campo de velocidades medias superficiales. Estribo sin protección. Ensayo EIV (Tiempo de evolución de las erosiones  $t=0$ )



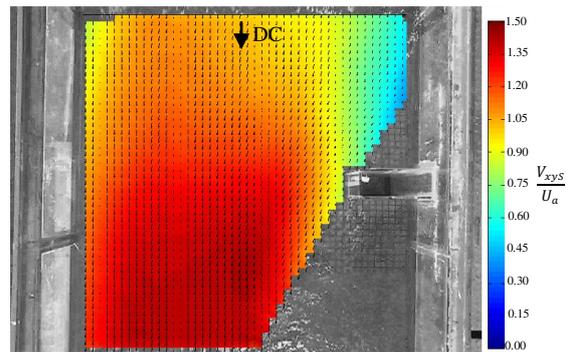
**Figura V.2.-** Campo de velocidades medias superficiales. Estribo sin protección. Ensayo EV (Tiempo de evolución de las erosiones  $t=2880$  min)

Los campos medios de velocidades superficiales correspondientes a la situación previa al desarrollo de erosiones se muestran en la figura V.1 para el estribo sin protección (EIV) y en la figura V.3 para el estribo protegido (EVI). Ambas demuestran patrones semejantes en los campos de velocidad media, indicando la escasa influencia que tiene la presencia de la protección en el flujo superficial. De ambas figuras se destaca que toda el área representada se encuentra perturbada por la presencia del estribo. Hacia aguas arriba, este

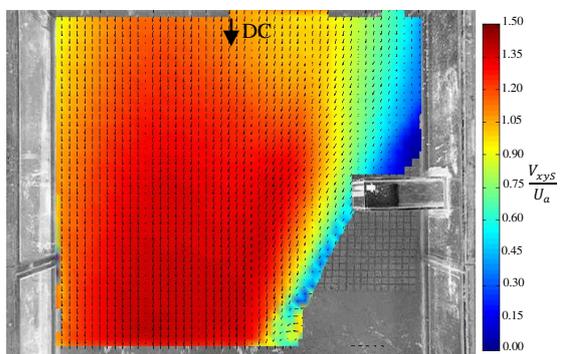
hecho se nota en que las velocidades sobre la margen izquierda resultaron de menor magnitud que la existente en la región central del canal. Las figuras V.1 y V.3 indican que la longitud del tramo relevada experimentalmente con la técnica LSPTV, dependiente del campo visual disponible, no capta la restitución del flujo no perturbado. La contracción del flujo superficial determinada por la presencia del estribo determina velocidades superficiales superiores a la media del flujo de aproximación en algo más de un 50%, las cuales se observan aguas abajo de la sección de emplazamiento del estribo, en el tramo final del flujo caracterizado.



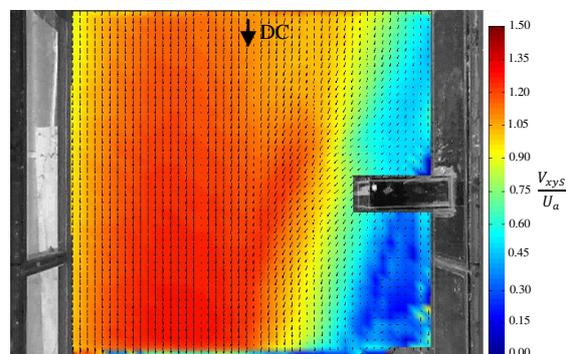
**Figura V.3.-** Campo de velocidades medias superficiales. Estribo con protección. Ensayo EVI (Tiempo de evolución de las erosiones t=0 min)



**Figura V.4.-** Campo de velocidades medias superficiales. Estribo con protección. Ensayo EVII (Tiempo de evolución de las erosiones t=100 min)



**Figura V.5.-** Campo de velocidades medias superficiales. Estribo con protección. Ensayo EVIII (Tiempo de evolución de las erosiones t=400 min)



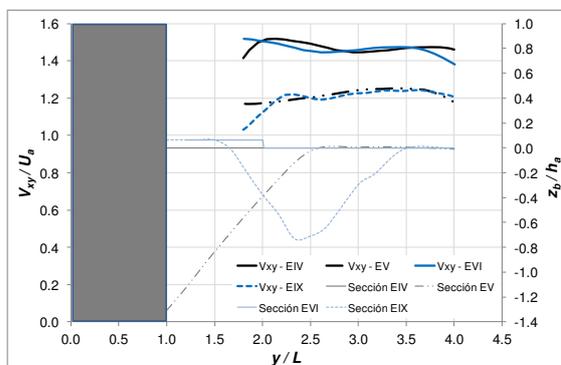
**Figura V.6.-** Campo de velocidades medias superficiales. Estribo con protección. Ensayo EIX (Tiempo de evolución de las erosiones t=2880 min)

En las figuras V.2, V.4, V.5 y V.6 se puede ver como el campo de velocidades superficiales se ve afectado por el desarrollo de erosiones. En la figura V.2 se muestra la configuración del flujo superficial correspondiente al estado de erosión ensayado en EV, en la que se observa una reducción en las velocidades máximas observadas respecto a las existentes en la situación inicial (figura V.1). Un aspecto distintivo que surge del análisis conjunto de las figuras IV.11 y figura V.2 es que, una vez desarrolladas las erosiones, en el sector contraído las velocidades superficiales se distribuyen prácticamente uniformes (por fuera de la zona de recirculación), independientemente que el escurrimiento tenga lugar o no sobre la hoya de erosión.

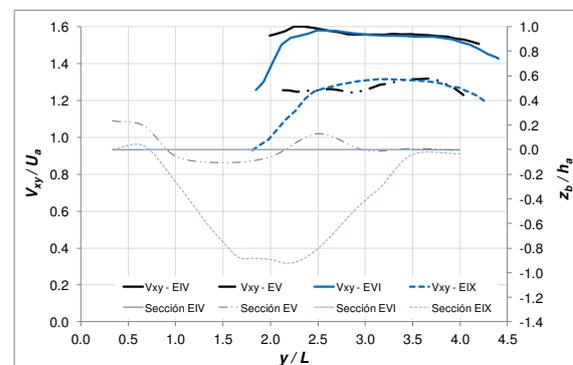
Las figuras V.4, V.5 y V.6 (correspondientes a los ensayos EVII, EVIII Y EIX, respectivamente) demuestran el progresivo descenso de las máximas velocidades superficiales con el desarrollo de las erosiones en torno al estribo protegido (ver figura IV.23, figura IV.24 y figura IV.25). Se observa una disminución significativa de las velocidades superficiales en la condición experimental correspondiente al ensayo EIX, las que se distribuyen en forma uniforme aguas abajo de la sección del estribo, en el sector de flujo por fuera de la zona de recirculación.

Cuando se comparan los campos superficiales de velocidades representados en las figuras V.2 (máxima erosión representada para el estribo sin protección-EV) y V.6 (máxima erosión representada para el estribo con protección-EIX) se observa como el sector del flujo contraído, medido con la técnica LSPTV, resulta con velocidades máximas semejantes. Para demostrar este hecho se muestran las figuras V.7 y V.8, en las que se comparan en un mismo grafico los perfiles transversales de velocidad superficial para las condiciones inicial y final representadas para el estribo sin protección (EIV y EV, respectivamente) y para el estribo con protección (EVI y EIX, respectivamente). Estos perfiles fueron obtenidos con el software utilizado para el análisis de las imágenes obtenidas con la técnica LSPTV, PTVLab (Patalano et al., 2013; Patalano y García, 2016). En dichas figuras se ha considerado a la velocidad superficial y a las progresivas transversales en forma adimensional, esto es,  $\frac{V_{xyS}}{U_a}, \frac{y}{L}$ , en donde  $L$  es la longitud del estribo. Se han incluido también los perfiles del lecho en cada una de las secciones analizadas, considerando a la cota del lecho,  $z_b$  también en forma adimensional. De este modo en el eje de ordenadas secundario se volcaron  $\frac{z_b}{h_a}$ , recordando que  $h_a$  es la profundidad del flujo de

aproximación al estribo. Si bien desde el punto de vista de las erosiones sería más correcto considerar como variable de adimensionalización a  $L$ , ya que en este estudio se ha trabajado con un estribo de longitud intermedia (Melville y Coleman, 2000), en este caso se ha optado por  $h_a$  como una manera de identificar la posición relativa en relación al espesor del escurrimiento no perturbado. La figura V.7 corresponde a una sección transversal coincidente con la cara aguas arriba del estribo, cuya progresiva longitudinal adimensional,  $\frac{x}{L}$ , es cero y la figura V.8 a una sección ubicada a 60 cm aguas abajo, esto es,  $\frac{x}{L} = 2.0$ . Si bien es esperable que se observen velocidades superficiales máximas semejantes al inicio del proceso erosivo para los casos del estribo protegido y sin proteger en las dos secciones analizadas, esta similitud también se encuentra para la condición de máxima erosión, siendo  $\frac{V_{xyS}}{U_a} \approx 1.2$  para  $\frac{x}{L} = 0.0$  (Fig. V.7) y  $\frac{V_{xyS}}{U_a} \approx 1.3$  para  $\frac{x}{L} = 2.0$  (Fig. V.8), a pesar de que la forma del lecho en cada una de las localizaciones resultó diferente para las dos situaciones analizadas.



**Figura V.7.-** Distribución transversal de máximas velocidades superficiales adimensionales  $\frac{V_{xyS}}{U_a}$  y perfiles del lecho. Sección de progresiva longitudinal  $\frac{x}{L} = 0.0$ . Ensayos EIV (t=0min) y EV (t=2880 min) para estribo sin protección y ensayos EVI (t=0min) y EIX (t=2880min) para estribo protegido



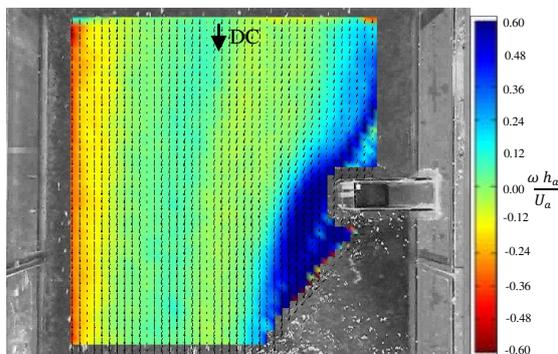
**Figura V.8.-** Distribución transversal de máximas velocidades superficiales adimensionales  $\frac{V_{xyS}}{U_a}$  y perfiles del lecho. Sección de progresiva longitudinal  $\frac{x}{L} = 2.0$ . Ensayos EIV (t=0min) y EV (t=2880 min) para estribo sin protección y ensayos EVI (t=0min) y EIX (t=2880min) para estribo protegido

## V.2.2 Vorticidad superficial

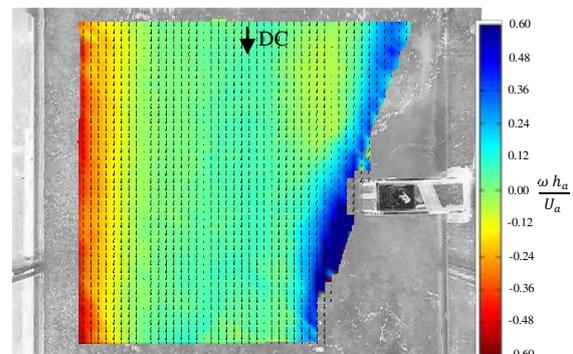
La capa de corte, que incluye los vórtices de estela, tiene su origen en la interacción del

flujo de aproximación con el estribo. La presencia de esta capa se puede identificar como una región que presenta un alto gradiente de vorticidad. Para analizar esta situación se exhiben las figuras V.9 a V.14 donde se representan los campos superficiales de vorticidad para cada una de las configuraciones ensayadas. La escala de colores a la derecha de cada figura indica el valor de vorticidad,  $\omega$ , en forma adimensional,  $\frac{\omega h_a}{U_a}$ . PTVLab calcula la vorticidad utilizando la función “curl” implementada en @Matlab, la cual evalúa los gradientes del campo de velocidad requeridos utilizando diferencias centradas en los puntos interiores del dominio y diferencias hacia adelante en los bordes.

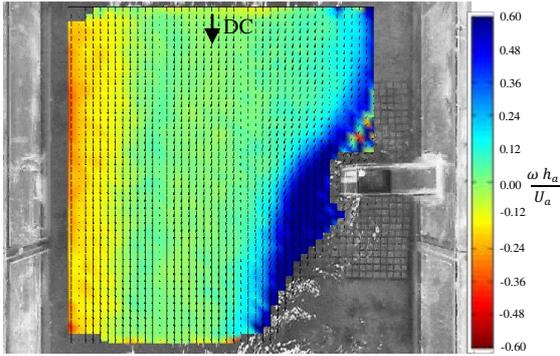
En función de la información proporcionada por las figuras V.9 a V.14 se considera que la presencia de la capa de corte se asocia con valores de altos gradientes de vorticidad, incluyendo el cruce a valores con vorticidad positiva (zona de coloración azul en las figuras mencionadas), pudiendo establecerse como criterio para localizar el límite de esta región de flujo a la zona de transición en donde  $\frac{\omega h_a}{U_a}$  cruza a cero. Las figuras V.9 y V.10, que corresponden a las configuraciones del lecho iniciales y finales ensayadas con el estribo sin protección, sugieren que con el desarrollo de las erosiones locales la zona de corte desprendida desde el estribo se recuesta más junto a él. Por el contrario las figuras V.11 a V.14, las que refieren a la situación de estribo protegido, demuestran que esta zona del flujo experimenta un progresivo alejamiento de la pared sobre la que se apoya el estribo en la medida en que se desarrollan las erosiones del lecho en torno a la manta de protección (Figuras V.12, V.13 y V.14). Este hecho puede considerarse válido solo en el área de escurrimiento captada por el LSPTV.



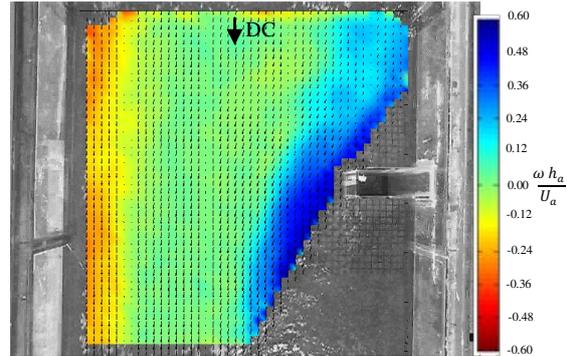
**Figura V.9.-** Campo de vorticidad superficial. Estribo sin protección. Ensayo EIV (Tiempo de evolución de las erosiones t=0 min)



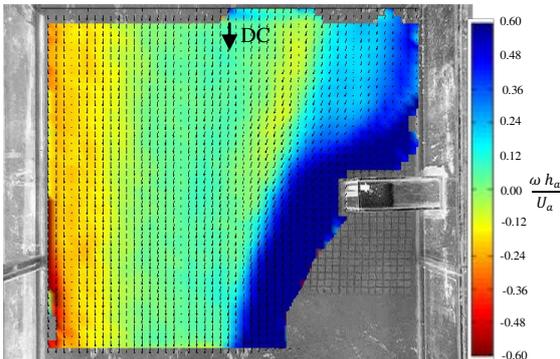
**Figura V.10.-** Campo de vorticidad superficial. Estribo protegido. Ensayo EV (Tiempo de evolución de las erosiones t=2880 min)



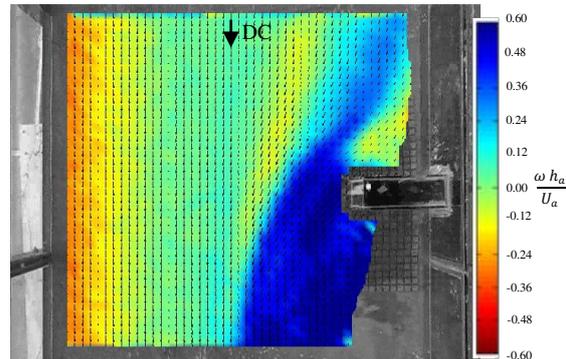
**Figura V.11.** Campo de vorticidad superficial. Estribo protegido. Ensayo EVI (Tiempo de evolución de las erosiones t=0 min).



**Figura V.12.** Campo de vorticidad superficial. Estribo protegido. Ensayo EVII (Tiempo de evolución de las erosiones t=100 min).



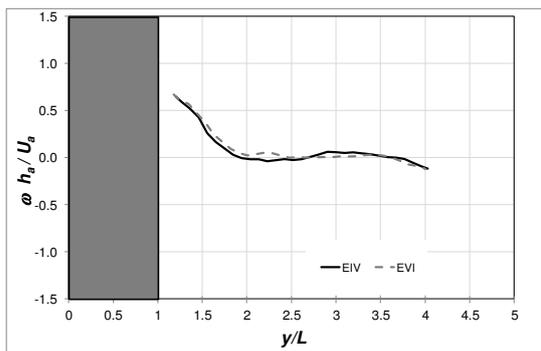
**Figura V.13.-** Campo de vorticidad superficial. Estribo protegido. Ensayo EVIII (Tiempo de evolución de las erosiones t=400 min)



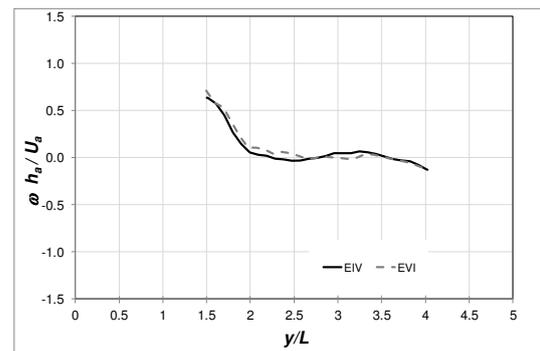
**Figura V.14.-** Campo de vorticidad superficial. Estribo protegido. Ensayo EIX (Tiempo de evolución de las erosiones t=2880 min)

En forma complementaria al análisis presentado de las figuras V.9 a V.14, se analizó la distribución de vorticidad en tres secciones transversales distribuidas en el tramo de canal contemplado al aplicar la técnica de LSPTV, de modo tal de identificar la variación del posicionamiento de la capa de corte desprendida desde el estribo con el desarrollo de erosiones, en las dos situaciones de estribo ensayadas. Estas secciones transversales corresponden a las progresivas longitudinales  $\frac{x}{L} = 0.0$ ;  $\frac{x}{L} = 0.67$ ;  $\frac{x}{L} = 1.67$ . En primer lugar, se comparan las distribuciones transversales de vorticidad adimensional,  $\frac{\omega h_a}{U_a}$ , calculadas a partir de la información relevada en el EIV (condición inicial para la situación de estribo no protegido) y en el EVI (condición inicial para la situación de estribo protegido) en las tres secciones consideradas (figuras V.15 a V.17). Se observa una

coincidencia plena en los resultados mostrados para las dos situaciones de estribo contrastadas. Nuevamente aquí surge que la presencia de la protección no influye en la configuración del flujo superficial. Si se considera como posición límite de la capa de corte desprendida desde el estribo al sector con alto gradiente de vorticidad las figuras previamente citadas permiten determinar como en la medida que se consideran secciones ubicadas más aguas abajo del estribo, dicha localización tiene lugar para una progresiva transversal,  $\frac{y}{L}$ , mayor.



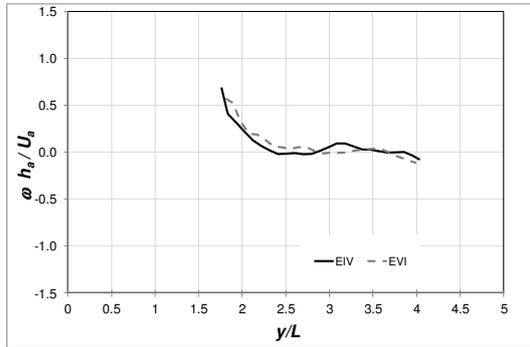
**Figura V.15.-** Distribución transversal de vorticidad adimensional:  $\frac{\omega h}{U_a}$ . Sección  $\frac{x}{L} = 0.0$ . Situación inicial. Ensayos EIV (estribo sin protección) y EVI (estribo protegido)



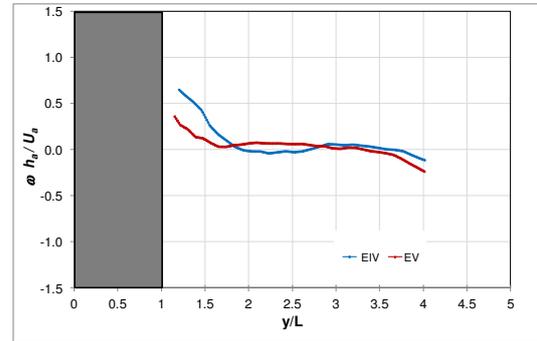
**Figura V.16.-** Distribución transversal de vorticidad adimensional:  $\frac{\omega h}{U_a}$ . Sección  $\frac{x}{L} = 0.67$ . Situación inicial. Ensayos EIV (estribo sin protección) y EVI (estribo protegido)

La influencia del cambio en la morfología del lecho producto del desarrollo de erosiones sobre la posición de la capa de corte desprendida desde el estribo se analiza en las figuras V.18 a V.20 para el caso del estribo sin protección (EIV y EV) y en las figuras V.21 a V.23 para el caso de estribo protegido. En dichas figuras se comparan la distribución transversal de vorticidad adimensional al inicio del proceso erosivo y la correspondiente al estado de mayor erosión representado para cada situación de estribo considerada. Las figuras V.18 a V.20 demuestran que con el desarrollo de erosiones junto al estribo la región con mayor gradiente de vorticidad se desplaza hacia la izquierda, acercándose al borde del estribo, una distancia aproximada de  $0.5 L$ . Mientras que cuando las erosiones se desarrollaron en torno a la protección del lecho la zona de mayor gradiente de vorticidad se desplazó hacia

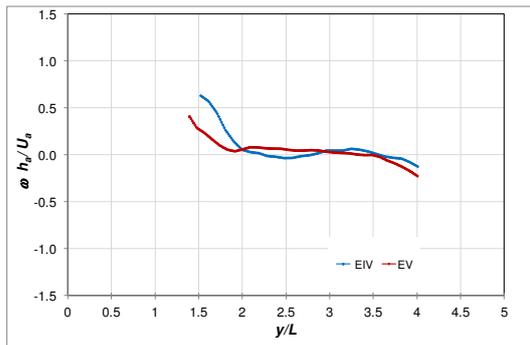
la derecha, es decir se alejan del borde del estribo, una distancia algo mayor, del orden de  $0.7 L$ , tal como se observa en las figuras V.21 a V.23.



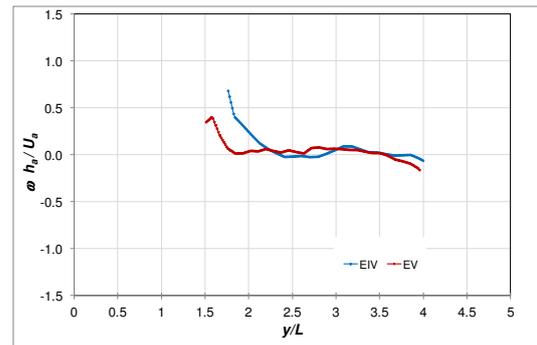
**Figura V.17.-** Distribución transversal de vorticidad adimensional:  $\frac{\omega h}{U_a}$ . Sección  $\frac{x}{L} = 1.67$ . Situación inicial. Ensayo EIV (estribo sin protección) – Ensayo EVI (estribo protegido).



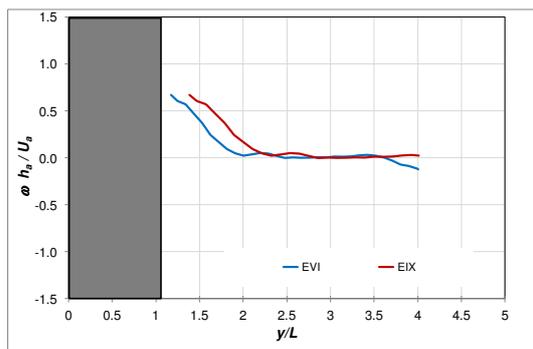
**Figura V.18.-** Distribución transversal de vorticidad adimensional:  $\frac{\omega h}{U_a}$ . Sección  $\frac{x}{L} = 0.0$ . Estribo sin protección. Ensayo EIV (tiempo de evolución de la erosión t=0min) y Ensayo EV (tiempo de evolución de la erosión t=2880min)



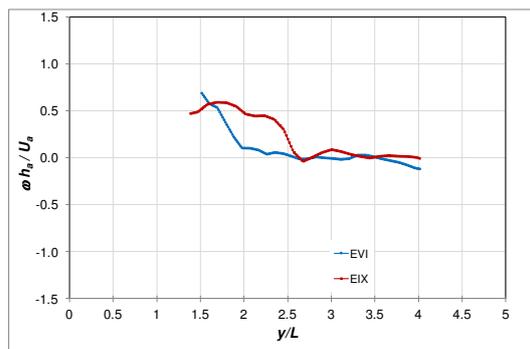
**Figura V.19.-** Distribución transversal de vorticidad adimensional:  $\frac{\omega h}{U_a}$ . Sección  $\frac{x}{L} = 0.67$ . Estribo sin protección. Ensayo EIV (tiempo de evolución de la erosión t=0min) y Ensayo EV (tiempo de evolución de la erosión t=2880min)



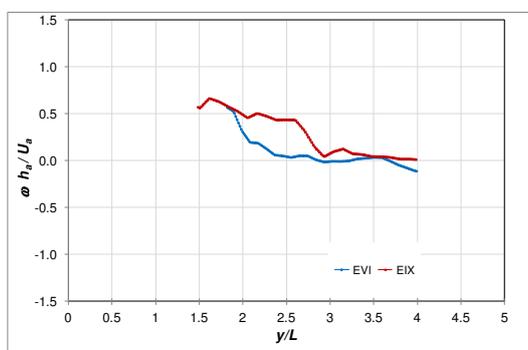
**Figura V.20.-** Distribución transversal de vorticidad adimensional:  $\frac{\omega h}{U_a}$ . Sección  $\frac{x}{L} = 1.67$ . Estribo sin protección. Ensayo EIV (tiempo de evolución de la erosión t=0min) y Ensayo EV (tiempo de evolución de la erosión t=2880min)



**Figura V.21.-** Distribución transversal de vorticidad adimensional:  $\frac{\omega h_z}{U_a}$ . Sección  $\frac{x}{L} = 0.0$ . Estribo sin protección. Ensayo EVI (tiempo de evolución de la erosión t=0min) y Ensayo EIX (tiempo de evolución de la erosión t=2880min)



**Figura V.22.-** Distribución transversal de vorticidad adimensional:  $\frac{\omega h_z}{U_a}$ . Sección  $\frac{x}{L} = 0.67$ . Ensayo EVI (tiempo de evolución de la erosión t=0min) y Ensayo EIX (tiempo de evolución de la erosión t=2880min)



**Figura V.23.-** Distribución transversal de vorticidad adimensional:  $\frac{\omega h_z}{U_a}$ . Sección  $\frac{x}{L} = 1.67$ . Ensayo EVI (tiempo de evolución de la erosión t=0min) y Ensayo EIX (tiempo de evolución de la erosión t=2880min)

## V.3 Campo del flujo medio

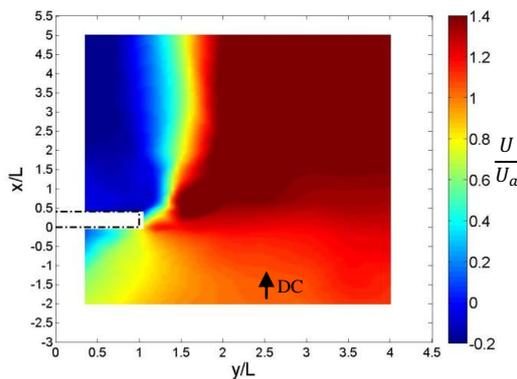
### V.3.1 Velocidad media en la vertical

En función de las series temporales de velocidades registradas con velocímetro acústico Doppler durante los ensayos EIV a EIX se evaluó, en cada vertical de medición

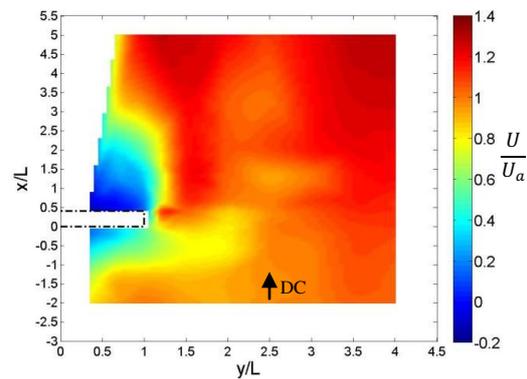
seleccionada (Figuras II.23 a II.28 ), la velocidad media en la vertical,  $U$ , a partir de la integración en profundidad de las velocidades longitudinales,  $\langle u \rangle$ , observadas en cada localización. En las figuras V.24 y V.25 se muestran los mapas de contornos de  $U$  correspondientes a los ensayos en los cuales se representaron las morfologías del lecho consideradas para el proceso de erosión junto al estribo sin protección, esto es EIV (situación inicial previa al desarrollo de erosiones) (Fig. V.24) y el EV (condiciones de erosión al cabo de 48 hs) (Fig. V.25). Las velocidades medias en la vertical se consideraron adimensionalizadas con la velocidad media en el flujo de aproximación,  $U_a$ , por lo que la escala de colores representa a  $\frac{U}{U_a}$ . Las progresivas longitudinales y transversales también se han considerado en forma adimensional, esto es  $\frac{x}{L}$  e  $\frac{y}{L}$ , respectivamente, siendo sus correspondientes escalas de representación diferentes entre sí por lo que los gráficos resultaron distorsionados.

La configuración del campo de velocidades longitudinales medias al inicio del proceso (Figura V.24) resultó semejante a la señalada para el campo de velocidades en superficie correspondiente a esta instancia del proceso, tal como se observa en Fig. V.1. La figura V.24 permite ver que el sector de flujo medido aguas arriba del estribo presenta una distribución de velocidades no uniforme a lo ancho del canal, destacándose la presencia de velocidades menores a  $U_a$  en el flujo directamente interceptado por el estribo, con magnitudes gradualmente crecientes hacia el centro del canal. La sección coincidente con la cara aguas arriba del estribo, con su origen en  $\frac{y}{L} = 1.0$ , demuestra velocidades uniformes. Aguas abajo de la sección de emplazamiento del estribo se puede observar muy bien delimitada al área ocupada por el flujo contraído, existiendo velocidades en este sector que pueden superar a la media del flujo de aproximación en un 50 %. Esta zona de flujo se separa del costado del estribo con un ángulo aproximado de  $29^\circ$ , respecto de la dirección principal del escurrimiento, inclinación que se mantiene hasta una progresiva longitudinal de  $\frac{x}{L} = 2.0$ , a partir de la cual, y en la totalidad del tramo medido en este estudio, la separación entre la capa de corte desprendida desde el estribo y la zona de flujo franco se mantiene con una alineación prácticamente paralela a la del flujo principal, estando las mayores velocidades localizadas con progresivas laterales  $\frac{y}{L} \geq 2$ .

En la figura V.25 se presenta el campo de velocidades medias correspondientes a la situación de máxima erosión representada para el estribo sin protección, de la que pueden realizarse algunas observaciones. En efecto, si consideramos la región del escurrimiento ubicada aguas arriba del estribo, delimitada por la pared del canal de margen izquierda y por una línea imaginaria que pasa por el extremo del estribo puede verse que las velocidades en este sector aumentaron respecto de la situación inicial para distancias longitudinales mayores a  $1.5 L$ , mientras que entre esta posición y la cara aguas arriba del estribo las mismas resultaron menores. Por fuera de dicha zona se observa una disminución generalizada de las velocidades medias respecto de la situación inicial sin erosiones. Las máximas velocidades medias resultaron en esta condición aproximadamente  $1.2 U_a$ .



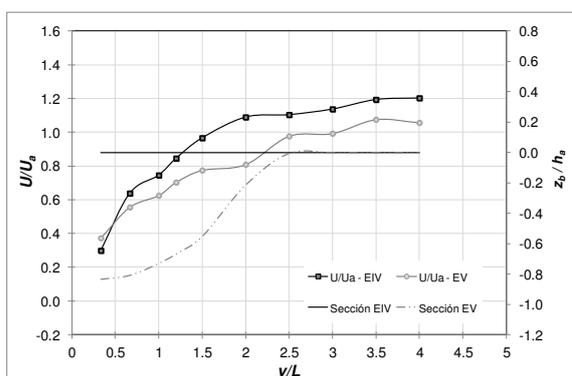
**Figura V.24.-** Mapa de contornos de velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{U}{U_a}$ . Estribo sin protección. Ensayo EIV (tiempo de evolución de las erosiones  $t=0\text{min}$ )



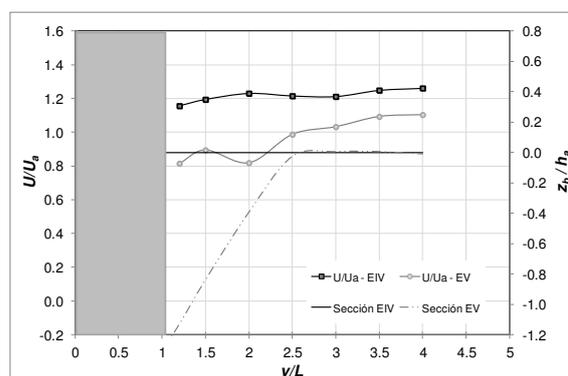
**Figura V.25.-** Mapa de contornos de velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{U}{U_a}$ . Estribo sin protección. Ensayo EV (tiempo de evolución de las erosiones  $t=2880\text{min}$ )

Un aspecto particular que surge del análisis de las figuras V.24 y V.25 es la disminución del tamaño de la región de recirculación del flujo localizada aguas abajo del estribo con el desarrollo de las erosiones locales. La figura V.25 permite ver que en toda la extensión del tramo analizado en este estudio esta región reduce principalmente su ancho, lo cual es mucho más acentuado a partir de la progresiva longitudinal  $3L$ . A continuación se enuncian dos posibles razones que justifiquen la disminución de las velocidades máximas aguas abajo del estribo: el aumento de la sección de escurrimiento producto de las profundizaciones del lecho y la expansión de la región de flujo libre ( $\frac{x}{L} = 4$ ), debido al desplazamiento hacia margen izquierda de la capa de corte desprendida desde el estribo.

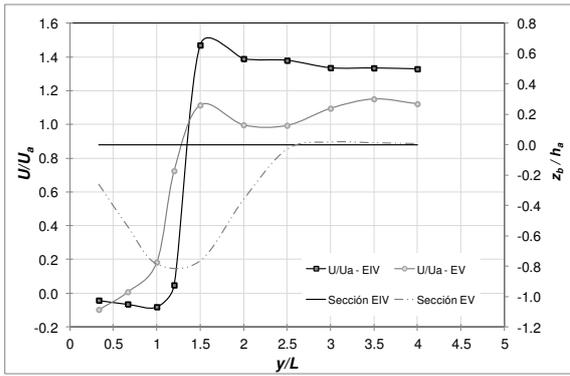
En figura V.25 se observa también una franja de flujo ( $\frac{y}{L}$  del orden de 2.5) con velocidades medias menores a las del flujo circundante zona que, de acuerdo a la figura IV.11, se localiza en derredor de la hoya de erosión local desarrollada. Con el fin de explicitar con mayor detalle los aspectos distintivos encontrados en relación con el campo del flujo medio asociado al proceso de erosión en torno a un estribo sin protección se presentan las figuras V.26 a V.29, en las que se muestran las distribuciones de velocidades medias en la vertical en cuatro de las secciones transversales en las que se midieron velocidades con ADV. Estas secciones, ubicadas en las progresivas longitudinales  $\frac{x}{L} = -0.67$ ;  $\frac{x}{L} = 0.0$ ;  $\frac{x}{L} = 0.67$ ;  $\frac{x}{L} = 1.33$ , se seleccionaron de modo tal que involucren la parte principal del sector erosionado junto al estribo sin protección. En cada gráfico se han contrastado las velocidades medias en la vertical adimensionales correspondientes a la situación inicial del proceso de erosión (EIV) con las obtenidas cuando se ensayó con el máximo nivel de erosión contemplado para el estribo sin protección (EV). Se han incluido también las posiciones del lecho existentes en cada caso. Así es como el eje de ordenadas a la izquierda corresponde a las velocidades adimensionales  $\frac{U}{U_a}$ , mientras que el de la derecha a las cotas del terreno, expresadas en forma adimensional,  $\frac{z_b}{h_a}$ .



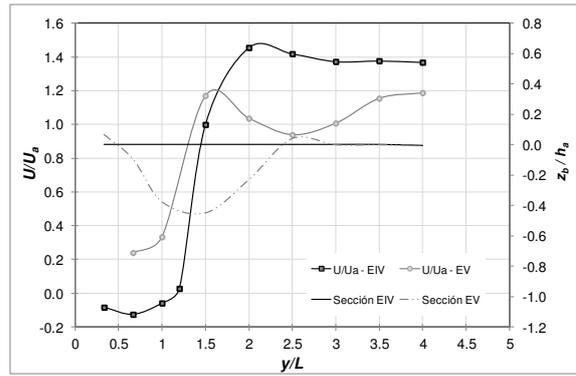
**Figura V.26.-** Distribución transversal de la velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{U}{U_a}$  y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = -0.67$ . Estribo sin protección. Ensayos EIV (t=0 min) y EV (t=2880min)



**Figura V.27.-** Distribución transversal de la velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{U}{U_a}$  y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = 0.0$ . Estribo sin protección. Ensayos EIV (t=0 min) y EV (t=2880min)



**Figura V.28.-** Distribución transversal de la velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{U}{U_a}$  y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = 0.67$ . Estribo sin protección. Ensayos EIV ( $t=0$  min) y EV ( $t=2880$ min)



**Figura V.29.-** Distribución transversal de la velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{U}{U_a}$  y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = 1.33$ . Estribo sin protección. Ensayos EIV ( $t=0$  min) y EV ( $t=2880$ min)

En las figuras V.26 y V.27, localizadas aguas arriba y en coincidencia con el borde anterior del estribo, respectivamente, se observa que una vez desarrolladas las erosiones las velocidades disminuyen todo a lo ancho de la sección. En estas localizaciones el factor de amplificación máximo de velocidad media pasa de 1.2, en la situación inicial, a 1.1 cuando se desarrollaron las erosiones. En la sección de figuras V.27, en donde tuvo lugar la mayor profundidad de erosión junto al estribo, los descensos más importantes de velocidad se dieron en coincidencia con la hoya de erosión, sitio en donde las velocidades medias resultaron inferiores a  $U_a$ .

Las figuras V.28 V.29 corresponden a secciones transversales ubicadas aguas abajo del emplazamiento del estribo. De ellas se desprende el descenso de velocidades en todo el sector del flujo principal con magnitudes máximas que pasan de  $1.4 U_a$  a  $1.2 U_a$ . Un aspecto particular es que solo la porción exterior de la hoya de erosión está involucrada en este escurrimiento, pudiendo observarse el desplazamiento hacia margen izquierda que sufre esta región con el desarrollo de erosiones, ya mencionado al presentar las figuras V.24 y V.25.

En las figuras V.26 a V.29 se identifica claramente una región de velocidades menores a las circundantes, correspondiente a la situación con erosión, la cual se localiza en todos los casos sobre el talud exterior de la hoya, próxima a su borde lateral.

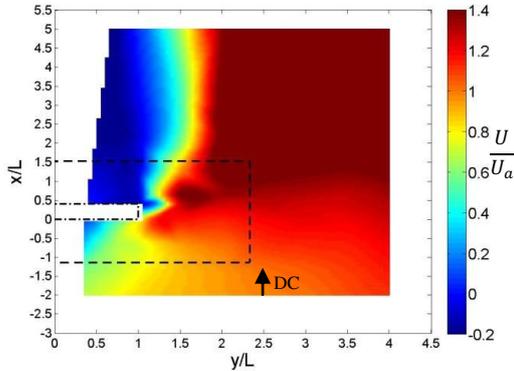
Se analiza a continuación la evolución del campo de velocidades longitudinales medias con el desarrollo de las erosiones en torno a la protección de lecho colocada junto al estribo. En las figuras V.30 a V.33 se representaron los mapas de contornos de las velocidades medias longitudinales adimensionales  $U/U_a$  en la parte del escurrimiento medida, correspondientes a las cuatro instancias del proceso de erosión consideradas para esta situación (EVI; EVII; EVIII y EIX). En las figuras mencionadas el sector delimitado por las líneas de guiones representa la posición de la manta de protección del lecho al inicio del proceso erosivo.

La figura V.30, construida a partir de los datos de velocidades medidos en el ensayo EVI, muestra una configuración del flujo totalmente coincidente con la que se observa en figura V.24, la cual representa el campo del flujo medio previo a que las profundizaciones del lecho tengan lugar en las inmediaciones del estribo cuando éste se encontró desprovisto de protección del lecho, razón por la cual son válidas todas las consideraciones señaladas al momento de presentar dicha figura.

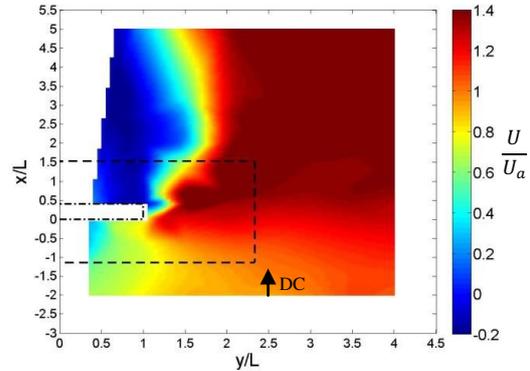
En la figura V.31 se muestra que al cabo de los primeros 100 minutos del proceso erosivo, situación para la cual las erosiones afectaron solo a un sector del lecho ubicado aguas abajo de la protección (Fig. IV.23) el principal cambio en la distribución de velocidades medias consiste en el desplazamiento de la zona de máximas velocidades medias en dirección hacia margen derecha, lo cual resulta evidente entre las progresivas longitudinales  $\frac{x}{L} = 2.0$  y  $\frac{x}{L} = 3.0$ . Este hecho deriva en una cierta curvatura de la frontera de la capa turbulenta desprendida desde el estribo y zona de recirculación contigua que se observa en el tramo final del sector medido. Esta tendencia resultó más marcada con el progreso de las erosiones, tal como se desprende de las figuras V.32 a V.33. En este sentido se concluye entonces que, el cambio experimentado por la morfología del lecho trae como consecuencia una región de recirculación que en los estados finales del proceso resultó más ancha, pero de menor extensión longitudinal.

Las figuras V.31 a V.33 ponen en evidencia el paulatino descenso de las velocidades medias máximas en la medida que crece el sector del lecho afectado por las erosiones. Se puede ver que cuando el lecho presentó el mayor grado de erosión (EIX) el factor de amplificación de las velocidades medias máximo disminuyó a 1.2 (Fig. V.33). La

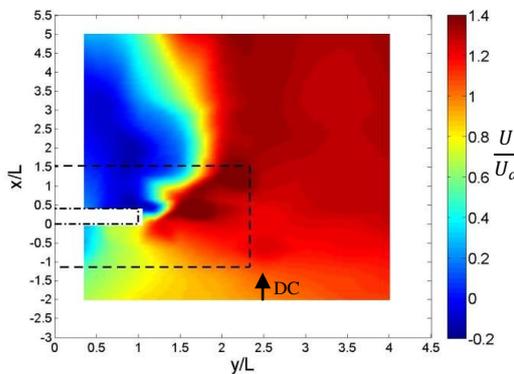
configuración del flujo medio correspondiente a esta instancia del desarrollo de erosiones permite identificar un sector del flujo caracterizado por tener velocidades medias menores a las existentes en derredor ( $\frac{y}{L} \approx 3.5$ ), con  $\frac{U}{U_a} \approx 1.0$ . Este sector se localiza en todos los casos sobre el talud exterior de la hoya, próxima a su borde lateral.



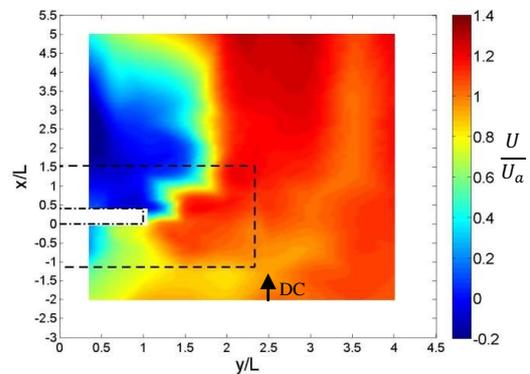
**Figura V.30.-** Mapa de contornos de velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{U}{U_a}$ . Estribo protegido. Ensayo EVI (tiempo de evolución de las erosiones t=0min)



**Figura V.31.-** Mapa de contornos de velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{U}{U_a}$ . Estribo protegido. Ensayo EVII (tiempo de evolución de las erosiones t=100min)

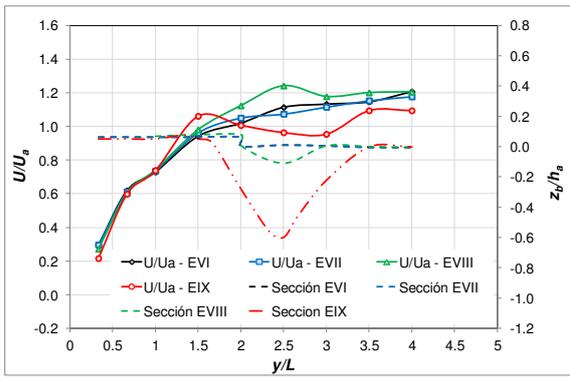


**Figura V.32.-** Mapa de contornos de velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{U}{U_a}$ . Estribo protegido. Ensayo EVIII (tiempo de evolución de las erosiones t=400min)

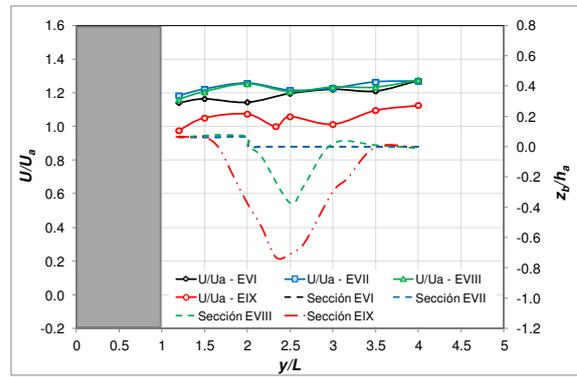


**Figura V.33.-** Mapa de contornos de velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{U}{U_a}$ . Estribo protegido. Ensayo EIX (tiempo de evolución de las erosiones t=2880min)

A partir de la información utilizada en la confección de las figuras V.30 a V.33 se construyeron las figuras V.34 a V.39 en las que se representaron, para 6 de las secciones en las que se midieron velocidades con ADV, la distribución transversal de velocidades longitudinales medias en la vertical correspondientes a cada una de las configuraciones del lecho representadas en los ensayos EVI; EVII; EVIII y EIX. De manera tal de poder asociar la estructura del flujo medio con la morfología del lecho se incluyeron los perfiles del fondo de cada una de las secciones consideradas. Las velocidades y las posiciones del lecho fueron volcados en forma adimensional, por lo que los ejes coordenados de las figuras V.34 a V.39 son equivalentes a los de las figuras V.26 a V.29, presentadas cuando se analizó el campo de flujo medio para la situación de erosión junto el estribo sin protección.



**Figura V.34.-** Distribución transversal de la velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{U}{U_a}$  y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = -0.67$ . Estribo protegido. Ensayos EVI (t=0min)- EVII (t=100min)- EVIII (t=400min)- EIX (t=2880min)



**Figura V.35.-** Distribución transversal de la velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{U}{U_a}$  y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = 0.0$ . Estribo protegido. Ensayos EVI (t=0min)- EVII (t=100min)- EVIII (t=400min)- EIX (t=2880min)

El análisis de las figuras V.34 a V.39 permite visualizar el progreso conjunto del proceso de erosión y configuración del flujo asociado, para el caso de un estribo protegido como el considerado en este estudio. Estas figuras demuestran como transcurridos los primeros 100 minutos del proceso de erosión (ensayo EVII) las profundizaciones solo resultaron importantes aguas abajo del borde de la protección, siendo prácticamente imperceptibles hacia aguas arriba, inclusive para la propia sección del estribo. Resulta en consecuencia que esta conformación del fondo solo repercute en la configuración del flujo en la zona

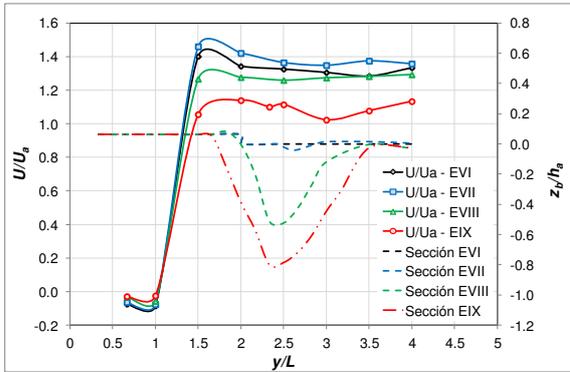
afectada por las erosiones, para la que se distingue un desplazamiento hacia margen derecha de la zona de recirculación del flujo originada aguas abajo de la contracción geométrica impuesta por la presencia del estribo, pero sin cambios significativos en las magnitudes de las máximas velocidades (Figs. V.38 y V.39). En el resto del tramo analizado, para esta instancia del proceso erosivo, las velocidades se mantienen inalteradas respecto de las observadas para la situación inicial (ensayo EVI).

Las figuras V.34 a V.39 demuestran que al cabo de 400 minutos tuvo lugar un importante desarrollo de erosiones, pudiendo verse una fosa bien definida hasta en la propia sección de emplazamiento del estribo. No obstante ello las velocidades medias se afectaron solo hasta la sección de progresiva longitudinal  $\frac{x}{L} = 1.33$  (Figs V.37, V.38; V.39), tramo para el que el sector de flujo principal presenta una distribución de velocidades uniforme, aún por fuera de la hoya de erosión, con valores que en todos los casos resulto de  $1.3U_a$  aproximadamente.

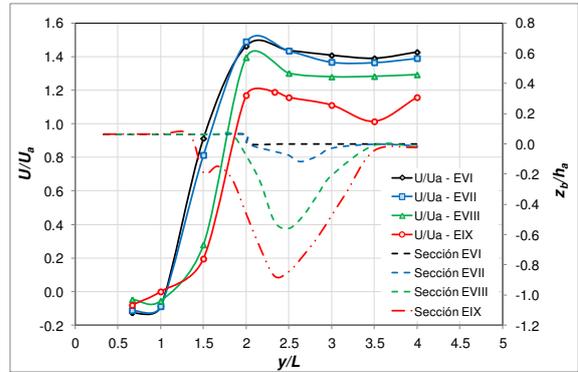
Recién cuando se evaluó el campo de velocidades con el mayor grado de desarrollo de erosiones considerado (48 hs, ensayo EIX) pudo observarse una disminución generalizada de velocidades en todas las secciones transversales mostradas (Figs V.34 a V.39), pudiendo al respecto mencionarse las siguientes particularidades:

- Aguas arriba de la sección de emplazamiento del estribo (Fig. V.34) la velocidades medias resultaron menores a las evaluadas en los estados anteriores sólo en el sector de escurrimiento que involucra a la hoya de erosión.
- En la sección de escurrimiento delimitada por la presencia del estribo las velocidades medias disminuyeron todo a lo ancho, independientemente que se considere el sector del lecho que sufrió profundizaciones o aquel que no resultó afectado por las erosiones (Fig. V.35).
- En la parte del escurrimiento dominada por la contracción del flujo las velocidades máximas se redujeron notablemente respecto de la situación inicial, aún en la parte de la sección por fuera de la hoya de erosión, en las proximidades de margen derecha. En este sector las máximas velocidades resultaron del orden de  $1.2 U_a$  (Figs. V.36 a V.39).

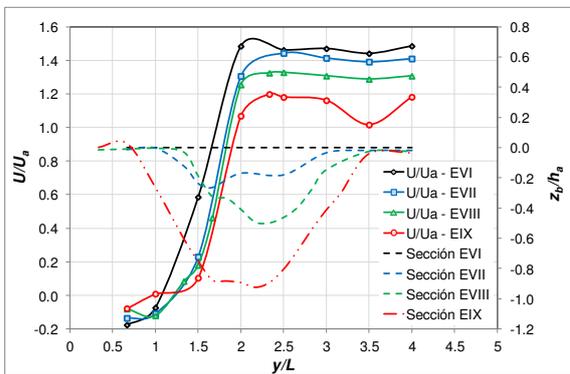
Un aspecto distintivo encontrado en las distribuciones de velocidades en las secciones representativas de este tramo es la aparición de una franja de flujo, localizada próxima al borde exterior de la hoya de erosión, en la que las velocidades medias en la vertical resultaron menores y aproximadamente iguales a  $U_a$ .



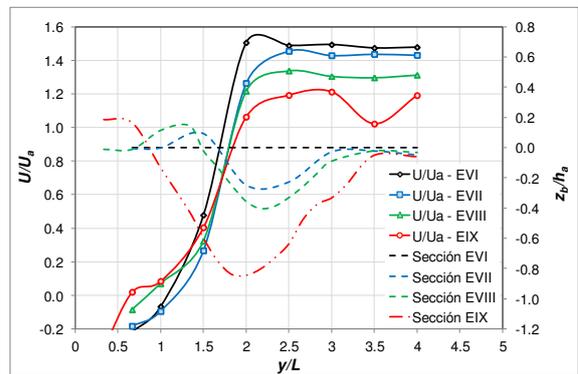
**Figura V.36.-** Distribución transversal de la velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{U}{U_a}$  y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = 0.67$ . Estribo protegido. Ensayos EVI (t=0min)- EVII (t=100min)- EVIII (t=400min)- EIX (t=2880min)



**Figura V.37.-** Distribución transversal de la velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{U}{U_a}$  y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = 1.33$ . Estribo protegido. Ensayos EVI (t=0min)- EVII (t=100min)- EVIII (t=400min)- EIX (t=2880min)



**Figura V.38.-** Distribución transversal de la velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{U}{U_a}$  y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = 2.0$ . Estribo protegido. Ensayos EVI (t=0min)- EVII (t=100min)- EVIII (t=400min)- EIX (t=2880min)



**Figura V.39.-** Distribución transversal de la velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{U}{U_a}$  y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = 2.67$ . Estribo protegido. Ensayos EVI (t=0min)- EVII (t=100min)- EVIII (t=400min)- EIX (t=2880min)

Un aspecto encontrado que resulta de interés señalar es el hecho que, para ambas situaciones de estribo estudiadas, una vez desarrolladas las máximas erosiones contempladas en este trabajo, las máximas velocidades medias alcanzadas en uno y otro caso fueron semejantes, esto es  $U_{Max} \cong 1.2U_a$ , pero con distribuciones de velocidades en planta diferentes.

### V.3.2 Caudales específicos

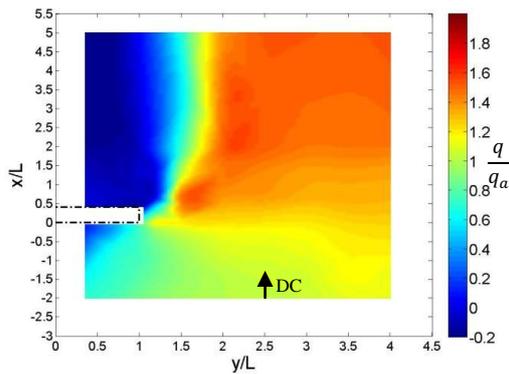
En este ítem se analizan las modificaciones que sobre la configuración inicial del escurrimiento provoca el desarrollo de erosiones en torno al estribo. Para cumplir con ello se ha evaluado el caudal específico actuante en cada una de las verticales de medición consideradas en las diferentes experiencias (Figs. II.23 y II.24). Este caudal por unidad de ancho,  $q$ , se calculó como el producto de la profundidad del flujo,  $h$ , correspondiente a la vertical en análisis y la velocidad media en la vertical,  $U$ , resultante de la integración del perfil, esto es, en cada posición particular de que se trate

$$q=U.h \quad (V.1)$$

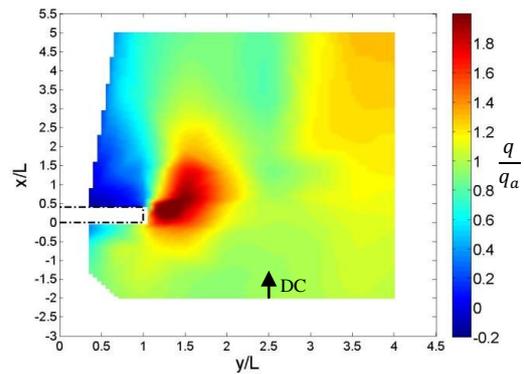
En las figuras V.40 y V.41 se representan los mapas de contornos de  $q$  correspondientes a las dos situaciones contempladas para el caso de estribo sin protección, (ensayos EIV y EV). En las figuras V.40 y V.41, así como también en las que se presenten para el caso de estribo protegido, las distancias longitudinales y transversales han sido consideradas en forma adimensional, esto es  $\frac{x}{L}$ ;  $\frac{y}{L}$  y la escala de colores a la derecha de cada gráfica representa valores de  $q/q_a$ , donde:

$q_a = U_a h_a$ ; es el caudal específico correspondiente a la vertical central del flujo de aproximación.  $U_a$ ,  $h_a$  son la velocidad media y la profundidad de la vertical central del flujo de aproximación respectivamente.

La figura V.40 refleja una distribución inicial de caudales específicos en total consonancia con la configuración inicial de velocidades longitudinales (Fig. V.24), hecho determinado por la uniformidad en los niveles del lecho que existió en la totalidad del área representada.



**Figura V.40.-** Mapa de contornos de caudal específico adimensional,  $\frac{q}{q_a}$ . Estribo sin protección. Ensayo EIV (tiempo de evolución de las erosiones t=0min)



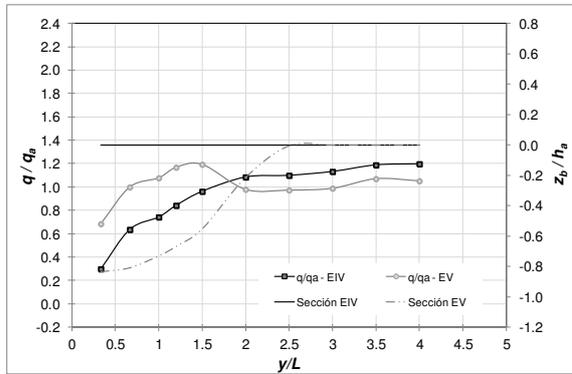
**Figura V.41.-** Mapa de contornos de caudal específico adimensional,  $\frac{q}{q_a}$ . Estribo sin protección. Ensayo EV (tiempo de evolución de las erosiones t=2880min)

Cuando se analiza la figura V.41 surgen las siguientes consideraciones respecto de la distribución de caudales una vez desarrollado el proceso de erosión en torno al estribo sin protección:

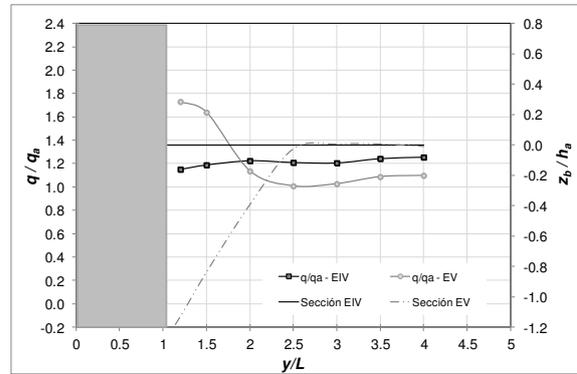
- Se produce una gran incorporación de caudales en la zona del escurrimiento que incluye a la hoya de erosión, derivado desde el sector contiguo más próximo a la margen derecha.
- Aguas arriba de la hoya de erosión se puede ver un sector del escurrimiento en dirección a la hoya que demuestra aumentos en los valores de  $q$ , respecto de la situación inicial, debido al “llamado” de caudal desde la fosa de erosión.
- Aguas abajo del sector con mayores profundizaciones, aparecen caudales menores a los iniciales en el sector de flujo contraído, lo cual se justifica en el mayor ancho en el cual se distribuye el caudal una vez desarrolladas las erosiones, producto de la retracción hacia margen izquierda de la zona de recirculación y capa de corte desprendidas desde el estribo, tal como fuera mostrada al tratar los campos superficiales de velocidad.

En las figuras V.42 a V.45 se presentan las distribuciones transversales de caudales específicos para las mismas cuatro secciones transversales presentadas para el caso de las velocidades medias (Figs. V.26 a V.29). En el eje de las abscisas se volcaron las

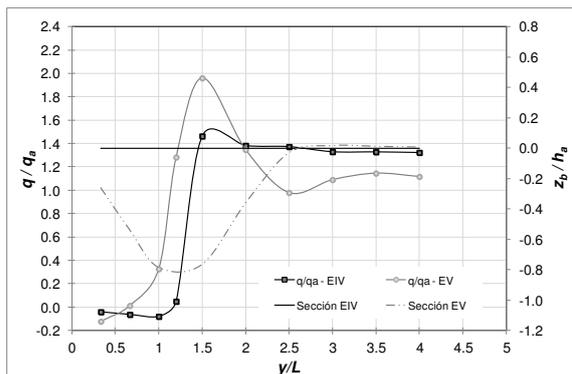
progresivas en que las velocidades fueron medidas, en forma adimensional,  $\frac{y}{L}$ . En cada una de las figuras están representadas los valores de  $q/q_a$  correspondientes a la situaciones inicial (ensayo EIV) y con el máximo nivel de erosión representado para este caso (ensayo EV), como así también los niveles del lecho asociados, también en forma adimensional,  $\frac{z_b}{h_a}$ .



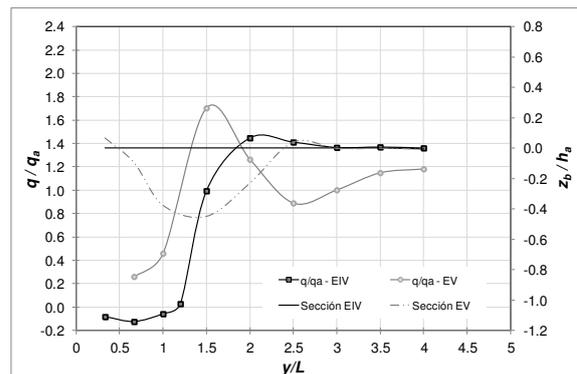
**Figura V.42.-** Distribución transversal de caudal específico adimensional,  $\frac{q}{q_a}$ , y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = -0.67$ . Estribo sin protección. Ensayos EIV (t=0min) - EV (t=2880min)



**Figura V.43.-** Distribución transversal de caudal específico adimensional,  $\frac{q}{q_a}$ , y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = 0.0$ . Estribo sin protección. Ensayos EIV (t=0min) - EV (t=2880min)



**Figura V.44.-** Distribución transversal de caudal específico adimensional,  $\frac{q}{q_a}$ , y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = 0.67$ . Estribo sin protección. Ensayos EIV (t=0min) - EV (t=2880min)



**Figura V.45.-** Distribución transversal de caudal específico adimensional,  $\frac{q}{q_a}$ , y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = 1.33$ . Estribo sin protección. Ensayos EIV (t=0min) - EV (t=2880min)

De las cuatro figuras citadas surge que el caudal específico presenta un comportamiento diferente ya sea que se trate de la porción de la sección afectada por la erosión local junto

al estribo o aquel sector en que los niveles del lecho no registran tal influencia. Por una parte, el sector exterior a la zona socavada presenta caudales específicos prácticamente uniformes, pero con valores menores a los iniciales. En efecto, se puede comprobar en las figuras V.42 y V.43, correspondientes a secciones ubicadas aguas arriba del estribo y coincidente con su cara aguas arriba respectivamente, que fuera del área de influencia de la hoya de erosión el coeficiente de amplificación de “ $q$ ” respecto de  $q_a$  pasó de 1.2 a 1.0. Para las secciones seleccionadas aguas abajo del emplazamiento del estribo ese cambio fue de 1.4 a 1.2. En estas últimas aparece, junto al borde exterior del foso de erosión, una mengua adicional en el valor de  $q$ , vinculado a la presencia de menores velocidades medias en ese sector, particularidad discutida previamente.

En la parte de la sección transversal que incluye la hoya de erosión local, el caudal específico presenta un comportamiento notablemente diferente. En esta zona se produce un marcado aumento del valor del mismo en relación al que presenta el resto de la sección y al que existía en ese mismo sitio previo al desarrollo de erosiones locales. El máximo valor de  $q$  máximo encontrado,  $q_{Max}$ , en el sector erosionado fue  $1.8q_a$ , en la propia sección del estribo (Fig. V.43) y de  $2.0q_a$  en la sección de progresiva longitudinal  $\frac{x}{L} = 0.67$  (Fig. V.44), mientras que en el momento inicial los caudales en dichas localizaciones eran de  $1.2q_a$  y  $1.4q_a$  respectivamente. Las figuras V.44 y V.45 exhiben caudales específicos mayores a los iniciales hacia la izquierda de la posición en que se da  $q_{Max}$ , ello se debe al desplazamiento de la capa de corte ya mencionado.

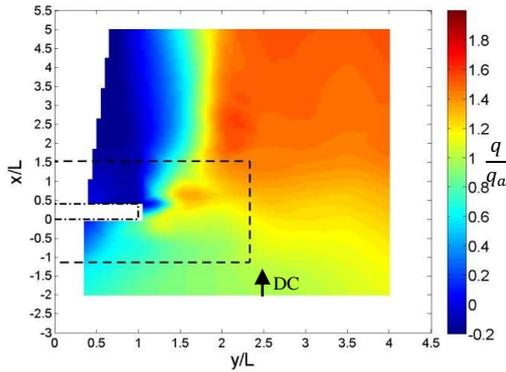
Esta tendencia general verificada en relación con la variación en la distribución de caudales cuando se desarrollan erosiones locales en torno al estribo sin protección ratifica lo demostrado en Scacchi (2003), cuando se analizó la distribución de caudales en la sección de emplazamiento de un estribo considerado largo, en el sentido establecido por Melville y Coleman, (2000).

En las figuras V.46 a V.49 se muestran los mapas de contornos de  $q/q_a$  correspondientes a cada uno de los estados de erosión representados para el caso del estribo con protección del lecho junto él. Del análisis de las figuras mencionadas se puede puntualizar lo siguiente:

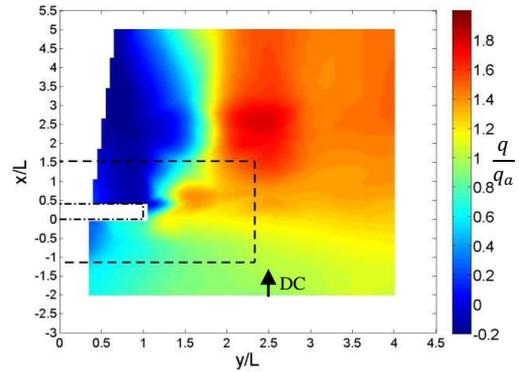
- En la medida que se va profundizando el lecho en torno a la protección progresivamente se deriva caudal hacia el sector erosionado, dando lugar a

concentraciones de flujo que resultan de mayor importancia cuanto mayor es el volumen de sedimento erosionado.

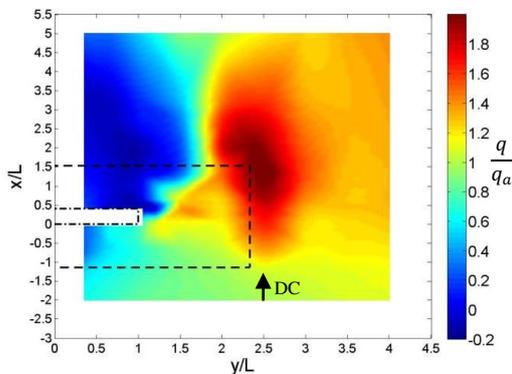
- El aporte de caudal al sector erosionado mayoritariamente proviene del tramo de escurrimiento lindero ubicado a la derecha de la fosa profundizada, (lado opuesto a la localización del estribo) (Figs. V.48 y V.49).
- A diferencia de lo visto para el caso de estribo sin protección, en el estado ensayado con el mayor desarrollo del proceso erosivo (EIX), se observan elevados valores de  $q$  casi hasta el final del tramo medido, principalmente en las inmediaciones de la línea imaginaria que pasa por el centro del canal ( $\frac{y}{L} \approx 2.5$ ).



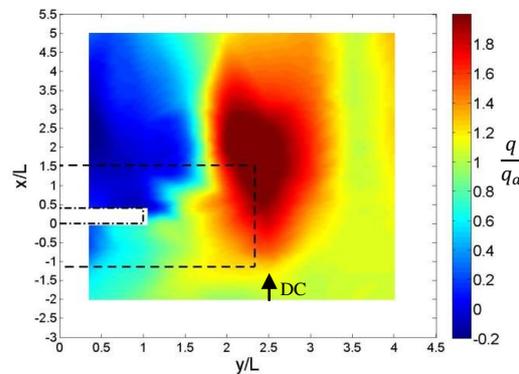
**Figura V.46.-** Mapa de contornos de caudal específico adimensional,  $\frac{q}{q_a}$ . Estribo protegido. Ensayo EVI (tiempo de evolución de la erosión  $t=0\text{min}$ )



**Figura V.47.-** Mapa de contornos de caudal específico adimensional,  $\frac{q}{q_a}$ . Estribo protegido. Ensayo EVII (tiempo de evolución de la erosión  $t=100\text{min}$ )

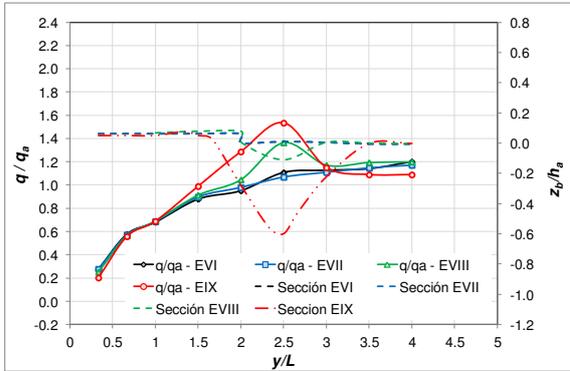


**Figura V.48.-** Mapa de contornos de caudal específico adimensional,  $\frac{q}{q_a}$ . Estribo protegido. Ensayo EVIII (tiempo de evolución de la erosión  $t=400\text{min}$ )

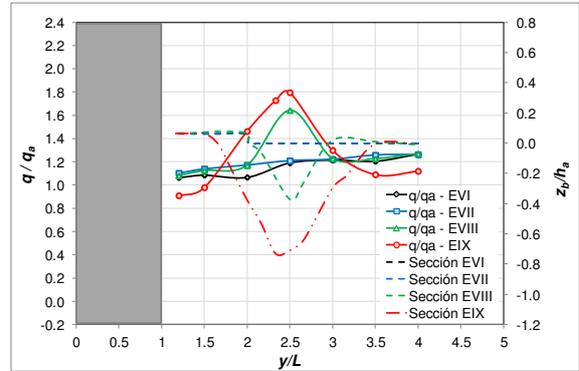


**Figura V.49.-** Mapa de contornos de caudal específico adimensional,  $\frac{q}{q_a}$ . Estribo protegido. Ensayo EIX (tiempo de evolución de la erosión  $t=2880\text{min}$ )

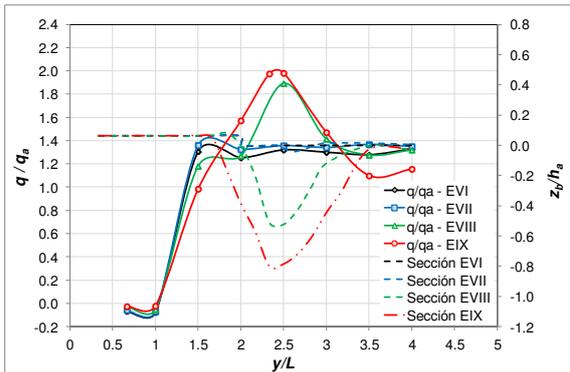
Las variaciones de las distribuciones de  $q/q_a$  durante el proceso de erosión junto al estribo protegido y los perfiles del lecho asociados se muestran en las figuras V.50 a V.55 para las seis secciones transversales de progresivas longitudinales  $\frac{x}{L}$ : -0.67; 0.0; 0.67; 1.33; 2.0 y 2.67. El eje de abscisas y los dos ejes de ordenadas han sido considerados de igual modo que en las figuras V.42 a V.45, presentadas para el caso de estribo sin protección.



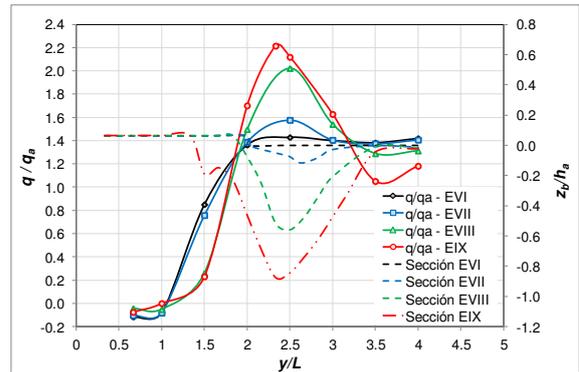
**Figura V.50.-** Distribución transversal de caudal específico adimensional,  $\frac{q}{q_a}$ , y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = -0.67$ . Estribo con protección. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (t=400min) – EIX (t=2880min)



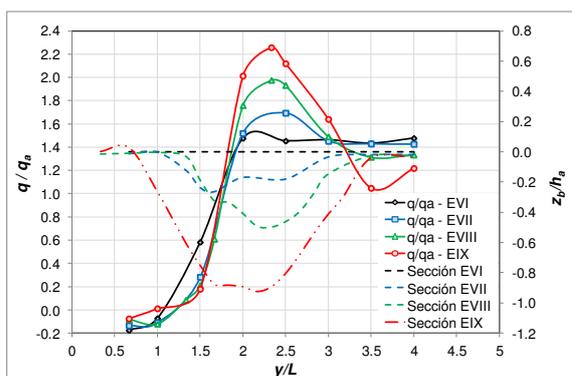
**Figura V.51.** Distribución transversal de caudal específico adimensional,  $\frac{q}{q_a}$ , y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = 0.0$ . Estribo con protección. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (t=400min) – EIX (t=2880min)



**Figura V.52.-** Distribución transversal de caudal específico adimensional,  $\frac{q}{q_a}$ , y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = 0.67$ . Estribo con protección. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (t=400min) – EIX (t=2880min)

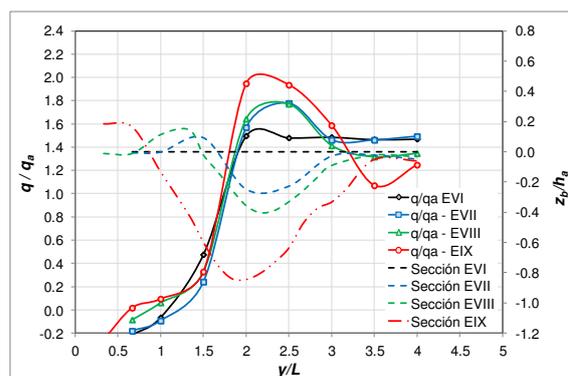


**Figura V.53.-** Distribución transversal de caudal específico adimensional,  $\frac{q}{q_a}$ , y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = 1.33$ . Estribo con protección. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (t=400min) – EIX (t=2880min)



**Figura V.54.-** Distribución transversal de caudal específico adimensional,  $\frac{q}{q_a}$ , y perfiles del lecho.

Sección  $\frac{x}{L} = 2.0$ . Estribo con protección. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (t=400min) – EIX (t=2880min)



**Figura V.55.-** Distribución transversal de caudal específico adimensional,  $\frac{q}{q_a}$ , y perfiles del lecho.

Sección  $\frac{x}{L} = 2.67$ . Estribo con protección. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (t=400min) – EIX (t=2880min)

Las figuras V.50 a V.55 demuestran algunos aspectos semejantes a los observados para el caso de estribo sin protección. Los datos relevados en correspondencia con la situación inicial permiten visualizar que en la sección de emplazamiento del estribo y en el resto de las secciones consideradas hacia aguas abajo los caudales específicos se distribuyen en forma uniforme en el tramo de flujo principal, hacia la derecha por fuera de la zona de recirculación. Se observa que, en la medida que el lecho se profundiza en torno a la protección, los caudales específicos en el sector de la sección no afectado por la erosión son tanto menores, en la medida que mayores son las profundizaciones del lecho. Este hecho sugiere que la derivación de caudales hacia el sector erosionado progresa con el avance de la socavación. Por el contrario, en donde se desarrolla la hoya de erosión, las curvas muestran un caudal específico máximo,  $q_{Max}$ , cuya magnitud resulta creciente con el aumento de la profundidad de erosión. Se puede ver como en el sitio en donde la profundidad de erosión tuvo el mayor desarrollo (Fig. V.54)  $q_{Max}$  llegó a ser  $2.2q_a$  aproximadamente, es decir un 50 % superior al valor de  $q$  que existía en dicha posición al inicio del proceso.

El análisis conjunto de las figuras V.50 a V.55 reafirma el hecho, ya mencionado, en relación al avance hacia aguas arriba que tiene el proceso de erosión en torno al estribo protegido con mantas flexibles, el cual se corresponde con la evolución mostrada por la distribución de caudales. A modo de ejemplo se menciona, como para los primeros

momentos las secciones ubicadas más aguas abajo denotan el llamado de caudal hacia el sector que muestra una profundización incipiente (EVII de Figs. V.54 y V.55), mientras que en las ubicadas más aguas arriba la distribución de  $q$  aún luce inalterada respecto de la situación inicial (EVII de Fig. V.50). Se destaca como en algunas situaciones se perciben incrementos de caudales en determinadas secciones que responden más al grado de erosión de las secciones localizadas más aguas abajo, que a la propia profundización experimentada, tal cual como se observa en la figura V.50, en la curva correspondiente al ensayo EVIII.

### V.3.3 Energía asociada a las fluctuaciones de velocidad, media en la vertical

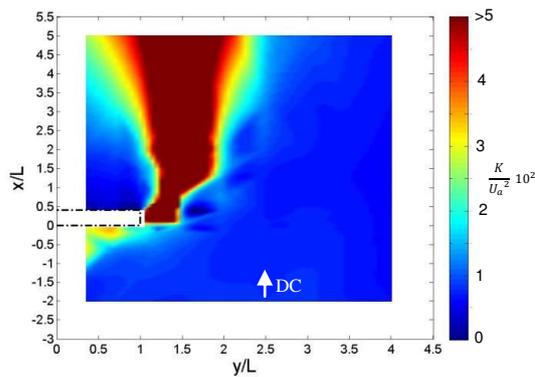
A partir de las series de velocidades medidas en cada punto se estimó la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad, media en la vertical,  $K$ . La misma fue calculada integrando en la vertical dicho parámetro evaluado en los distintos puntos de medición,  $k$ , de modo tal que

$$k = 0.5[\langle u'^2 \rangle + \langle v'^2 \rangle + \langle w'^2 \rangle] \quad (\text{V.2})$$

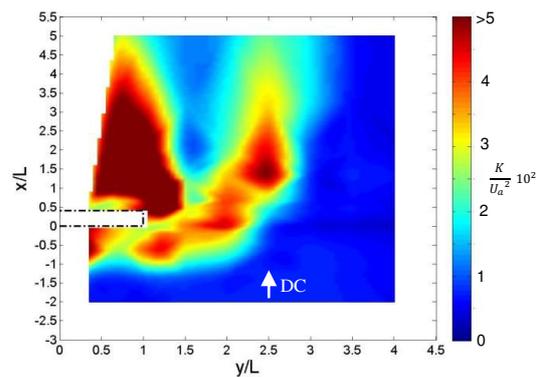
donde:

$\langle u'^2 \rangle$ ;  $\langle v'^2 \rangle$ ;  $\langle w'^2 \rangle$  son las varianzas de las señales de las componentes del vector velocidad en las tres direcciones principales,  $\langle u \rangle$  (dirección longitudinal),  $\langle v \rangle$  (dirección transversal),  $\langle w \rangle$  (dirección vertical), medidos en cada localización.

La distribución espacial que presenta dicho parámetro, calculado a partir de las condiciones del flujo entorno al estribo sin protección del lecho, se muestra en la figura V.56 para el caso correspondiente a la situación inicial del proceso de erosión (EIV) y en la figura V.57 para la condición de máxima erosión ensayada en este estudio (EV). Los valores de  $K$  se han adimensionalizado con un indicador de la energía cinética media del flujo de aproximación ( $U_a^2$ ), consignándose los valores de  $\frac{K}{U_a^2} * 100$  en las escalas correspondientes.



**Figura V.56.-** Mapa de contornos de energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{K}{(U_a)^2} * 10^2$ . Estribo sin protección. Ensayo EIV (tiempo de evolución de la erosión t=0min)



**Figura V.57.-** Mapa de contornos de energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{K}{(U_a)^2} * 10^2$ . Estribo sin protección. Ensayo EV (tiempo de evolución de la erosión t=2880min)

En la figura V.56 se observa cómo, previo al inicio de las profundizaciones del lecho, los más altos niveles de energía asociado a las fluctuaciones de velocidad medios tienen lugar dentro de la capa de corte desprendida desde el estribo. En esta región los valores de  $K$  son varias veces superiores, aproximadamente un orden de magnitud, a los encontrados en el flujo contiguo, hacia el centro del canal. Un análisis detallado de las condiciones del flujo medidas sin erosiones del lecho permite identificar que el valor máximo de  $K$  fue registrado en la vertical de progresiva transversal  $\frac{y}{L} = 1.5$ , demostrando una variabilidad lateral relativamente grande. Es por ello que, de acuerdo a la metodología de medición de velocidades empleada, el gradiente en la distribución lateral de  $K$  dentro de la capa de corte y las evidencias surgidas del campo superficial de velocidades (ítem V.1, figuras V.18 a V.23) se considera que los resultados derivados del presente estudio permiten evaluar la evolución de las regiones de mayor energía de las fluctuaciones con el desarrollo de las erosiones, pero no permiten concluir específicamente en relación con el comportamiento del máximo valor de  $K$  dentro de la capa de corte, ya que pequeños desplazamientos que ésta pudiera haber experimentado tendría como consecuencia que el máximo valor no se hubiera registrado. En este sentido se considera que las figuras V.56 y V.57, y las figuras equivalentes que a posteriori se presentan para el caso de estribo protegido, son ilustrativas de la evolución de la región del flujo con elevados valores de  $K$ , la cual involucra a la capa

de corte desprendida desde el estribo. El valor máximo de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical adimensional consignado en la escala de colores anexa a las figuras mencionadas ( $>5$ ) refiere a esta situación planteada.

Una comparación entre las figuras V.56 y V.57 permite distinguir algunos cambios en la estructura del flujo en torno al estribo ocurridos entre el comienzo del proceso de erosión (lecho plano, EIV) y la situación próxima a las condiciones de equilibrio (lecho representado en EV). En primer lugar se advierte, en figura V.57, un cambio en la orientación de la región de flujo con elevados valores de energía, cuya traza, respecto de la dirección longitudinal, muestra una tendencia de desplazamiento hacia la zona de depósito de sedimento, proveniente del sector erosionado, localizada aguas abajo de la hoya (Fig. IV.11). Producto de este comportamiento los valores de  $K$ , una vez desarrollada la erosión local, decaen con mayor velocidad en la dirección longitudinal respecto de la situación inicial de lecho plano.

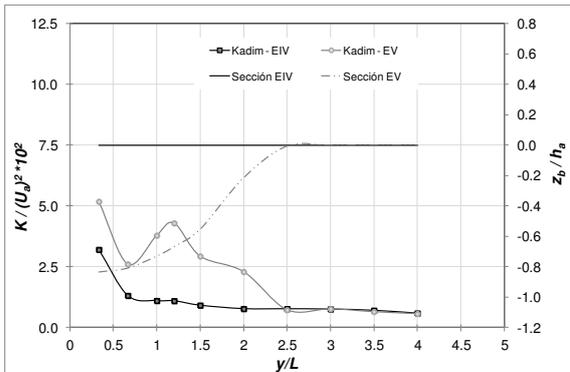
En la figura V.57 aparece también como aspecto distintivo una franja de flujo para la que los niveles de energía media en la vertical resultaron por encima del correspondiente a la porción de flujo que escurre por fuera de la hoya de erosión, próxima a margen derecha, pero inferiores a los valores máximos encontrados en la capa de corte.

Los resultados que se exponen en las figuras V.58 a V.61 permiten afirmar las consideraciones antes mencionadas, así como también exponer los máximos valores de  $K$  evaluados. Se muestran allí las distribuciones transversales de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad en forma adimensional y los perfiles del lecho correspondientes a los ensayos EIV y EV, en cuatro de las secciones en que se realizaron las mediciones de velocidad.

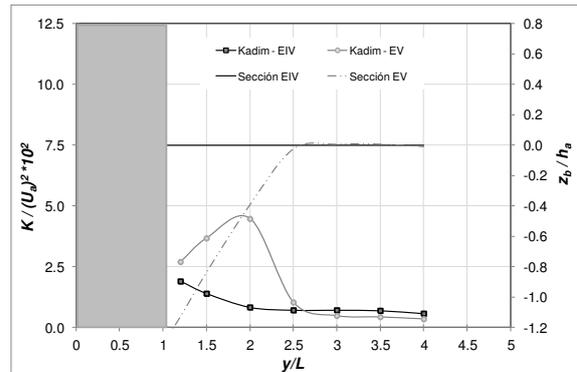
Las figuras V.58 y V.59, correspondientes a secciones transversales de progresivas longitudinales  $\frac{x}{L} = -0.67$  y  $\frac{x}{L} = 0.0$ , muestran valores máximos de energía promedio superiores en 5 veces a los del flujo circundante. Esta circunstancia se atribuye a la presencia del vórtice principal, mecanismo determinante de las erosiones locales en dicho sector.

Las figuras V.60 y V.61, construidas a partir de datos relevados en las secciones ubicadas

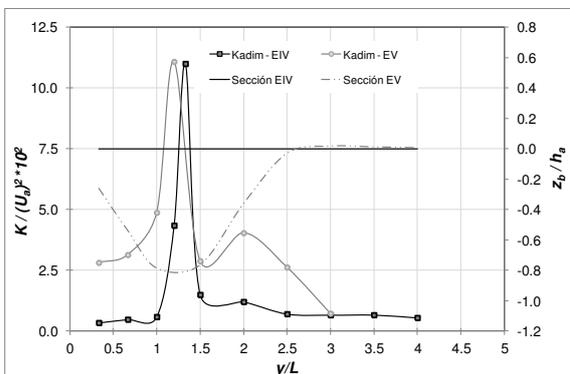
en  $\frac{x}{L} = 0.67$  y  $\frac{x}{L} = 1.33$ , demuestran el desplazamiento hacia margen izquierda de la capa de corte desprendida desde el estribo, lo cual se observa como un corrimiento del valor pico de  $K$ . También puede verse un segundo pico para la energía promedio, de menor magnitud, con valores equivalentes a los máximos encontrados en las secciones mostradas en las figuras V.58 y V.59; localizado en todos los casos sobre el talud exterior de la hoya de erosión.



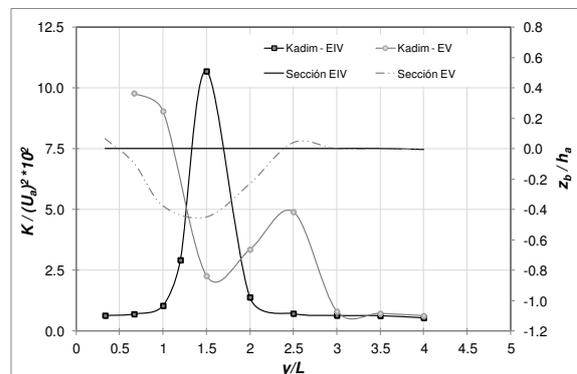
**Figura V.58.-** Distribución transversal de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{K}{(U_a)^2}$  y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = -0.67$ . Estribo sin protección. Ensayos EIV (t=0min) y EV (t=2880min)



**Figura V.59.-** Distribución transversal de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{K}{(U_a)^2}$  y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = 0.0$ . Estribo sin protección. Ensayos EIV (t=0min) y EV (t=2880min)

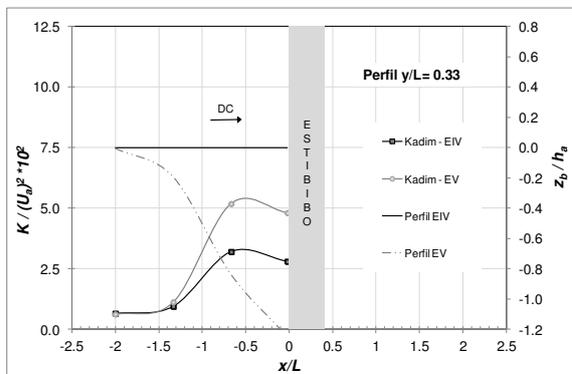


**Figura V.60.-** Distribución transversal de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{K}{(U_a)^2}$  y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = 0.67$ . Estribo sin protección. Ensayos EIV (t=0min) y EV (t=2880min)

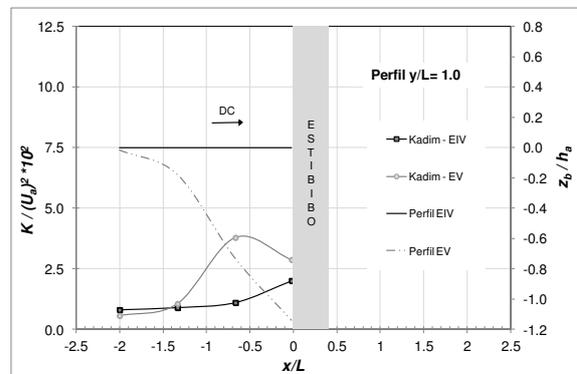


**Figura V.61.-** Distribución transversal de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{K}{(U_a)^2}$  y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = 1.33$ . Estribo sin protección. Ensayos EIV (t=0min) y EV (t=2880min)

Los valores de  $K$  también resultaron amplificados en la región de recirculación que se desarrolla aguas arriba del estribo. Este hecho puede verse con mayor claridad en las figuras V.62 y V.63 en las que se muestran las variaciones longitudinales de la energía media de las fluctuaciones adimensional en dos planos verticales correspondientes a las progresivas transversales  $\frac{y}{L} = 0.33$  e  $\frac{y}{L} = 1.0$ , los dos perpendiculares al eje del estribo.



**Figura V.62.-** Distribución longitudinal de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{K}{(U_a)^2}$  y perfiles del lecho. Perfil  $\frac{y}{L} = 0.33$ . Estribo sin protección. Ensayos EIV (t=0min) y EV (t=2880min)

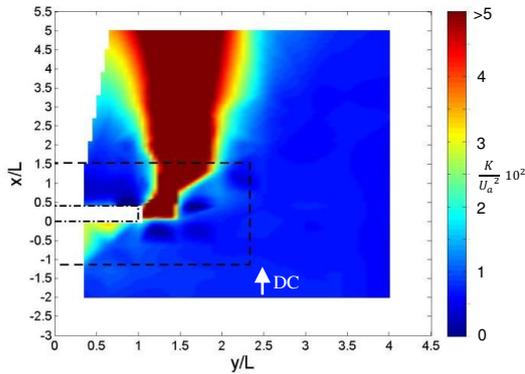


**Figura V.63.-** Distribución longitudinal de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{K}{(U_a)^2}$  y perfiles del lecho. Perfil  $\frac{y}{L} = 1.0$ . Estribo sin protección. Ensayos EIV (t=0min) y EV (t=2880min)

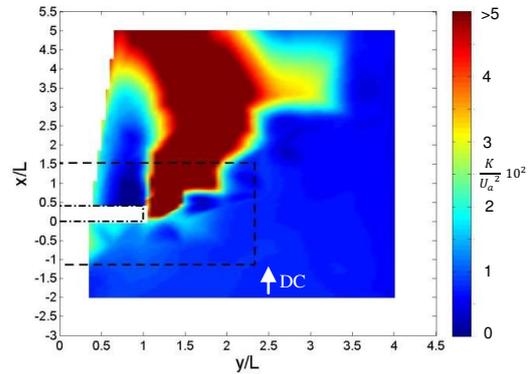
Ambas figuras demuestran valores de  $K$  incrementándose en la medida que el flujo se aproxima al estribo, fenómeno que sucede con mayor intensidad en las proximidades del encuentro entre la cara del estribo y la pared del canal (Fig. V.62).

Tal como lo demuestran las figuras V.62 y V.63 la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad aumenta con el desarrollo de las erosiones aguas arriba del estribo, encontrándose los mayores valores a una distancia aproximada de  $0.67 L$ , desde el borde aguas arriba del estribo. El comportamiento de  $K$  en este sector se asocia con la compleja configuración del flujo existente, la cual se caracteriza por la presencia de un flujo descendente y diferentes vórtices de ejes paralelos y perpendiculares al lecho, tal como lo mencionan autores como Chrisoides et al. (2003) y Koken y Constantinescu (2008; 2011).

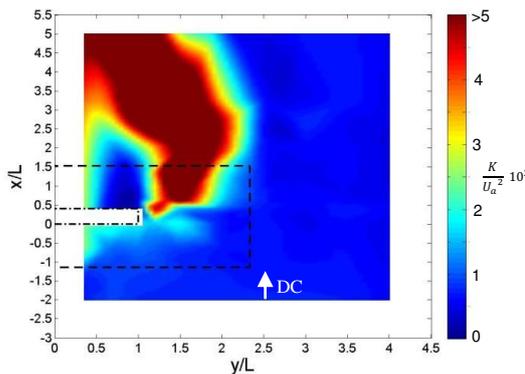
Las distribuciones de  $\frac{K}{U_a^2}$  en las diferentes instancias del proceso de erosión en torno al estribo protegido se muestran en las figuras V.64 a V.67.



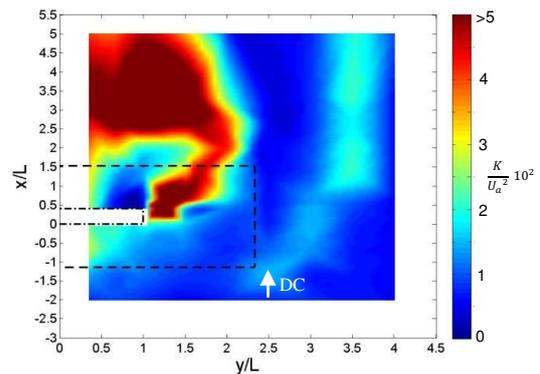
**Figura V.64.-** Mapa de contornos de energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{K}{(U_a)^2} * 10^2$ . Estribo protegido. Ensayo EVI (tiempo de evolución de la erosión t=0min)



**Figura V.65.-** Mapa de contornos de energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{K}{(U_a)^2} * 10^2$ . Estribo protegido. Ensayo EVII (tiempo de evolución de la erosión t=100min)



**Figura V.66.-** Mapa de contornos de energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{K}{(U_a)^2} * 10^2$ . Estribo protegido. Ensayo EVIII (tiempo de evolución de la erosión t=400min)



**Figura V.67.** Mapa de contornos de energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{K}{(U_a)^2} * 10^2$ . Estribo protegido. Ensayo EIX (tiempo de evolución de la erosión t=2880min)

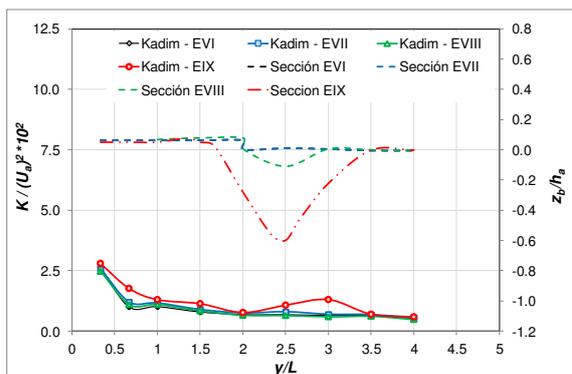
La región de altos valores de energía media presente en la situación de estribo no protegido (Fig. V.56), se observa de igual manera en la figura V.64, correspondiente a la situación

inicial cuando la protección estuvo presente (EVI). Las figuras V.65 a V.67 sugieren que los cambios experimentados en la morfología del lecho tienen su efecto sobre la localización de la capa de corte desprendida desde el estribo y la zona de recirculación contigua, limitada por la pared del canal de margen izquierda. En efecto, el tramo aguas arriba de esta región, comprendida entre el estribo y aproximadamente la progresiva longitudinal  $\frac{x}{L} = 2.5$ , altera su orientación promedio con el desarrollo de las erosiones, experimentando una inclinación hacia margen derecha, determinada por un ángulo de entre  $20^\circ$  y  $26^\circ$  respecto de la dirección longitudinal.

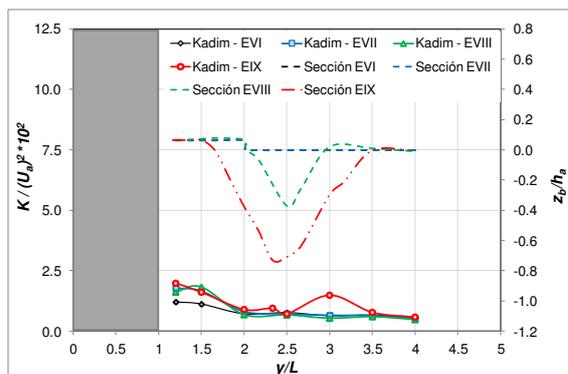
El tramo aguas abajo de esta región, caracterizada por valores elevados de energía media en la vertical, evoluciona hacia margen izquierda, alcanzando una disposición prácticamente horizontal en el estado de mayor profundización (EIX). Se destaca aquí la presencia de valores elevados de energía asociada a las fluctuaciones de velocidad en coincidencia con la zona de depósito de sedimentos proveniente del sector erosionado, (Figs IV.23 a IV.25).

En las figuras V.68 a V.73 se presentan los cambios sufridos por la distribución de la energía media durante el proceso de erosión junto al estribo protegido, para seis secciones transversales, entre las que las tres primeras tienen parte de su lecho revestido con la manta utilizada como protección del lecho (Figs V.68 a V.70) y las restantes se localizan aguas abajo de la misma.

Aguas arriba y en la propia sección del estribo no se observaron cambios significativos en las distribuciones transversales de  $\frac{K}{U_a^2}$  con el desarrollo del proceso erosivo, según puede verse en las figuras V.68 y V.69, correspondientes a las secciones transversales de progresivas longitudinales  $\frac{x}{L} = -0.67$  y  $\frac{x}{L} = 0.0$ . Aguas arriba del estribo se encontraron elevados valores de K en las inmediaciones de la pared de margen izquierda (Fig. V.68). En correspondencia con la situación de máxima erosión representada (EIX) se identifica la presencia de un pico, localizado sobre el talud exterior de la hoya de erosión, con un valor algo superior al que existía en dicha posición en los estados de erosión anteriores (EVI; EVII; EVIII).



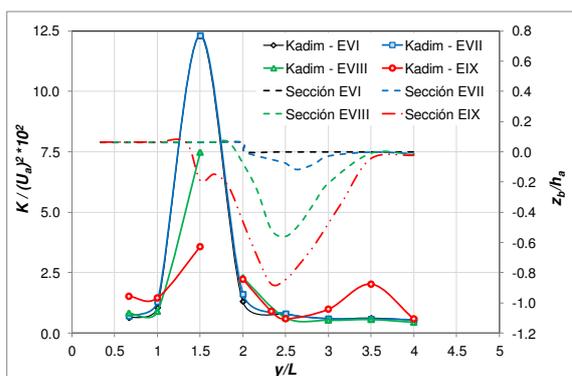
**Figura V.68.-** Distribución transversal de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{K}{(U_a)^2}$  y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = -0.67$ . Estribo protegido. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (400min) y EIX (2880min)



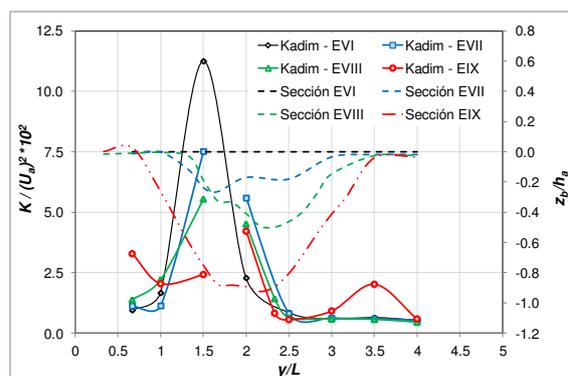
**Figura V.69.-** Distribución transversal de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{K}{(U_a)^2}$  y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = 0.0$ . Estribo protegido. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (400min) y EIX (2880min)

Las figuras V.70 a V.73 ponen en evidencia el hecho mencionado que en el momento inicial, previo al desarrollo de las erosiones, en las secciones transversales ubicadas aguas abajo del estribo el máximo valor de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical se asocia con la capa de corte desprendida desde el estribo, dando lugar a la presencia de un valor pico, con niveles muy por encima de los existentes en el flujo fuera de esta región.

Los resultados derivados de las mediciones de velocidad realizados en la sección de progresiva  $\frac{x}{L} = 1.33$  (fig. V.70), demuestran un ensanchamiento de la zona en la que inicialmente se dieron los valores más elevados de  $\frac{K}{U_a^2}$  producto de su desplazamiento en dirección a la margen opuesta a la que se inserta el estribo, en correspondencia con el sector de mayor desarrollo de erosiones, visible sobre todo en la etapa final del proceso erosivo. Esta tendencia resulta más evidente cuando se analiza la figura V.71, asociada a la sección transversal de progresiva  $\frac{x}{L} = 2.0$ , en la que aparece ya en los estados anteriores (EVII; EVIII), esto debido al hecho, ya mencionado, que las erosiones avanzan desde aguas abajo hacia aguas arriba.



**Figura V.70.-** Distribución transversal de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{K}{(U_a)^2}$  y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = 1.33$ . Estribo protegido. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (400min) y EIX (2880min)

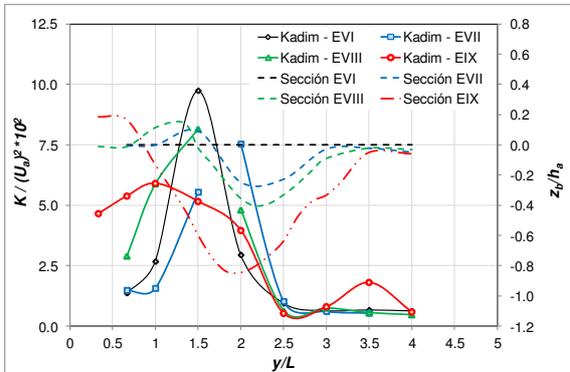


**Figura V.71.-** Distribución transversal de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{K}{(U_a)^2}$  y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = 2.0$ . Estribo protegido. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (400min) y EIX (2880min)

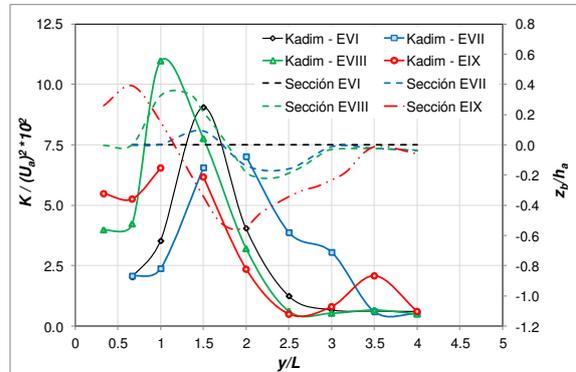
Las figuras V.70 y V.71 permiten observar que el valor de  $\frac{K}{(U_a)^2}$  progresivamente disminuyó con el desarrollo de las erosiones en la posición en que inicialmente se obtuvo la energía media en la vertical más elevada ( $\frac{y}{L} = 1.5$ ). Sin embargo, tal como fuera afirmado anteriormente, no puede descartarse que pudiera existir un valor superior al encontrado en dicha posición en algún punto desplazado lateralmente, razón por lo cual se han discontinuado las curvas que representan la distribución transversal de  $\frac{K}{(U_a)^2}$  entre las progresivas  $\frac{y}{L} = 1.5$  e  $\frac{y}{L} = 2.0$ , indicándose con ello la incertidumbre respecto de lo que ocurre con la máxima energía encontrada dentro de la capa de corte.

Las figuras V.72 y V.73 reflejan la variación en la distancia transversal de la energía media en la vertical correspondiente al tramo aguas abajo de la zona de flujo involucrada en la capa de corte y zona de recirculación adjunta. En dichas figuras puede verse como en los primeros momentos del proceso, con el inicio de las profundizaciones del lecho en ese sector (EVII), la región de flujo identificada por los mayores niveles de  $K$  se desplaza en la dirección hacia el centro del canal. A posteriori, con el progreso de las erosiones, se observa un aumento de los valores de  $\frac{K}{U_a^2}$  en las verticales más próximas a margen izquierda, dando lugar a distribuciones transversales de  $K$  que se apartan de la forma típica

encontrada en la etapa inicial del proceso. Otra característica particular que se puede observar en estas figuras es que al inicio (Ensayo EVI), en la región de recirculación los valores de  $K$  son más elevados que en el flujo principal (en el centro del canal y hacia margen derecha) debido a fluctuaciones de baja frecuencia existentes en la zona de recirculación.



**Figura V.72.-** Distribución transversal de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{K}{(U_a)^2}$  y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = 2.67$ . Estribo protegido. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (400min) y EIX (2880min)



**Figura V.73.-** Distribución transversal de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical adimensional,  $\frac{K}{(U_a)^2}$  y perfiles del lecho. Sección  $\frac{x}{L} = 3.33$ . Estribo protegido. Ensayos EVI (t=0min) – EVII (t=100min) – EVIII (400min) y EIX (2880min)

En todos los gráficos de las figuras V.68 a V.73 se puede ver para la condición de máxima erosión representada (EIX) un segundo pico de  $\frac{K}{U_a^2}$  ubicado sobre el talud exterior de la hoya de erosión, próximo a su borde. Su valor resultó semejante en todas las secciones analizadas, del orden de 0.02. Este hecho resulta equivalente a lo observado para el caso de estribo sin protección (Figs.V.58 a V.61), solo que en aquella oportunidad el valor de la energía media resultó aproximadamente el doble del observado en esta situación.

# **Capítulo VI: caracterización tridimensional del campo del flujo**

## **VI.1 Introducción**

En este Capítulo se presenta una caracterización 3D del campo del flujo asociado con el proceso de erosión que tiene lugar en torno a un estribo prismático, cuando se coloca a su lado una cubierta flexible en el lecho, tratando de identificar aspectos distintivos del proceso en las diferentes etapas contempladas.

El diseño experimental adoptado en el presente trabajo permite establecer correspondencias con el comportamiento de las principales características del escurrimiento que interviene en el desarrollo de erosiones para el caso de un estribo sin la presencia de protección alguna, situación para la que también se presentan resultados.

En primer lugar se muestra la evolución con el tiempo de velocidades y parámetros de la turbulencia acorde se desarrollan las erosiones en localizaciones aisladas, estratégicamente ubicadas, de acuerdo a la conformación del lecho resultante en los ensayos EII y EIII. En tales localizaciones se realizaron mediciones continuas de velocidades durante gran parte del proceso de erosión.

En segundo término se analizan los cambios sufridos por las distribuciones espaciales de las principales características del flujo turbulento derivadas de las mediciones de velocidades obtenidas en los ensayos EIV y EV, para la situación de estribo no protegido, y en los ensayos EVI, EVII, EVIII y EIX, para los que la protección del lecho estuvo presente.

Para mostrar los resultados encontrados en esta instancia del trabajo se seleccionaron determinadas secciones transversales, elegidas de modo tal de que con las mismas se cubran aspectos distintivos del sector erosionado. Entre las características del flujo analizadas se encuentran las variaciones en las distribuciones transversales de las componentes longitudinal y vertical de velocidades, presencia de corrientes helicoidales, distribuciones de energía asociada a las fluctuaciones de velocidades y tensiones de Reynolds.

## VI.2 Evolución temporal de velocidades y parámetros de la turbulencia en localizaciones de interés

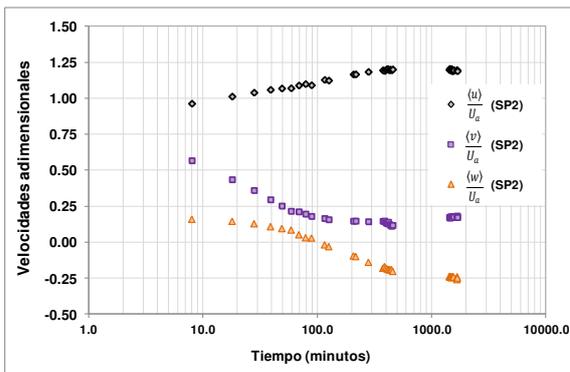
En el capítulo IV se ha presentado la evolución de los niveles del lecho durante el proceso erosivo en algunos puntos localizados en las inmediaciones del estribo, tanto para la situación sin protección (Ensayo EII), como para la de estribo protegido (Ensayo EIII). Se ha considerado de interés analizar también el comportamiento de las velocidades del flujo y parámetros de la turbulencia acorde se desarrollan las erosiones descritas anteriormente. Se utilizaron para ello las series continuas de velocidades medidas durante los ensayos EII y EIII, las cuales fueron adquiridas en algunas de las localizaciones consideradas anteriormente, a una distancia de 1 cm desde el fondo inicial, durante gran parte del desarrollo del proceso erosivo.

Para la situación de estribo sin protección las series de velocidades fueron registradas continuamente durante un intervalo de tiempo de 1980 minutos, período durante el cual, de acuerdo a la figura IV.8, el desarrollo de las erosiones fue superior al 80 %. A partir de los datos continuos registrados se generaron series temporales de velocidad con una duración de 10 minutos cada una.

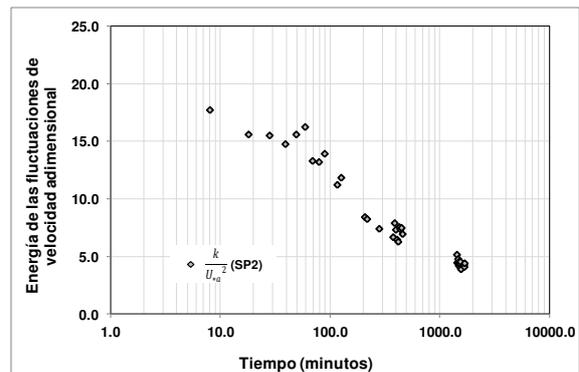
En la figura VI.1 se ha representado la variación de cada una de las componentes de la velocidad, adimensionalizadas cada una de ellas con la velocidad media en la vertical del flujo de aproximación,  $U_a$ , con el desarrollo de las erosiones junto al estribo, en la localización denominada SP2 en Figura II.21. Se destaca un leve incremento con el tiempo de la componente longitudinal,  $\frac{\langle u \rangle}{U_a}$ , y una disminución más pronunciada de la componente transversal,  $\frac{\langle v \rangle}{U_a}$ , asociada con una reorientación del flujo en dicha localización con el progreso de las erosiones, hecho que resulta coincidente con lo mostrado en el Capítulo V en relación a la posición de la capa de corte. La componente transversal de velocidad tiende a estabilizarse rápidamente, en un tiempo aproximado de entre el 3 al 7 % del tiempo total ensayado. En la figura VI.1 se observa también que la componente vertical,  $\frac{\langle w \rangle}{U_a}$ , no sólo cambia su magnitud, sino también su sentido. En los primeros instantes se aprecian valores con una dirección ascendente, mientras que, al tiempo que las restantes componentes se estabilizan,  $\frac{\langle w \rangle}{U_a}$  se anula para luego tomar una dirección descendente. Este

comportamiento se justifica en el hecho que al momento de comenzar a medir velocidades la hoya de erosión ya había comenzado su desarrollo, guiando al flujo en ese sector. Con el incremento en las erosiones el flujo involucrado en el proceso erosivo, alojado en la hoya, se va alejando del nivel del lecho original, por lo que su efecto en dicho sector se vuelve menos notable. Si se analiza la variación relativa de cada componente de velocidad en relación al valor final medido, se concluye que las componentes de la velocidad transversal y vertical experimentan variaciones relativas del orden del 200 a 250 %, en tanto la longitudinal sólo del 20%.

La figura VI.2 muestra la evolución con el tiempo de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad,  $k$ , adimensionalizada con el cuadrado de la velocidad de corte del flujo de aproximación,  $U_{*a}$ . En esta figura se demuestra la tendencia decreciente experimentada por dicho parámetro en el punto localizado en SP2, acorde al desarrollo de las erosiones locales junto al estribo. Se observa la rápida evolución en los primeros momentos, con una tasa de variación marcadamente inferior en la medida que el proceso erosivo tiende al equilibrio.



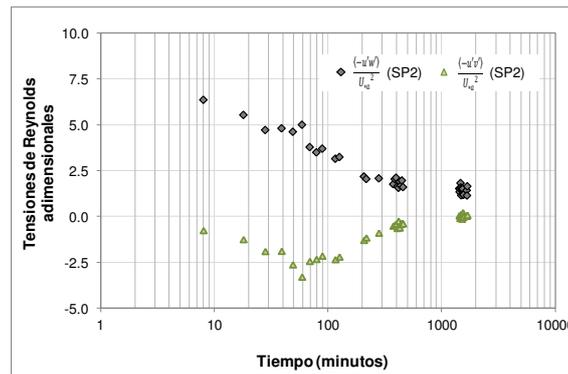
**Figura VI.1.-** Evolución de las velocidades adimensionales,  $\frac{\langle u \rangle}{U_a}$ ,  $\frac{\langle v \rangle}{U_a}$ ,  $\frac{\langle w \rangle}{U_a}$ , durante el desarrollo de erosiones en el punto SP2 de figura II.21. Estribo sin protección.  $z=1\text{cm}$ . Ensayo EII



**Figura VI.2.-** Evolución de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad, adimensional,  $\frac{k}{U_{*a}^2}$ , durante el desarrollo de erosiones en el punto SP2 de figura II.21. Estribo sin protección.  $z=1\text{cm}$ . Ensayo EII

En la figura VI.3 se graficó el comportamiento de las tensiones de Reynolds, también adimensionalizadas con el cuadrado de la velocidad de corte del flujo de aproximación,  $\frac{-\langle uv \rangle}{U_{*a}^2}$ ,  $\frac{-\langle uw \rangle}{U_{*a}^2}$ . La curva superior, que corresponde a la componente en el plano xz,  $\frac{-\langle uw \rangle}{U_{*a}^2}$ ,

demuestra un comportamiento evolutivo semejante al descrito para el caso de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad hasta aproximadamente 500 minutos de transcurrido el proceso, sin evidenciar cambios significativos a partir de dicho tiempo. Las tensiones  $\frac{-\langle uv \rangle}{U_{*a}^2}$  aumentan su magnitud durante los primeros 60 minutos del proceso, revirtiendo esa tendencia durante los siguientes 500 minutos. Al igual que lo visto para  $\frac{-\langle uw \rangle}{U_{*a}^2}$  su magnitud tiende a estabilizarse a partir de dicho intervalo de tiempo, pero en este caso con valores próximos a cero.



**Figura VI.3.-** Evolución de las tensiones de Reynolds adimensionales,  $\frac{-\langle uv \rangle}{U_{*a}^2}$ ,  $\frac{-\langle uw \rangle}{U_{*a}^2}$ , durante el desarrollo de erosiones en el punto SP2 de figura II.21. Estribo sin protección.  $z=1$ cm. Ensayo EII

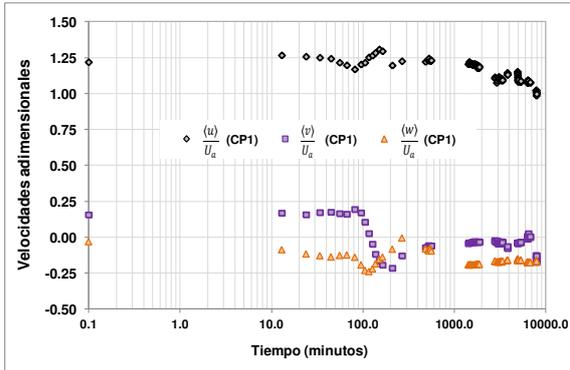
En la figura VI.4 se presenta la evolución temporal de las tres componentes de la velocidad del flujo, adimensionalizadas con la velocidad media del flujo de aproximación, correspondientes al punto CP1 (Figura II.22), durante el desarrollo de las erosiones (Ensayo EIII). En la figura VI.4 se visualiza la tendencia decreciente a lo largo de todo el proceso erosivo demostrada por la componente longitudinal de la velocidad,  $\langle u \rangle$ , la que hacia el final del experimento alcanza un valor, aproximadamente, 25 % menor al registrado al inicio de las mediciones. Sin embargo resulta interesante destacar como durante aproximadamente los primeros 100 minutos de evolución no se evidenciaron variaciones estadísticamente significativas, para ninguna de las componentes. Entre los 100 y 1000 minutos de desarrollo del proceso erosivo tanto la componente transversal,  $\langle v \rangle$ , como la vertical,  $\langle w \rangle$ , experimentan cambios de cierta consideración. En efecto se observa como  $\langle \frac{v}{U_a} \rangle$  disminuye su magnitud, cambia de orientación para finalmente tender a un valor

próximo a cero. La componente  $\langle w \rangle$  durante dicho intervalo, siempre con un sentido descendente, disminuye su magnitud prácticamente a cero para luego tender al valor existente al inicio del intervalo de tiempo. A partir de los 1000 minutos de desarrollo de las erosiones la variabilidad evidenciada por  $\langle \frac{v}{U_a} \rangle$  y  $\langle \frac{w}{U_a} \rangle$  resultó de escasa significación.

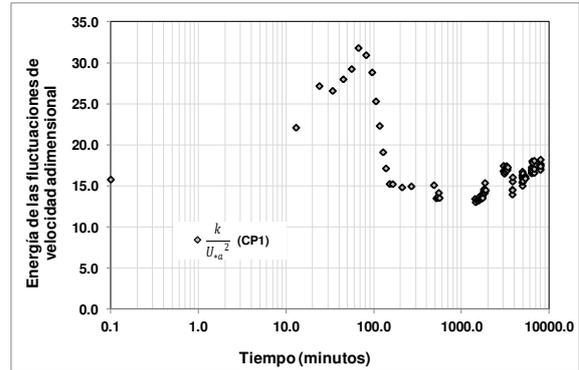
En la figura VI.5 se ha representado el comportamiento de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad, adimensionalizada con el cuadrado de la velocidad de corte del flujo de aproximación,  $\frac{k}{U_{*a}^2}$ , correspondientes al punto CP1, durante el desarrollo de las erosiones en torno al estribo protegido (Ensayo EIII), en función del tiempo transcurrido. Se destaca como este parámetro experimentó un incremento del orden del 100 % respecto de su valor inicial. Este aumento tiene lugar durante los 90-100 minutos iniciales del proceso de erosión, tal cual se observa en la figura VI.5. Este comportamiento está posiblemente asociado con la discontinuidad en el sentido longitudinal que se genera en las profundidades del lecho producto de la presencia de la protección, la cual durante las primeras instancias del proceso erosivo mantiene sus niveles originales, mientras que aguas abajo se producen descensos del lecho producto de las erosiones. En la sección VI.3.2.4 se discute este aspecto con mayor detalle. Con el desarrollo de las erosiones esta tendencia inicial se revierte, demostrando un brusco descenso en el valor  $k$ , el cual tiene lugar en un período de tiempo relativamente corto. A partir de allí los valores de  $k$  se mantienen relativamente altos y sin cambios de significación.

En la figura VI.6 se presenta las variaciones de las tensiones de Reynolds a partir de los parámetros  $\frac{-\langle urwr \rangle}{U_{*a}^2}$  y  $\frac{-\langle urvr \rangle}{U_{*a}^2}$ . En dicha figura se observa como las tensiones de Reynolds en el plano xz (longitudinal – vertical) demuestran un comportamiento similar al descripto para  $k$  durante la fase inicial del proceso, alcanzando un valor pico próximo a los 100 minutos de desarrollo del proceso. Durante dicho intervalo de tiempo las tensiones de Reynolds en el plano xy (longitudinal – transversal) aumentan su magnitud, cambiando de signo en el período. Entre los 100 y 1500 minutos aproximadamente, tanto  $\frac{-\langle urwr \rangle}{U_{*a}^2}$  como  $\frac{-\langle urvr \rangle}{U_{*a}^2}$  se mantuvieron constantes, período durante el cual la variación en las erosiones tanto en el punto CP1 como al costado de la protección fue semejante (Figura IV.7). Con el

cambio en el ritmo de las erosiones en CP1 se observa un incremento en la magnitud de las tensiones  $\frac{-\langle urvr \rangle}{U_{*a}^2}$ , mientras que  $\frac{-\langle urwr \rangle}{U_{*a}^2}$  disminuyen hasta un valor próximo a cero.

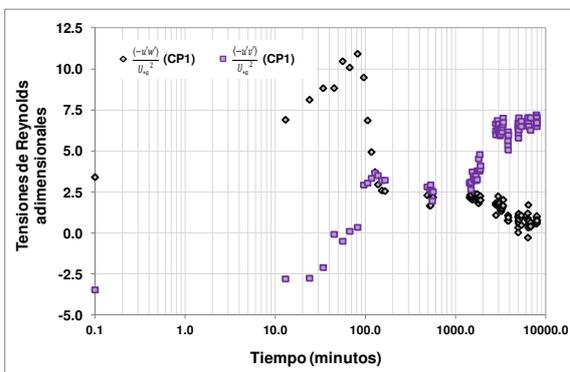


**Figura VI.4.-** Evolución de las velocidades adimensionales,  $\frac{\langle u \rangle}{U_a}$ ,  $\frac{\langle v \rangle}{U_a}$ ,  $\frac{\langle w \rangle}{U_a}$ , durante el desarrollo de erosiones en el punto CP1 de figura II.22. Estribo con protección. z= 1cm. Ensayo EIII

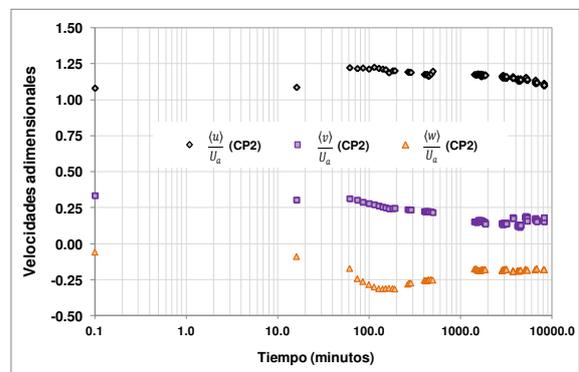


**Figura VI.5.-** Evolución de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad adimensional,  $\frac{k}{U_{*a}^2}$ , durante el desarrollo de erosiones en el punto CP1 de figura II.22. Estribo con protección. z= 1cm. Ensayo EIII

Las figuras VI.7 a VI.9 presentan el comportamiento de las condiciones del flujo en el punto CP2 localizado al costado de la protección en la sección coincidente con el eje del estribo (Figura II.22). Las variaciones de las componentes de velocidad  $\frac{\langle u \rangle}{U_a}$ ,  $\frac{\langle v \rangle}{U_a}$ ,  $\frac{\langle w \rangle}{U_a}$  con el tiempo se muestran en la figura VI.7.



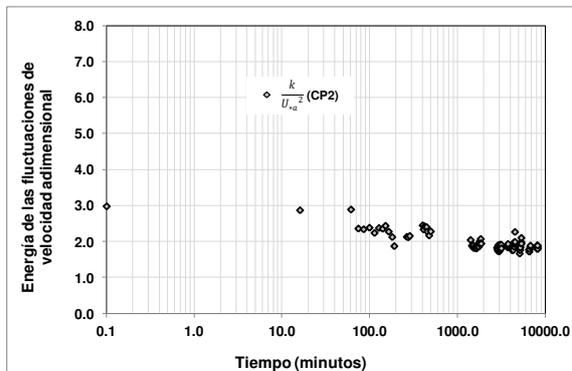
**Figura VI.6.-** Evolución de las tensiones de Reynolds adimensionales,  $\frac{-\langle urwr \rangle}{U_{*a}^2}$ ,  $\frac{-\langle urvr \rangle}{U_{*a}^2}$ , durante el desarrollo de erosiones en el punto CP1 de figura II.22. Estribo con protección. z= 1cm. Ensayo EIII



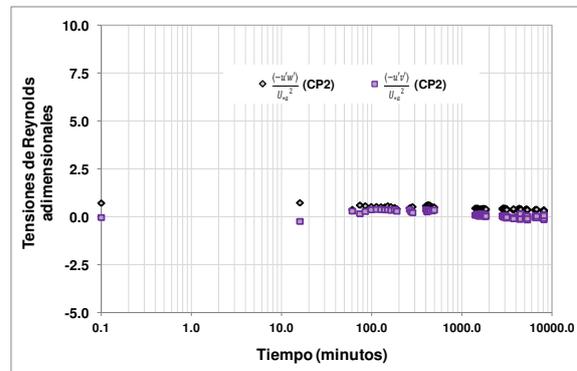
**Figura VI.7.-** Evolución de las velocidades adimensionales,  $\frac{\langle u \rangle}{U_a}$ ,  $\frac{\langle v \rangle}{U_a}$ ,  $\frac{\langle w \rangle}{U_a}$ , durante el desarrollo de erosiones en el punto CP2 de figura II.22. Estribo con protección. z= 1cm. Ensayo EIII

Del análisis conjunto de las figuras IV.7 y VI.7 surge que cuando las erosiones se hicieron presentes junto al costado de la protección, aún antes de que éstas alcancen a CP2 (aproximadamente hasta 60 min según figura IV.7), las velocidades longitudinales,  $\langle u \rangle$ , registraron un incremento del orden del 12 % en esta localización, hecho que podría justificar el avance retrogrado demostrado por las erosiones al costado de la protección. En dicho período de tiempo la componente  $\langle w \rangle$  se incrementó (flujo descendente), mientras que la componente transversal,  $\langle v \rangle$  no demostró cambios. Una vez iniciadas las erosiones en este sector, (a partir de aproximadamente 60 min) se identifica un intervalo de tiempo de 1000 minutos en donde ambas componentes reducen su magnitud gradualmente, para mantenerse constante hasta el final de la experimentación.

A partir de los 100 minutos de desarrollo de las erosiones la componente longitudinal de velocidad en CP2 disminuyó alcanzando al final del ensayo un valor un 25 % menor.



**Figura VI.8.-** Evolución de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad, adimensional,  $\frac{k}{U_{*a}^2}$ , durante el desarrollo de erosiones en el punto CP2 de figura II.22. Estribo con protección.  $z=1$ cm. Ensayo EIII



**Figura VI.9.-** Evolución de las tensiones de Reynolds adimensionales,  $\frac{-\langle u'w' \rangle}{U_{*a}^2}$ ,  $\frac{-\langle u'v' \rangle}{U_{*a}^2}$ , durante el desarrollo de erosiones en el punto CP2 de figura II.22. Estribo con protección.  $z=1$ cm. Ensayo EIII

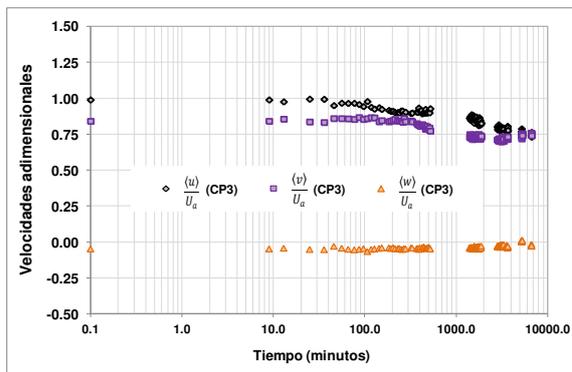
El comportamiento de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad con el transcurso del tiempo en CP2 se presenta en la figura VI.8, en la que se ha representado la evolución de  $\frac{k}{U_{*a}^2}$ . Queda en evidencia allí la tendencia general decreciente de  $k$ , encontrándose que dicho parámetro experimentó una disminución aproximada de un 40 % en el estado de erosión próximo al equilibrio, respecto de los iniciales, previo al desarrollo

de las erosiones. Sin embargo se observa también como  $k$  se mantiene durante un período de tiempo inicial, próximo a la hora, para el que las erosiones fueron incipientes.

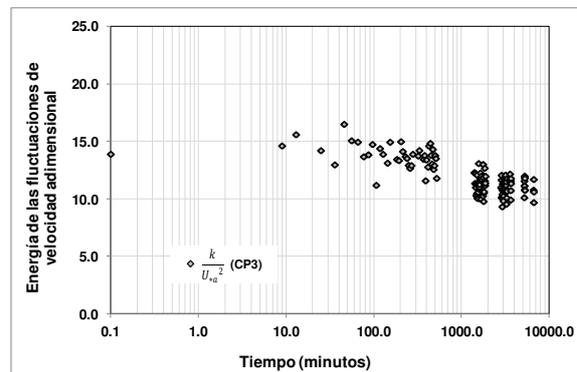
En la figura VI.9 se observa que en el sector erosionado junto a la protección, en el punto de medición considerado, las magnitudes de las tensiones de Reynolds no sufrieron variaciones importantes durante todo el desarrollo de las erosiones, con valores algo superiores para la componente correspondiente a la dirección x-z (longitudinal vertical),

$$\frac{-\langle urwr \rangle}{U_{*a}^2} \approx 0.7 - 0.4, \text{ siendo } \frac{-\langle urvr \rangle}{U_{*a}^2} \approx 0.0$$

Los resultados encontrados a partir de las mediciones de velocidad recolectadas sobre la protección, punto CP3 (Figura II.22), se pueden ver en las figuras VI.10 a VI.12.



**Figura VI.10.-** Evolución de las velocidades adimensionales,  $\frac{\langle u \rangle}{U_a}$ ,  $\frac{\langle v \rangle}{U_a}$ ,  $\frac{\langle w \rangle}{U_a}$ , durante el desarrollo de erosiones en el punto CP3 de figura II.22. Estribo con protección.  $z=2.2\text{cm}$ . Ensayo EIII



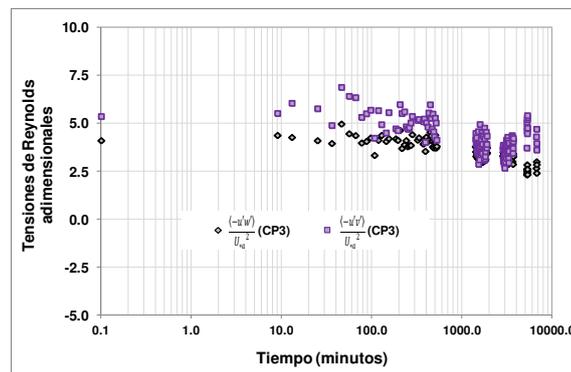
**Figura VI.11.-** Evolución de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad, adimensional,  $\frac{k}{U_{*a}^2}$ , durante el desarrollo de erosiones en el punto CP3 de figura II.22. Estribo con protección.  $z= 2.2 \text{ cm}$ . Ensayo EIII

La tendencia general de los parámetros analizados en el punto CP3 es de disminuir con el desarrollo de la erosión en derredor de la protección, hecho que probablemente pueda atribuirse a la redistribución de caudales observada hacia el sector erosionado (Capítulo V), la excepción la constituye la componente vertical de velocidades, la que prácticamente se mostró sin cambios (Figura VI.10).

Se verificaron reducciones del orden del 25 % para la componente longitudinal de velocidades adimensionales,  $\frac{\langle u \rangle}{U_a}$ , del 14 % para las transversales,  $\frac{\langle v \rangle}{U_a}$ , mientras que  $\frac{k}{U_{*a}^2}$ , y

las tensiones adimensionales  $\frac{-\langle urwr \rangle}{U_{*a}^2}$  y  $\frac{-\langle urvr \rangle}{U_{*a}^2}$  experimentaron disminuciones aproximadas del 30 % con el desarrollo de las erosiones.

Al igual que lo visto en CP1 durante los primeros minutos del proceso ( $\approx 90$  minutos) no se evidenciaron variaciones estadísticamente significativas en ninguna de las variables analizadas. Se destaca que las mayores variaciones encontradas en la localización CP3 se correspondieron con el estado erosivo durante el cual la tasa de cambio del lecho en las inmediaciones del punto CP1 supera a la del punto CP2, es decir la cantidad de sedimento proveniente desde aguas arriba al sector de máxima erosión ha decaído sensiblemente (Figura IV.7).



**Figura VI.12.-** Evolución de las tensiones de Reynolds adimensionales,  $\frac{-\langle urwr \rangle}{U_{*a}^2}$ ,  $\frac{-\langle urvr \rangle}{U_{*a}^2}$ , durante el desarrollo de erosiones en el punto CP3 de figura II.22. Estribo con protección.  $z = 2.2$  cm. Ensayo EIII.

Los resultados presentados anteriormente para la fase final del proceso erosivo permiten destacar que de entre todas las situaciones analizadas, la localización que demostró los mayores valores de energía asociada a las fluctuaciones de velocidad adimensional y las mayores tensiones de Reynolds adimensionales fue CP1, probablemente debido a la contribución, que existe en esta localización, de los vórtices bidimensionales generados en la capa de corte.

Los resultados derivados de las mediciones realizadas en una localización definida incluyen efectos relacionados con diversas cuestiones, tales como la variación durante el proceso erosivo de la posición relativa del punto de medición respecto del lecho, los

contornos y la capa de corte; y la evolución de los procesos hidrodinámicos (redistribución de caudales, corrientes helicoidales, etc) presentes en esa localización, tal como resume la tabla VI.1. En función de ello se ha considerado necesario realizar un análisis más integral, a nivel de secciones, de la evolución de los principales parámetros característicos del flujo turbulento asociado al proceso de erosión en torno a un estribo protegido.

**Tabla VI.1.** Efectos que afectan a las localizaciones en las que se realizaron mediciones continuas de velocidades

Localización	Efectos		
	Variación de la distancia al lecho	Variación de la posición de la capa de corte	Procesos
SP2	Si	No significativo	Redistribución de caudales – patrón hidrodinámico en la hoya
CP1	Si	Si	Redistribución de caudales - patrón hidrodinámico en la hoya
CP2	Si	No	Redistribución de caudales- patrón hidrodinámico en la hoya
CP3	No	No significativo	Redistribución de caudales- patrón hidrodinámico en la hoya

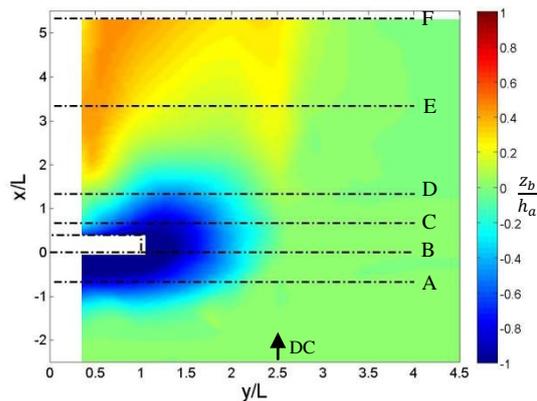
### VI.3 Distribuciones de velocidades y parámetros de la turbulencia analizados en diversas secciones transversales

En las figuras VI.13 y VI.14 se pueden ver las localizaciones de las secciones transversales seleccionadas para mostrar los resultados que a continuación se presentan.

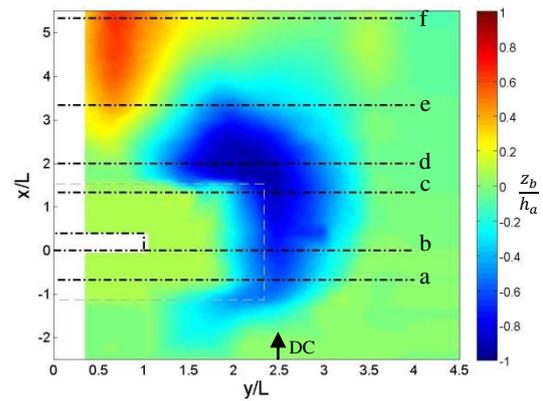
Para el caso de estribo sin protección (EIV, EV), las secciones nombradas con las letras “A, B, C, D, E y F” (Figura VI.13) se corresponden con las progresivas longitudinales  $\frac{x}{L} = -0.67$ ;  $\frac{x}{L} = 0.0$ ;  $\frac{x}{L} = 0.67$ ;  $\frac{x}{L} = 1.33$ ;  $\frac{x}{L} = 3.33$  y  $\frac{x}{L} = 5.33$  respectivamente.

En la figura VI.14 se muestran las secciones consideradas para analizar la evolución de velocidades y parámetros de la turbulencia del escurrimiento involucrado en el proceso de erosión desarrollado junto al estribo con protección del lecho junto al mismo (EVI, EVII,

EVIII, EIX). Se destaca que las secciones “a, b, y c”, con progresivas longitudinales  $\frac{x}{L} = -0.67$ ;  $\frac{x}{L} = 0.0$ ;  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; tienen la parte de su perfil hacia margen izquierda (hasta progresiva transversal  $\frac{y}{L} = 2.33$ ) cubierto con la protección del lecho. La sección “d” ( $\frac{x}{L} = 2.0$ ) coincide con el sector en donde se inician las erosiones y donde finalmente ocurren las mayores profundizaciones. La sección “e” ( $\frac{x}{L} = 3.33$ ) concuerda con el extremo aguas abajo del sector erosionado entorno a la protección y la sección “f” ( $\frac{x}{L} = 5.33$ ) involucra parte de la depositación de sedimentos provenientes desde el sector erosionado aguas arriba (Figura VI.14).



**Figura VI.13.-** Secciones transversales utilizadas para representar la evolución de la distribución de velocidades, energía asociada a las fluctuaciones de velocidad y tensiones de Reynolds durante el desarrollo de erosiones en la situación de estribo sin protección. Ensayos EIV-EV



**Figura VI.14.-** Secciones transversales utilizadas para representar la evolución de la distribución de velocidades, energía asociada a las fluctuaciones de velocidad y tensiones de Reynolds durante el desarrollo de erosiones en la situación de estribo protegido. Ensayos EVI-EVII-EVIII-EIX

### VI.3.1 Distribución transversal de velocidades y parámetros de la turbulencia. Situación de estribo no protegido: ensayos EIV-EV

#### VI.3.1.1 Componente longitudinal de la velocidad, $\langle u \rangle$

En la figura VI.15 se presentan las distribuciones transversales de la componente longitudinal de velocidades para la situación inicial, previa al desarrollo de erosiones (EIV)

y la que pudo observarse en la situación de mayor erosión representada para el caso de estribo sin protección (EV), correspondientes a las secciones transversales A, B, C, D, E de figura VI.13. En dicha figura las dimensiones transversales están adimensionalizadas con la longitud del estribo,  $\frac{y}{L}$ , y las posiciones verticales con la profundidad del flujo de aproximación, esto es  $\frac{z}{h_a}$ , modalidad adoptada para la representación del resto de las variables cuya evolución se analiza. La velocidad en cada punto está adimensionalizada con la velocidad media en la vertical central del flujo de aproximación,  $\frac{\langle u \rangle}{U_a}$ .

Del análisis de la figura VI.15 surgen ciertos aspectos relacionados con el comportamiento del campo de velocidades longitudinales junto a un estribo sin protección y de su evolución con el desarrollo de las erosiones locales, los cuales se mencionan a continuación:

- ✓ En el tramo aguas arriba del estribo, representado por la sección A (Fig.VI.13), se observa en la situación inicial la presencia de una región de flujo caracterizada por tener velocidades relativamente pequeñas, la cual ocupa un sector con aspecto de triángulo rectángulo, delimitado por la pared del estribo y cuya base es aproximadamente  $1.5L$ . Una vez erosionado el lecho, el gradiente lateral de velocidades se incrementa significativamente en este sector (considerado por encima del nivel del lecho original), lo cual se asocia con el reducido ancho que presenta finalmente la faja de flujo con velocidades poco significativas. El perfil de velocidades correspondiente a la progresiva lateral  $\frac{y}{L} = 1.2$  de la figura VI.16.A refleja esta situación, ya que pueden observarse los incrementos de velocidad experimentados en la porción del tirante por encima de la hoya de erosión asociados con esta situación.
- ✓ En el sector de la sección de escurrimiento ocupado por la hoya de erosión aguas arriba del estribo (Fig. VI.16.A) se relevaron velocidades mucho más bajas que las existentes en la parte superior de la misma, por encima del nivel del lecho original, pudiendo observarse velocidades longitudinales con signo negativo en las cercanías del fondo, posiblemente asociadas con la presencia de corrientes helicoidales en dicha zona.
- ✓ La figura VI.15.A demuestra que una vez desarrolladas las erosiones las velocidades del escurrimiento que tiene lugar por encima del área erosionada ( $\frac{z}{h_a} > 0$ ;  $\frac{y}{L} > 1.5$ )

disminuyeron en todas las localizaciones en donde se realizaron las mediciones, lo cual se observa con total claridad en los perfiles de velocidad correspondientes a las verticales ubicadas en las progresivas  $\frac{y}{L} = 2.0$ ;  $\frac{y}{L} = 2.5$  que se muestran en la figura VI.16.A. Este comportamiento se mantiene en el sector de la sección no afectado por las erosiones locales ( $\frac{y}{L} > 2.5$ ), producto de la redistribución de caudales generada por el desarrollo de las erosiones, ya mencionado en el capítulo V. Esta disminución de las velocidades en el sector del escurrimiento localizado por encima del nivel del lecho original ( $\frac{z}{h_a} > 0$ ) se observó en el resto de las secciones (Figura VI.15 B, C, D, E). A modo de ejemplo se presenta la figura VI.17 en la que se puede observar la variación experimentada por un perfil de velocidades localizado en la progresiva transversal  $\frac{y}{L} = 3$ , correspondiente a la sección B. La particularidad de la figura VI.17 es que permite observar que mientras que las velocidades disminuyen en toda la vertical, el resto de los parámetros turbulentos presentados solo experimenta una disminución en las proximidades del fondo.

- ✓ En la sección transversal determinada por la cara aguas arriba del estribo (Fig.VI.15.B) se observa una distribución inicial del flujo aproximadamente uniforme en aquel sector para el cual  $\frac{y}{L} > 1.5$ , presentando perfiles de velocidad semejantes entre sí (Figura VI.16.B). Las mediciones realizadas más próximas al extremo del estribo arrojaron los menores valores de  $\frac{\langle u \rangle}{U_a}$  para esta sección, el cual se dio en las proximidades del fondo, siendo que es en las cercanías de dicho sitio donde comienzan las profundizaciones del lecho. Esta situación se corresponde con la desviación de la dirección principal del flujo impuesta por la presencia del estribo. Las figuras VI.15.B y VI.16.B ( $\frac{y}{L} = 1.2$ ) permiten ver el incremento de  $\frac{\langle u \rangle}{U_a}$  en este sector con el progreso de las erosiones.

Los resultados derivados del análisis de las mediciones realizadas durante el ensayo EV demuestran que el flujo que escurre para niveles con  $\frac{z}{h_a} > 0$  presentó velocidades menores a las relevadas para la situación inicial en dicho sector entre un 10 % a un 30%.

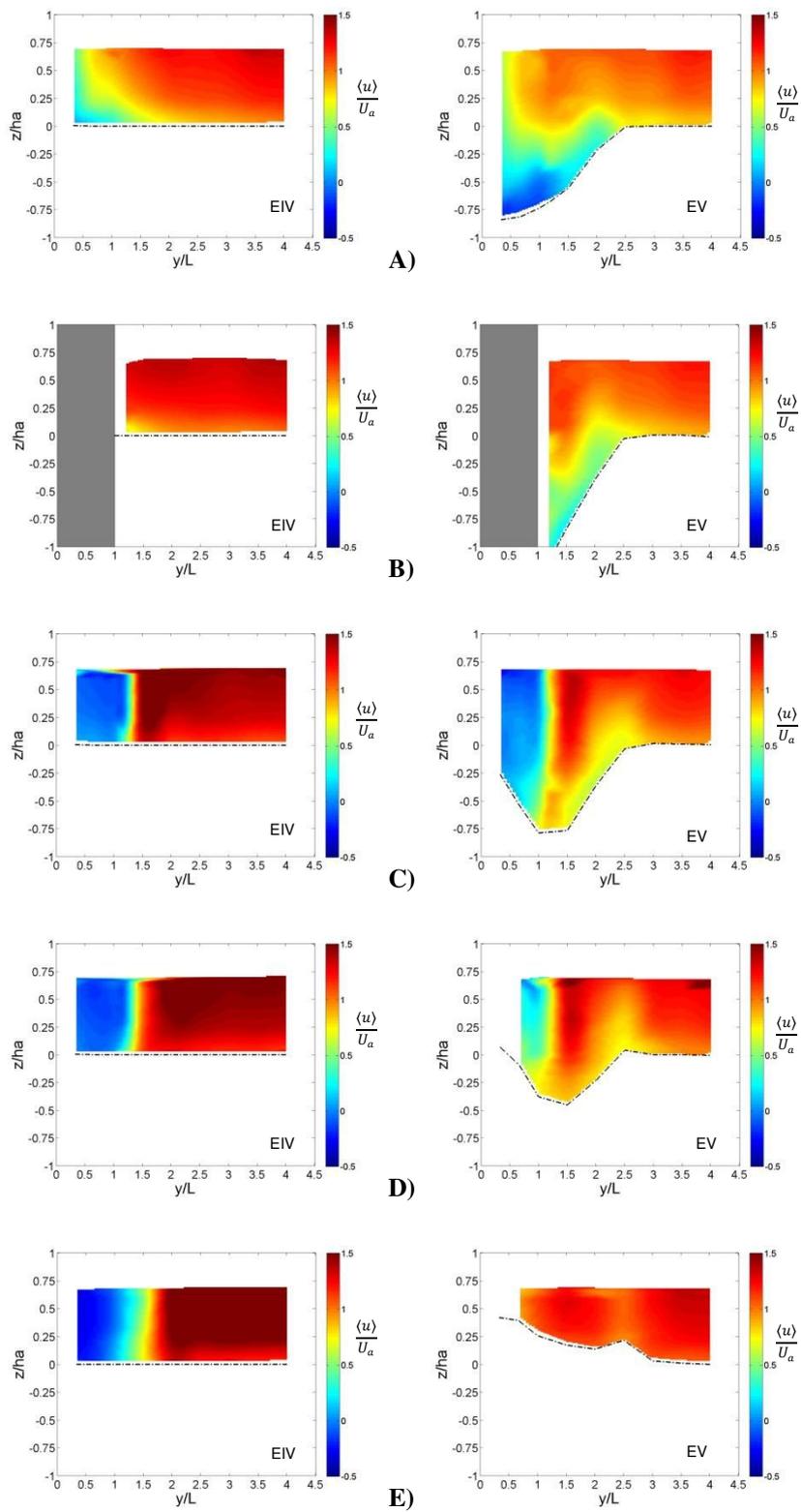
- ✓ La figura VI.15.B demuestra también que en el sector erosionado de la sección, el cual involucra a las mayores profundizaciones, las velocidades longitudinales resultan muy

inferiores a las que se verifican en la porción del flujo localizado por encima del nivel del lecho original ( $\frac{z}{h_a} = 0$ ) como lo demuestran los perfiles de velocidades en las progresivas  $\frac{y}{L} = 1.2$ ;  $\frac{y}{L} = 1.5$  de figura VI.16.B.

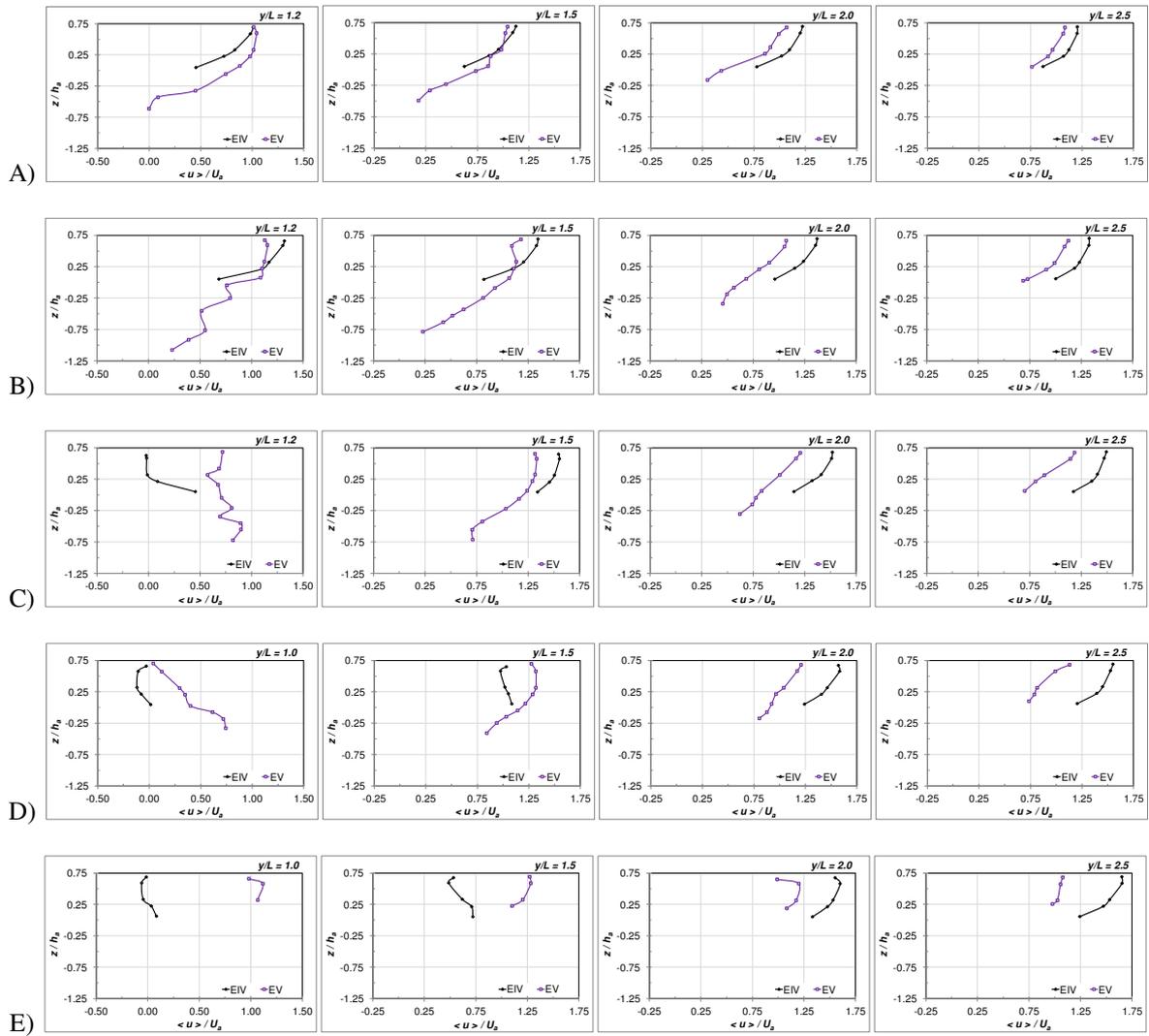
Esta zona con velocidades longitudinales pequeñas dentro de la hoya de erosión ocupa un determinado área cuyo tamaño se reduce en la medida que consideramos secciones ubicadas más hacia aguas abajo, llegando a constituir una porción minoritaria del sector erosionado. En las secciones C y D (Fig. VI.15) las zonas de menor velocidad en la hoya aparece principalmente recostado sobre el talud exterior de la hoya de erosión. Con lo cual la hoya de erosión adquiere paulatinamente mayor participación en el escurrimiento (ver perfiles de velocidad, con el lecho ya erosionado, de progresivas  $\frac{y}{L} = 1.5$  en las secciones C, D y E de figura VI.16).

- ✓ En todas las secciones transversales presentadas en figura VI.15 se observa un déficit de la componente longitudinal de velocidades en correspondencia con el borde exterior de la hoya de erosión, comparado con las localizaciones vecinas, situación ya observada cuando se realizó el análisis bidimensional del campo del flujo (capítulo V). La forma que muestran perfiles de velocidad localizados en  $\frac{y}{L} = 2.5$  de las secciones C, D, E de figura VI.16 es una prueba de ello.
- ✓ La figura VI.15 permite observar aguas abajo del estribo, previo al desarrollo de erosiones, distribuciones de velocidades que lucen uniformes a partir de las progresivas transversales  $\frac{y}{L} = 1.5$ , para la sección C, e  $\frac{y}{L} = 2.0$  para las restantes secciones (D y E).
- ✓ Las distribuciones de velocidades presentadas en figura VI.15 permiten identificar la presencia de la zona de recirculación aguas abajo del estribo. En el estado inicial (EIV) esta región se identifica por la presencia de una franja que ocupa la totalidad del tirante, caracterizada por la existencia de muy bajas velocidades, inclusive con signo negativo, las que en general presentaron las menores magnitudes en los puntos medidos más cerca de la superficie libre (perfiles de velocidades correspondientes a las progresivas  $\frac{y}{L} = 1.0$  e  $\frac{y}{L} = 1.5$  de las secciones D y E de figura VI.16). El tamaño de esta zona de recirculación crece hacia aguas abajo, y en la situación inicial (EIV) aparece visible en todo el tramo medido (inclusive en la sección F, Fig. VI.13).

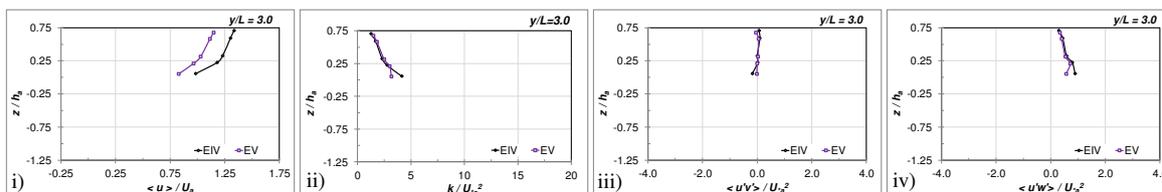
- ✓ Con el desarrollo de las erosiones (EV) la zona de recirculación del flujo localizada aguas abajo del estribo se desplaza en dirección hacia la pared de margen izquierda, reduciendo su ancho y su extensión, tal cual lo demuestran las figuras VI.15 C, D, E y los perfiles de velocidad de progresivas  $\frac{y}{L} = 1.0$  e  $\frac{y}{L} = 1.5$  de las figuras VI.16. D y E en los que se observa el aumento de las velocidades en esas posiciones una vez que el lecho se ha erosionado.
- ✓ Se observa en todas las secciones representadas en figura VI.15 la disminución de las velocidades en el sector de la sección no afectado por las erosiones locales ( $\frac{y}{L} > 2.5$ ).



**Figura VI.15.-** Variación de la distribución de velocidades longitudinales adimensionales,  $\frac{\langle u \rangle}{U_a}$ , con el desarrollo de la erosión. Secciones transversales de progresivas longitudinales A)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; B)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; C)  $\frac{x}{L} = 0.67$ ; D)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; E)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . Estribo sin protección, EIV-EV



**Figura VI.16.-** Variaciones de perfiles de velocidades longitudinales adimensionales,  $\frac{\langle u \rangle}{U_a}$ , correspondientes a verticales localizadas dentro del sector erosionado en las secciones transversales de progresivas longitudinales A)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; B)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; C)  $\frac{x}{L} = 0.67$ ; D)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; E)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . En todas las secciones se consideraron perfiles de progresivas transversales  $\frac{y}{L} = 1.5$ ;  $\frac{y}{L} = 2.0$ ;  $\frac{y}{L} = 2.5$ ; adicionalmente en las secciones A) y B) se consideró el perfil de progresiva  $\frac{y}{L} = 1.2$ ; mientras que en las secciones C), D) y E) el perfil de progresiva  $\frac{y}{L} = 1.0$ . Estribo sin protección, Ensayos EIV-EV



**Figura VI.17.-** Variaciones de las distribuciones verticales de: i) velocidades longitudinales,  $\frac{\langle u \rangle}{U_a}$ , ii) energía asociada a las fluctuaciones de velocidad,  $\frac{k}{U_a^2}$ , iii) tensiones  $\frac{-\langle u'v' \rangle}{U_a^2}$  y iv) tensiones  $\frac{-\langle u'w' \rangle}{U_a^2}$  para una vertical ubicada a continuación de la posición de la hoya de erosión. Sección B.  $\frac{y}{L} = 3.0$ . Ensayos EIV-EV

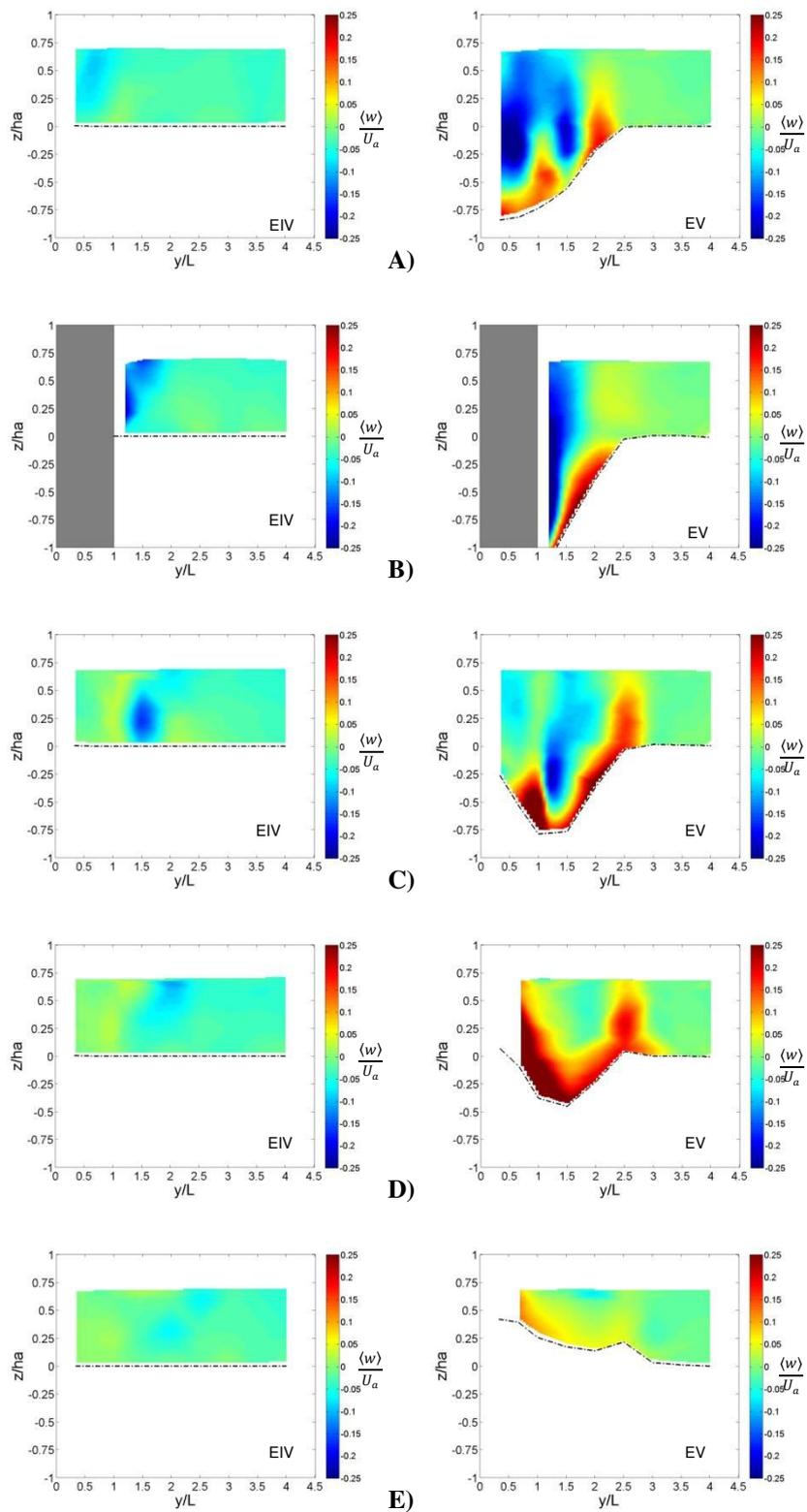
### VI.3.1.2 Componente vertical de la velocidad, $\langle w \rangle$

La figura VI.18 compila la información relacionada con la componente vertical de velocidades recopilada mediante las mediciones realizadas durante los ensayos EIV y EV, en las secciones transversales A, B, C, D, E y F (Fig. VI.13). Para la confección de la misma la velocidad  $\langle w \rangle$  se ha adimensionalizado con la componente longitudinal de la velocidad media en la vertical, correspondiente al flujo de aproximación, por lo que la escala de colores que aparece a la derecha de cada sección representada refiere a valores de  $\frac{\langle w \rangle}{U_a}$ .

El análisis de la figura VI.18 permite advertir sobre la presencia de diferentes tipos de flujos en la dirección vertical, asociados con aspectos particulares del proceso de erosión que se analiza, tanto al inicio (EIV), como con las erosiones ya conformadas (EV).

A continuación se describen los aspectos más distintivos que surgen de la figura VI.18:

- ✓ En la situación inicial (EIV), delante del estribo, se observa la presencia de un flujo descendente localizado en el encuentro entre la pared del canal y la cara aguas arriba del estribo (Fig. VI.18.A). Las velocidades en dicho sector aumentan significativamente para la situación con erosión (EV), con valores máximos que aproximadamente triplican a los existentes en la situación inicial. En las proximidades del fondo se observa un núcleo de velocidades ascendentes, configuración asociada con un vórtice que en dicha localización tiene su eje paralelo a la traza del estribo.

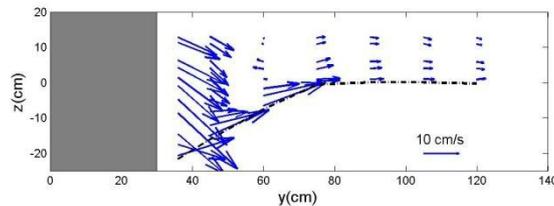


**Figura VI.18.-** Variación de la distribución de velocidades verticales adimensionales,  $\frac{\langle w \rangle}{U_a}$ , en las secciones transversales de progresivas longitudinales A)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; B)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; C)  $\frac{x}{L} = 0.67$ ; D)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; E)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . Estribo sin protección, EIV-EV

- ✓ En la figura VI.18.B se puede ver que en la situación inicial (EIV) existen velocidades descendentes junto al extremo del estribo, de mayor significación que las observadas en figura VI.18.A (EIV). Una vez desarrollada la fosa de socavación, la que en esta sección tuvo su mayor profundización, se midieron las velocidades descendentes más importantes, alcanzando en el interior de la hoya valores tan altos como  $\frac{\langle w \rangle}{U_a} \approx -0.5$ . Sobre el talud exterior de la fosa de erosión local se identifica la presencia de flujo ascendente, encontrando allí magnitudes de  $\frac{\langle w \rangle}{U_a}$  próximas a 0.2.
- ✓ La representación de las distribuciones de las componente vertical de velocidades correspondientes a las secciones localizadas aguas abajo del estribo muestra, para la situación previa al desarrollo de erosiones, la existencia de fajas con velocidades descendentes, ubicadas en las proximidades del encuentro entre la zona de recirculación del flujo lento y la región de flujo acelerado producto de la contracción impuesta por la presencia del estribo y fajas de velocidades ascendentes a ambos lados, indicando la presencia corriente helicoidal débil, (Figs. VI 18.C, D, E).
- ✓ En el sector erosionado aguas abajo del estribo se observa una corriente descendente, localizada aproximadamente en la parte central de la hoya, la cual presenta velocidades cuyas magnitudes decrecen en la dirección aguas abajo, visualizándose muy debilitada en la figura VI.18.E (EV).  
Se destacan tres núcleos con velocidades verticales positivas. Uno, en coincidencia con el talud interior de la hoya de erosión, presenta velocidades marcadamente superiores a los dos restantes,  $\frac{\langle w \rangle}{U_a} \approx 0.5$  en las secciones D y E (Figs VI.18 D. y E). Este flujo probablemente colabore con el transporte de sedimento desde la hoya hacia la zona de depósito. Los otros dos núcleos se ubican sobre el talud exterior y sobre el borde lateral de la hoya, ambos con velocidades adimensionales máximas del orden de 0.2.
- ✓ En todas las secciones analizadas no se observan velocidades verticales significativas a partir de la progresiva lateral  $\frac{y}{L} > 3$ .

### VI.3.1.3 Identificación de corrientes helicoidales en el plano “yz”

Se ha considerado de interés, a partir de los datos de velocidades medidos, identificar la presencia de corrientes helicoidales, cuya existencia para el caso de procesos de erosión local ha sido probada en diferentes oportunidades, especialmente en las inmediaciones del obstáculo particular de que se trate. Con este objetivo se construyó la figura VI.19 en la que se han representado los vectores de velocidad  $v_{yz}$ , compuesto cada uno de ellos por las componentes medidas en las direcciones transversal y vertical,  $\langle v \rangle$ ,  $\langle w \rangle$ , respectivamente. Tal como era de esperar los vectores de velocidad de figura VI.18 no resultan adecuados para visibilizar el vórtice principal o flujo helicoidal conocido en ese sector.



**Figura VI.19.-** Representación de vectores de velocidad en el plano yz.

Sección de progresiva longitudinal  $\frac{x}{L} = 0.0$ . Estribo sin protección. EV

El esquema de mediciones adoptado en este estudio experimental se basa en un sistema de referencia fijo, con la dirección transversal, y, coincidente con la alineación de las secciones transversales seleccionadas, todas paralelas entre sí. La presencia del estribo impone una característica particular a la configuración del escurrimiento en estudio, de la que se destaca la gran variabilidad del ángulo de inclinación del flujo respecto del sistema de referencia adoptado, la cual depende de la sección particular de que se trate, de la posición transversal de la vertical considerada y de la morfología determinada por el proceso de erosión que se analice. Sumado a ello en determinados sectores puede darse la presencia de corrientes helicoidales propias de este tipo de flujos.

En consecuencia el campo de velocidades transversales medidos en un sitio determinado,  $\langle v \rangle$ , puede deberse a una combinación de esos tipos de movimientos de fluidos antes mencionados. Para determinar el grado con que cada uno de ellos contribuye deben separarse la componente de la velocidad asociada con la inclinación de los vectores de

velocidad, respecto de la sección transversal, y la componente asociada con el movimiento helicoidal, si esta estuviera presente.

Rhoads and Kentworthy (1998) establecen que una manera de aislar el flujo generado por el movimiento helicoidal es calcular las componentes paralela y perpendicular a la dirección del vector velocidad promediado en profundidad,  $V_{xy}$ , en cada vertical, componentes denominadas como velocidad primaria,  $v_P$ , y velocidad secundaria,  $v_S$ , respectivamente (Bathurst et al., 1977).

La magnitud y orientación de  $V_{xy}$ , " $V_{xy}$ " y " $\varphi$ " se calculan del siguiente modo:

$$V_{xy} = \sqrt{U^2 + V^2} \quad (\text{VI.1})$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left[ \frac{V}{U} \right] \quad (\text{VI.2})$$

Donde  $U$  es la velocidad longitudinal promediada en la vertical,  $V$  es la velocidad transversal promediada en la vertical; los valores de  $U$  y  $V$  se obtienen integrando  $\langle u \rangle$  y  $\langle v \rangle$  sobre la profundidad del flujo,  $h$ :

$$U = \frac{1}{h} \int_0^h \langle u \rangle dz \quad (\text{VI.3})$$

$$V = \frac{1}{h} \int_0^h \langle v \rangle dz \quad (\text{VI.4})$$

Los valores de  $v_P$  y  $v_S$  se calculan del siguiente modo:

$$v_P = v_{xy} \cos(\theta - \varphi) \quad (\text{VI.5})$$

$$v_S = v_{xy} \sin(\theta - \varphi) \quad (\text{VI.6})$$

Donde  $v_{xy}$  y  $\theta$  son la magnitud y orientación del vector velocidad resultante,  $v_{xy}$ , en cada posición de medición en una vertical (Fig. VI.20):

$$v_{xy} = \sqrt{\langle u \rangle^2 + \langle v \rangle^2} \quad (\text{VI.7})$$

$$\theta = \tan^{-1} \left[ \frac{\langle v \rangle}{\langle u \rangle} \right] \quad (\text{VI.8})$$

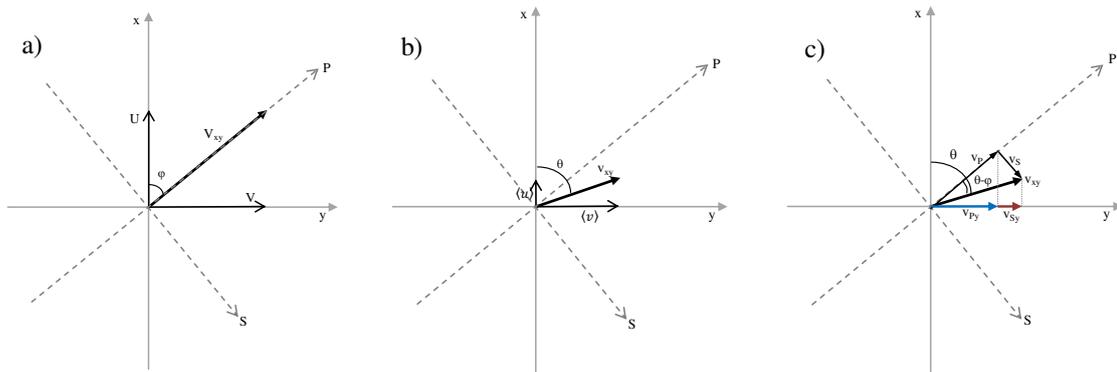
Puesto que el valor de  $\varphi$  varía con la posición, y con él la orientación del plano perpendicular a la dirección del vector  $V_{xy}$  (S en figura VI.20), un gráfico bidimensional compuesto por vectores  $v_S$  pertenecientes a diferentes verticales no representa un flujo en el plano “yz”, sino muestra componentes de velocidades paralelas a planos de referencia locales en cada vertical. Para superar este problema pueden calcularse las componentes en la dirección transversal “y” de  $v_P$  y  $v_S$  (Fig. VI.20):

$$v_{Py} = v_P \sin \varphi \quad (\text{VI.9})$$

$$v_{Sy} = v_S \cos \varphi \quad (\text{VI.10})$$

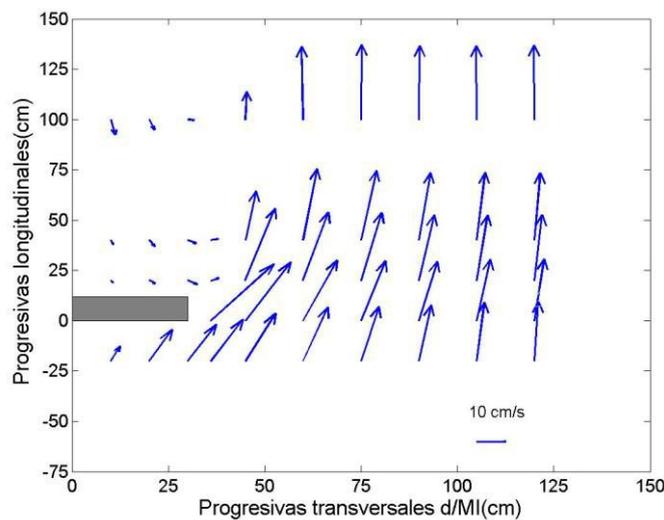
Donde  $v_{Sy}$  representa la contribución de la circulación secundaria al campo de velocidad transversal y el valor de  $v_{Py}$  representa la contribución a la velocidad transversal del flujo en la dirección del vector promediado en la vertical, por lo que en cada punto de medición se tiene:

$$\langle v \rangle = v_{Py} + v_{Sy} \quad (\text{VI.11})$$

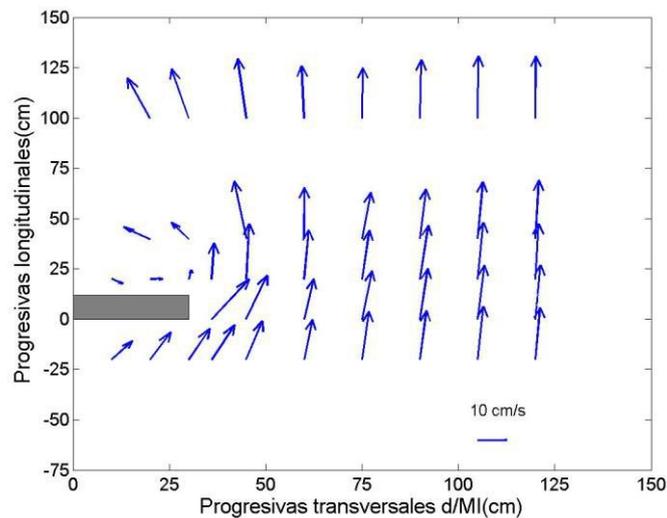


**Figura VI.20.-** Ilustración de a) relación entre la velocidad media en la vertical en la dirección longitudinal,  $U$ , la velocidad media en la vertical en la dirección transversal,  $V$ , y la velocidad resultante en el plano  $xy$ , promediado en la vertical  $V_{xy}$ ; b) relación entre las componentes, en cada localización, de la velocidad media en la dirección longitudinal,  $\langle u \rangle$ , y transversal  $\langle v \rangle$  y la velocidad media resultante en el plano “ $xy$ ”,  $v_{xy}$ , c) descomposición del vector  $v_{xy}$  en componentes según los ejes  $P$  y  $S$ ,  $v_P$  y  $v_S$ , respectivamente. Proyección de los vectores  $v_P$  y  $v_S$  sobre el eje  $y$ ,  $v_{Sy}$ ,  $v_{Py}$ .

En la figura VI.21 se representan los vectores de velocidad promediados en profundidad,  $V_{xy}$ , correspondientes a cada una de las verticales de medición consideradas en las secciones A, B, C, D y E (Fig. VI.13) evaluados a partir de las mediciones de velocidad realizadas en el ensayo EIV (condición inicial, situación de estribo sin protección), y en la figura VI.22 los vectores  $V_{xy}$  correspondientes a las mismas secciones transversales, pero evaluados a partir de las mediciones recolectadas en el ensayo EV (lecho erosionado, estribo sin protección). En ambas figuras se observa la variabilidad del ángulo de inclinación del flujo,  $\phi$ , los cuales denotan mayor sesgo del flujo en las inmediaciones del estribo. La comparación de las figuras VI.21 y VI.22 también demuestra el efecto que introduce la presencia de la hoya de erosión sobre la alineación promedio del flujo.



**Figura VI.21.-** Vectores de velocidad promediados en la vertical,  $V_{xy}$ , correspondientes a cada una de las verticales consideradas en las secciones A, B, C, D, E de figura VI.13. EIV

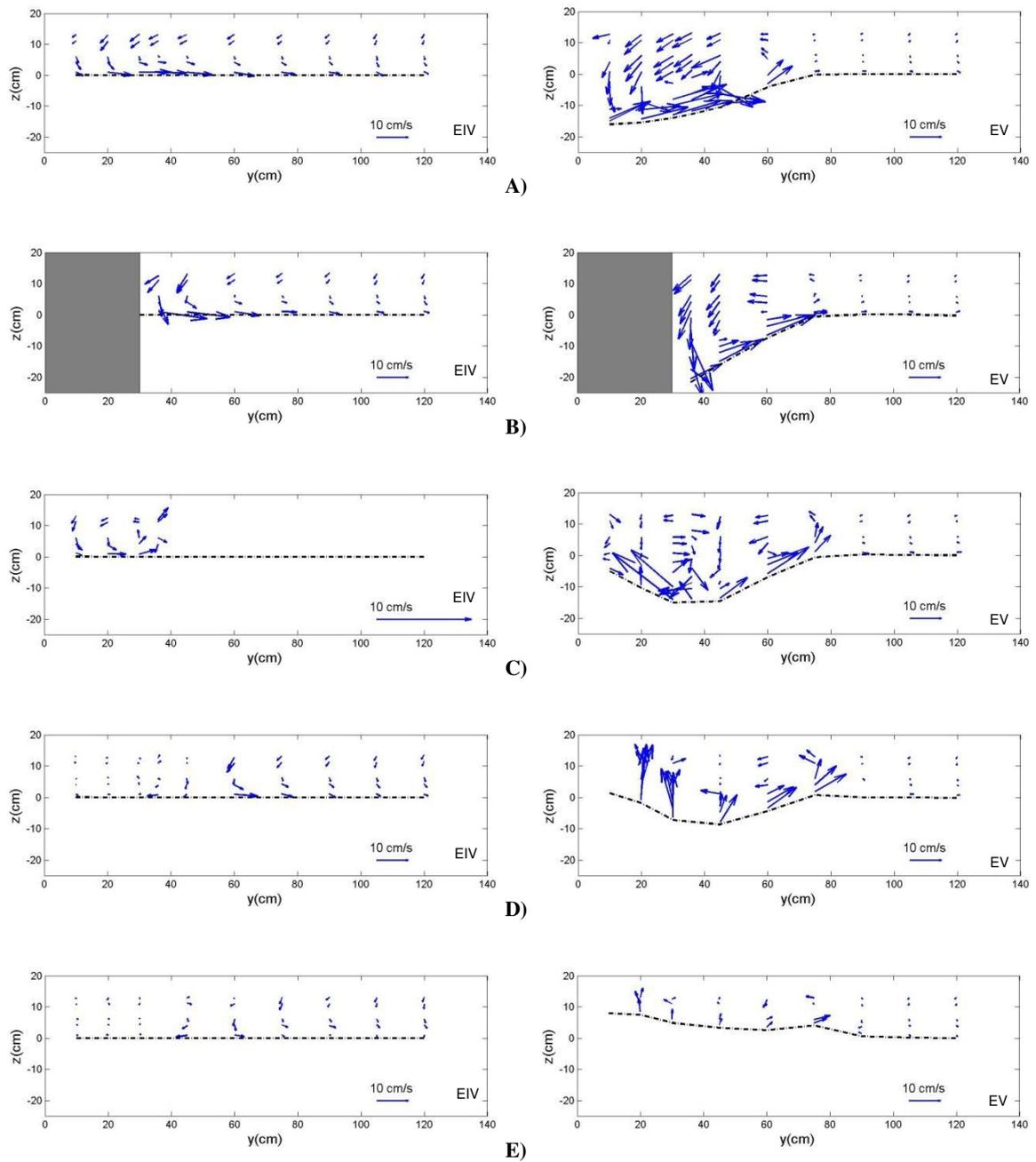


**Figura VI.22.-** Vectores de velocidad promediados en la vertical,  $V_{xy}$ , correspondientes a cada una de las verticales consideradas en las secciones A, B, C, D, E de figura VI.13. EV

En la figura VI.23 se han representado los vectores resultantes de componer la proyección sobre el eje “y” de la velocidad secundaria,  $v_{sy}$ , y la componente vertical de la velocidad registrada,  $\langle w \rangle$ , correspondiendo cada uno de ellos a cada punto de medición pertenecientes a las secciones transversales presentadas en figura VI.13. En la figura VI.23 se consignan los resultados de aplicar las expresiones VI.1 a VI.10 tanto a los datos relevados en el ensayo EIV como los correspondientes a EV. El detalle de información disponible permite destacar las siguientes cuestiones:

- ✓ El detalle de mediciones realizadas para la condición inicial (EIV) no permite identificar corrientes helicoidales asociadas con el desarrollo del proceso de erosión local.
- ✓ Previo al desarrollo de erosiones, aguas abajo del estribo es posible identificar una corriente helicoidal muy débil, con sentido de rotación anti-horario, localizada en la zona de recirculación próxima a la pared de margen izquierda. A modo de ejemplo se presenta en la figura VI.23 correspondiente a la sección C (EIV), en la que la escala para representación de los vectores se ha aumentado en un factor de 3, respecto de la utilizada en las restantes secciones de la figura VI.23. El hecho de que la corriente detectada sea débil quizás sea producto de la densidad de la grilla experimental utilizada (escala no bien resuelta).

- ✓ En las secciones A y B, del ensayo EV, se observa la presencia de corriente helicoidal, con sentido de rotación anti-horario, la cual se corresponde con el vórtice primario, agente principal en el desarrollo de las erosiones locales junto a estribos de puentes. Los vectores representados en figura VI.23 indican que, para las condiciones experimentales del presente estudio, esta corriente se localiza principalmente dentro de la hoya de erosión, recostada sobre el talud exterior de la hoya de erosión, pero con cierto grado de afectación a una porción importante de la profundidad (Figs.VI.23.A y VI.23.B).
- ✓ Los patrones de flujo observado no permitieron distinguir la presencia del vórtice secundario, el cual de existir debiera ser muy débil. La forma de la hoya de erosión concuerda con esta consideración, ya que no demuestra la presencia del canal secundario asociado a la acción de este vórtice (Fig. VI.23.B (EV)).
- ✓ Los resultados derivados de la información recopilada en el ensayo EV para las secciones C, D, E demuestran la existencia de una corriente helicoidal con sentido de rotación anti-horario ubicada en las proximidades del borde exterior de la hoya de erosión, la cual se debilita en la dirección hacia aguas abajo, tal como se observa en la figura VI.23.E (EV). La región del flujo en donde se observan estas corrientes concuerdan con las zonas de déficit de la componente longitudinal de velocidades  $\langle u \rangle$  y la presencia de velocidades ascendentes de cierta consideración.
- ✓ En la figura VI.23.C (EV) se puede ver una corriente helicoidal, con sentido de rotación horario, localizada junto a la anteriormente mencionada, aproximadamente en el centro de la hoya de erosión.



**Figura VI.23.-** Representación de los vectores resultantes de componer la proyección sobre el eje “y” de la velocidad secundaria,  $v_{Sy}$ , y la componente vertical de la velocidad registrada,  $\langle w \rangle$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales A)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; B)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; C)  $\frac{x}{L} = 0.67$ ; D)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; E)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . Estribo sin protección, EIV-EV

#### VI.3.1.4 Energía asociada a las fluctuaciones de velocidad, $k$

En la figura VI.24 se han representado los mapas de contornos de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad ( $k$ ) correspondientes a las secciones transversales de figura VI.13, contemplando las dos situaciones de lecho ensayadas, esto es fondo horizontal (EIV) y aquella en que la morfología del lecho responde al desarrollo de las erosiones locales junto al estribo (EV). El valor de  $k$ , evaluado en cada punto de medición ha sido adimensionalizado con  $U_{*a}^2$  ( $U_{*a}$  velocidad de corte del flujo de aproximación).

La figura VI.25 muestra la variación experimentada por las distribuciones vertical de  $\frac{k}{U_{*a}^2}$  con el desarrollo del proceso erosivo. Se ha incluido aquí la información correspondiente a verticales localizadas dentro del sector erosionado que afecta a las secciones transversales A, B, C, D, E.

Del análisis conjunto de las figuras VI.24 y VI.25 surgen las siguientes consideraciones:

- ✓ En la situación inicial (ensayo EIV), aguas arriba del emplazamiento del estribo, se observa una región del flujo que ocupa la totalidad del tirante, próxima a la pared del canal de margen izquierda, en la que los valores de  $\frac{k}{U_{*a}^2}$  estimados superan a los encontrados en el resto de la sección transversal (Fig. VI.24.A, EIV). Dicho sector del flujo coincide con aquel en el que se detectó la presencia de un importante flujo descendente, tal como se observa en la figura VI.18.A (EIV).
- ✓ En la figura VI.24 B (EIV) se puede ver que, previo al inicio de las erosiones, en la sección transversal B la máxima energía asociado a las fluctuaciones de velocidad tienen lugar en las cercanías del fondo, junto al extremo del estribo, sitio en donde comienza a desarrollarse el proceso erosivo. Este valor de  $\frac{k}{U_{*a}^2}$  resulta ser aproximadamente 4 veces superior a los encontrados, para el mismo nivel  $z$ , en las verticales más alejadas (Fig. VI.25.B).
- ✓ Los mapas de contornos de  $\frac{k}{U_{*a}^2}$  que se muestran en las figuras VI.24 C, D, E, correspondientes a las secciones transversales ubicadas aguas abajo del sitio de emplazamiento del estribo, permiten identificar, para las condiciones del ensayo EIV, una franja de flujo en la que la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad resulta sustancialmente superior a la obtenida para el resto de la sección. Este sector,

posiblemente asociado con la presencia de la capa de corte desprendida desde el estribo, se distribuye en profundidad e incrementa su ancho en la medida que más alejada del estribo esté la sección que se considere, al menos en el tramo de canal en que se realizaron las mediciones correspondientes al presente estudio, limitado por la progresiva longitudinal  $\frac{x}{L} = 5.33$ .

- ✓ El análisis de la distribución transversal de la energía para la condición de lecho erosionado indica un incremento significativo de  $\frac{k}{U_{*a}^2}$  en correspondencia con la presencia del flujo helicoidal, mencionado en el ítem anterior (Fig. VI.23).

En las secciones transversales A y B los máximos valores de energía se observaron dentro de la hoya de erosión ( $\frac{k}{U_{*a}^2} \approx 30$ ). Este comportamiento queda reflejado en las distribuciones en la vertical que se muestran en los perfiles de la figura VI.25 A ( $\frac{y}{L} = 1.2$ ;  $\frac{y}{L} = 1.5$ ) y de la figura VI.25.B ( $\frac{y}{L} = 1.5$ ;  $\frac{y}{L} = 2.0$ ).

En las secciones transversales C y D los valores elevados de energía asociados con este efecto se observan sobre el talud exterior y en las proximidades del borde de la hoya de erosión. Los perfiles registrados en las verticales ubicadas en la progresiva  $\frac{y}{L} = 2.5$  de las figuras VI.25 C y D son un claro ejemplo de cómo la presencia de la corriente helicoidal (Fig. VI.23) en este sitio aumenta los niveles de energía respecto de los evaluados en la instancia inicial del proceso de erosión, alcanzando valores máximos de  $\frac{k}{U_{*a}^2} \approx 18$ .

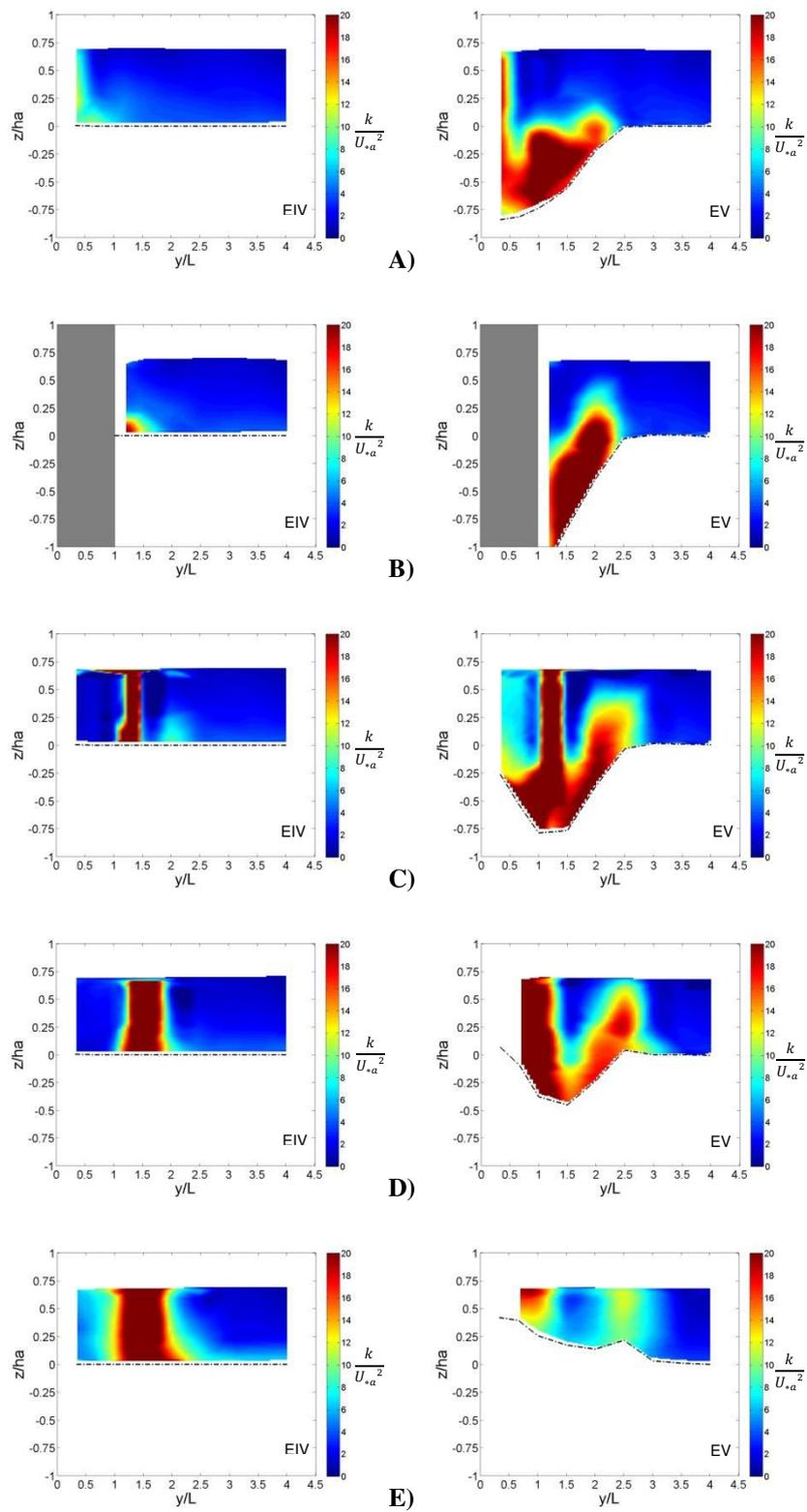
Estas conclusiones sumadas a las derivadas del análisis de las figuras VI.15, VI.18 y VI.23 permiten sugerir la correspondencia que existe entre la presencia de las corrientes helicoidales, el déficit de velocidad en la dirección longitudinal y el incremento en los niveles de energía asociada a las fluctuaciones de velocidad.

- ✓ En las secciones ubicadas aguas abajo del emplazamiento del estribo, para la situación de lecho erosionado, se observa una segunda región del flujo con valores muy elevados de energía, superiores a los encontrados dentro del flujo helicoidal, sector que se relaciona con la capa de corte desprendida desde el estribo. Esta faja vertical de flujo, la cual penetra dentro de la hoya de erosión, se observa desplazada (ver sección D), respecto de la ubicación que muestra para la condición de lecho inicial, hacia margen izquierda. En la medida que  $\frac{x}{L}$  aumenta este núcleo con elevados valores de energía se

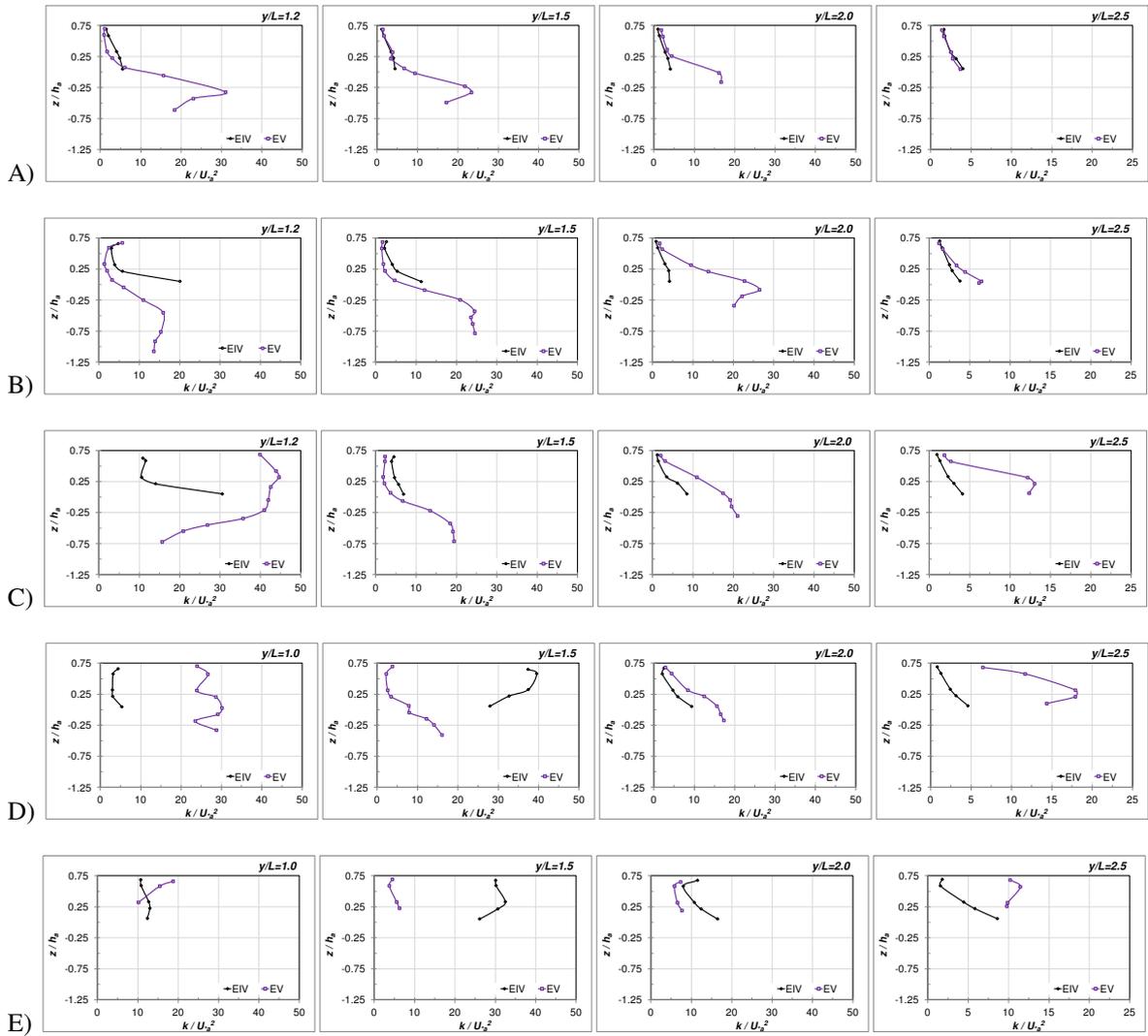
localiza sobre la zona de depósito del sedimento proveniente del sector erosionado (Fig. VI.24.E). Los perfiles de distribución vertical de la energía adimensional que se muestran en figura VI.26 permiten ver el incremento de  $\frac{k}{U_{*a}^2}$  en la posición  $\frac{y}{L} = 0.67$ , respecto de la situación inicial, debido al desplazamiento del sector de flujo caracterizado por elevados valores de energía. Se observa también su disminución en la dirección hacia aguas abajo.

En la figura VI.27 se muestran los mapas de contorno correspondientes a la sección transversal de progresiva  $\frac{x}{L} = 5.33$  (extremo aguas debajo de la zona de estudio y definida como sección F en figura VI.13) para las dos condiciones experimentales realizadas. En ella, al menos para las verticales en las que se realizaron las mediciones, los valores máximos de  $\frac{k}{U_{*a}^2}$  resultaron significativamente menores para la condición de máxima erosión representada.

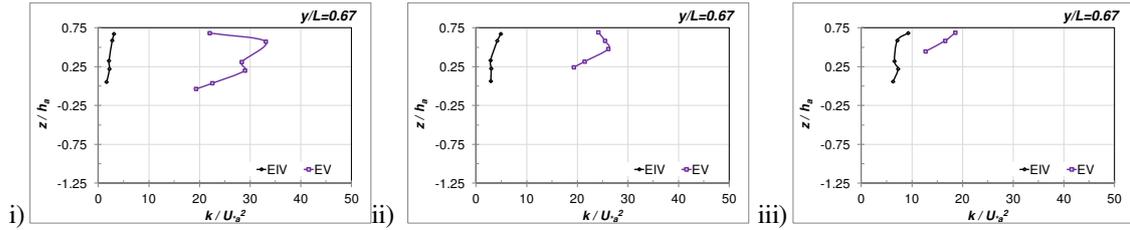
- ✓ En el sector del flujo que escurre al costado de la hoya de erosión, esto es para progresivas  $\frac{y}{L} > 2.5$ , no se aprecian variaciones significativas en los valores de  $\frac{k}{U_{*a}^2}$  encontrados entre las dos condiciones ensayadas, salvo las ya mencionadas al presentar la figura VI.17. Dicha figura demuestra que, una vez desarrollada la erosión, los valores de energía fueron menores sólo en las inmediaciones del fondo, a pesar de que la velocidad longitudinal disminuyó en toda la vertical.



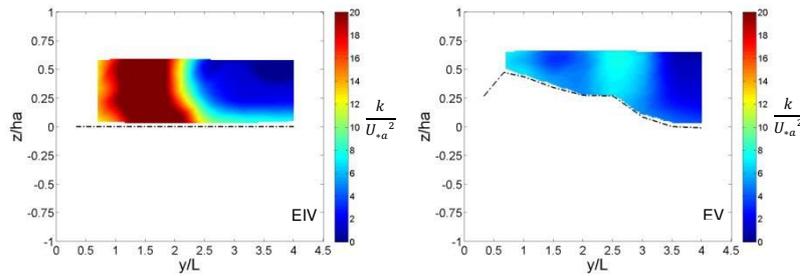
**Figura VI.24.-** Variaciones de las distribuciones de energía asociada a las fluctuaciones de velocidad adimensional,  $\frac{k}{U_{*a}^2}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales A)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; B)  $\frac{x}{L} 0.0$ ; C)  $\frac{x}{L} = 0.67$ ; D)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; E)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . Estribo sin protección, EIV-EV



**Figura VI.25.-** Variaciones de perfiles de energía asociada a las fluctuaciones de velocidad adimensional,  $\frac{k}{U_*^2}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales A)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; B)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; C)  $\frac{x}{L} = 0.67$ ; D)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; E)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . En todas las secciones se consideraron perfiles de progresivas transversales  $\frac{y}{L} = 1.5$ ;  $\frac{y}{L} = 2.0$ ;  $\frac{y}{L} = 2.5$ ; adicionalmente en las secciones A) y B) se consideró el perfil de progresiva  $\frac{y}{L} = 1.2$ ; mientras que en las secciones C), D) y E) el perfil de progresiva  $\frac{y}{L} = 1.0$ . Estribo sin protección, Ensayos EIV-EV



**Figura VI.26.-** Evolución de perfiles de energía asociada a las fluctuaciones de velocidad adimensional,  $\frac{k}{U_{*a}^2}$ , correspondientes a la progresiva lateral  $\frac{y}{L} = 0.67$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales i)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; ii)  $\frac{x}{L} = 2.0$ ; iii)  $\frac{x}{L} = 3.33$



**Figura VI.27.-** Variación de la distribución de energía asociada a las fluctuaciones de velocidad adimensional,  $\frac{k}{U_{*a}^2}$ . Sección transversal de progresiva longitudinal  $\frac{x}{L} = 5.33$ . Ensayos EIV-EV

### VI.3.1.5 Tensiones de Reynolds

El movimiento de un fluido Newtoniano se encuentra gobernado por las ecuaciones de Navier-Stokes y la de continuidad (conservación de la masa), las que pueden escribirse, respectivamente, como:

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = \rho \left[ \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right] = -\nabla \hat{p} + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (\text{VI.12})$$

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (\text{VI.13})$$

Donde:

$\frac{D\vec{v}}{Dt}$ : es la derivada material o local, la cual se compone de una derivada temporal (aceleración local), y de una componente advectiva (aceleración asociada con los cambios espaciales de velocidad)

$-\nabla\hat{p}$ : balance de fuerzas másicas de gravedad y fuerzas superficiales normales

$\mu\nabla^2\vec{v}$ : representa el efecto de las fuerzas viscosas, asociado con la difusión de cantidad de movimiento debido a la acción molecular de la viscosidad

$\rho$ : es la densidad del agua

$\mu$ : la viscosidad dinámica del agua

$\vec{v}$ : vector velocidad

$\hat{p}$ : presión motriz

Las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en el sentido de Reynolds (RANS) surgen al promediar las ecuaciones (VI.12) y (VI.13) en el número de realizaciones (o en el tiempo para un proceso ergódico y estacionario), con el objetivo de obtener el comportamiento promedio del campo de velocidades y presiones. Para ello se considera que las velocidades instantáneas del flujo en las tres direcciones principales  $u$ ,  $v$ ,  $w$  pueden descomponerse en un valor medio (promedio de conjunto) más una fluctuación. Igual consideración se tiene para la presión. Se tiene entonces:

$$u = \langle u \rangle + u' \quad (\text{VI.14})$$

$$v = \langle v \rangle + v' \quad (\text{VI.15})$$

$$w = \langle w \rangle + w' \quad (\text{VI.16})$$

$$p = \langle p \rangle + p' \quad (\text{VI.17})$$

Reemplazando estas descomposiciones en la ecuación de Navier-Stokes (VI.12), y en la de continuidad (VI.13), y aplicando en forma apropiada las reglas de promediación, se llega al siguiente sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales:

$$\begin{aligned} & \rho \left[ \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial t} + \langle u \rangle \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial x} + \langle v \rangle \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial y} + \langle w \rangle \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial z} \right] = \\ & = -\frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial x} - \rho \langle u' u' \rangle \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial y} - \rho \langle u' v' \rangle \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial z} - \rho \langle u' w' \rangle \right] \end{aligned} \quad (\text{VI.18})$$

$$\begin{aligned} & \rho \left[ \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial t} + \langle u \rangle \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial x} + \langle v \rangle \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial y} + \langle w \rangle \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial z} \right] = \\ & = -\frac{\partial \langle p \rangle}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial x} - \rho \langle v' u' \rangle \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial y} - \rho \langle v' v' \rangle \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial z} - \rho \langle v' w' \rangle \right] \end{aligned} \quad (\text{VI.19})$$

$$\begin{aligned} & \rho \left[ \frac{\partial \langle w \rangle}{\partial t} + \langle u \rangle \frac{\partial \langle w \rangle}{\partial x} + \langle v \rangle \frac{\partial \langle w \rangle}{\partial y} + \langle w \rangle \frac{\partial \langle w \rangle}{\partial z} \right] = \\ & = -\frac{\partial \langle p \rangle}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \frac{\partial \langle w \rangle}{\partial x} - \rho \langle w' u' \rangle \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \frac{\partial \langle w \rangle}{\partial y} - \rho \langle w' v' \rangle \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \frac{\partial \langle w \rangle}{\partial z} - \rho \langle w' w' \rangle \right] \end{aligned} \quad (\text{VI.20})$$

$$\left[ \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial x} + \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial y} + \frac{\partial \langle w \rangle}{\partial z} \right] = 0 \quad (\text{VI.21})$$

En las ecuaciones anteriores [(VI.18), (VI.19), (VI.20)] los promedios de los productos de las fluctuaciones presentes en los términos advectivos no son cero, ya que las fluctuaciones de velocidad están correlacionadas entre sí y consigo mismas. A éstas correlaciones, que representan intercambio turbulento de cantidad de movimiento, se las denominan esfuerzos o tensiones de Reynolds, las que pueden interpretarse como fuerzas de tensión adicionales, ya que tienen esas dimensiones, por lo que pueden agruparse con los esfuerzos viscosos (ver ecuaciones VI.18, VI.19 y VI.20). Surge de este modo el conocido tensor de Reynolds, conformado por los esfuerzos que aparecen al promediar las ecuaciones de movimiento según Reynolds (RANS).

$$-\rho \begin{bmatrix} \langle u' u' \rangle & \langle u' v' \rangle & \langle u' w' \rangle \\ \langle v' u' \rangle & \langle v' v' \rangle & \langle v' w' \rangle \\ \langle w' u' \rangle & \langle w' v' \rangle & \langle w' w' \rangle \end{bmatrix} \quad (\text{VI.22})$$

Es decir, al promediar las ecuaciones de Navier-Stokes en el número de realizaciones, las fluctuaciones turbulentas del flujo siguen apareciendo en la forma de los esfuerzos de Reynolds, constituyendo incógnitas adicionales a las velocidades y presión medias.

El tensor de Reynolds es un tensor de segundo orden, simétrico, con lo que por ejemplo

$$[-\rho\langle u'v'\rangle] = [-\rho\langle v'u'\rangle] \quad (\text{VI.23})$$

Las componentes de la diagonal principal son tensiones normales, mientras que el resto de las componentes son tensiones de corte. La energía asociada a las fluctuaciones de velocidad,  $k$ , representa la mitad de la traza del tensor de Reynolds,

$$k = \frac{1}{2} [\langle u'u'\rangle + \langle v'v'\rangle + \langle w'w'\rangle] \quad (\text{VI.24})$$

En la sección anterior se analizó la evolución de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad,  $k$  y en las secciones que siguen se analiza la evolución de las componentes más significativas del tensor de Reynolds asociados a las tensiones de corte.

#### VI.3.1.5.a Tensiones de Reynolds: Componente $-\rho\langle u'w'\rangle$

En la figura VI.28 se muestran las distribuciones de  $\frac{-\langle u'w'\rangle}{U_{*a}^2}$  evaluadas en las secciones transversales de figura VI.13, tanto para la condición de lecho inicial, como para la de lecho con erosiones locales. La tensión adimensional  $\frac{-\langle u'w'\rangle}{U_{*a}^2}$  representa la relación entre las tensiones de Reynolds  $-\rho\langle u'w'\rangle$  y la tensión de corte correspondiente a una vertical localizada en el centro del canal, en el flujo de aproximación, dada por  $-\rho U_{*a}^2$ .

De la figura VI.28 se destacan las siguientes características:

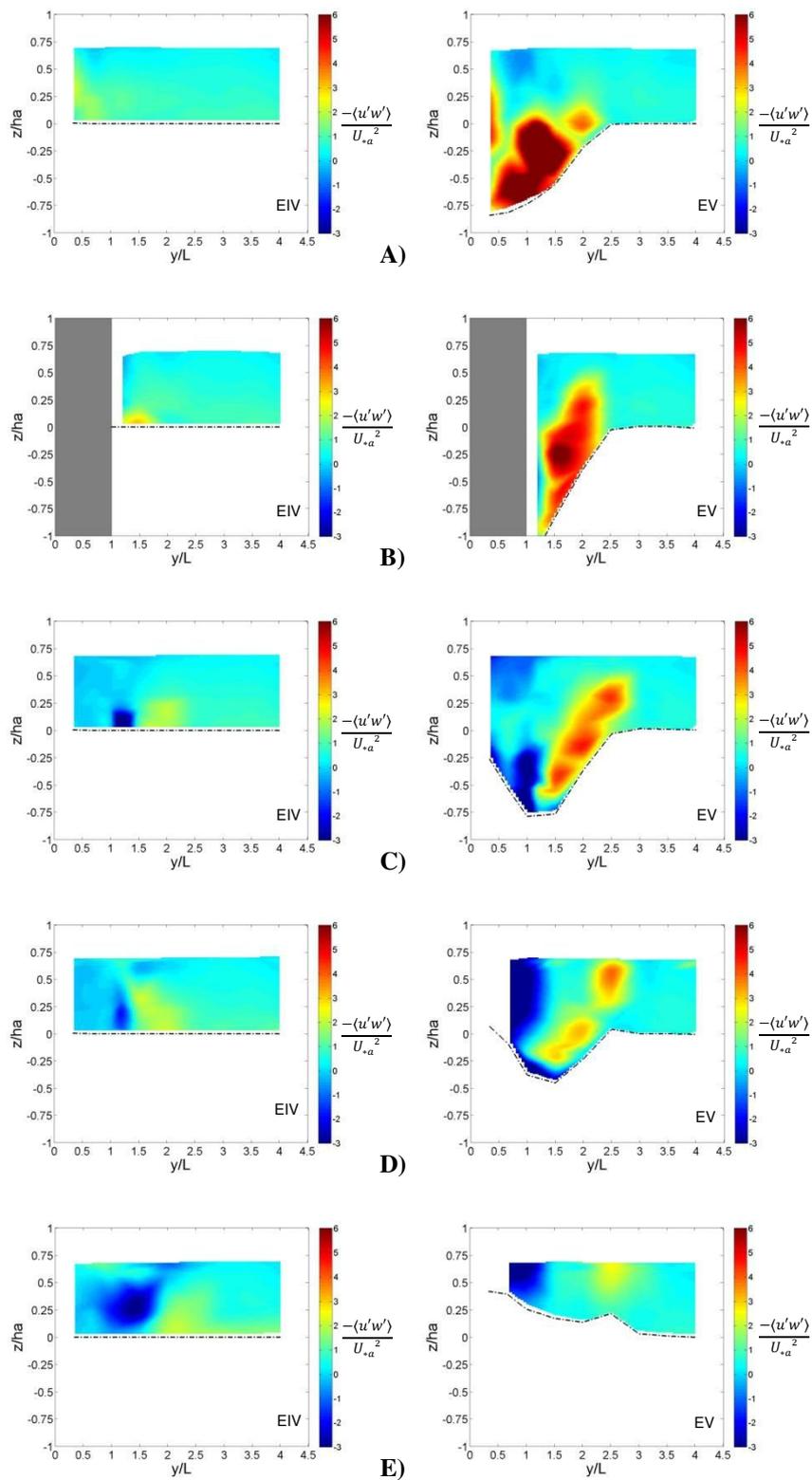
- ✓ Para las condiciones de lecho inicial las mayores tensiones se observan en la sección B, en las cercanías del fondo, próximo al extremo del estribo. Esta situación se puede ver con mayor claridad cuando se analizan los perfiles de distribución de  $\frac{-\langle u'w'\rangle}{U_{*a}^2}$  en las verticales que se presentan en la figura VI.29, correspondientes a las secciones transversales A, B, C, D, E. Se identifican en la sección B para el Ensayo IV valores máximos de las tensiones adimensionales cerca del fondo  $\frac{-\langle u'w'\rangle}{U_{*a}^2} \approx 3$ , en

correspondencia con las verticales localizadas en  $\frac{y}{L} = 1.2$  e  $\frac{y}{L} = 1.5$  siendo estas las localizaciones evaluadas más próximas al estribo, ya que las dimensiones del soporte utilizado para el velocímetro ADV Vectrino utilizado no permitieron realizar mediciones más cerca al extremo del estribo. Puesto que es en las inmediaciones de este sitio en donde comienzan las erosiones para la condición sin protección, se considera de importancia analizar el comportamiento de las tensiones en otros puntos que pudieran encontrarse adyacentes a este sector. Se construyó, en forma complementaria, la figura VI.30, en la que se representan perfiles de distribución vertical de  $\frac{-\langle u'w' \rangle}{U_{*a}^2}$  en una sección transversal localizada en  $\frac{x}{L} = -0.2$ . Los valores de las tensiones adimensionales en el fondo encontrados en tales ubicaciones resultaron mayores, siendo  $\frac{-\langle u'w' \rangle}{U_{*a}^2} \approx 5$ . Estos valores coinciden con las determinaciones de tensiones realizadas en otros estudios (Rajaratnam y Nwachukwu, 1983).

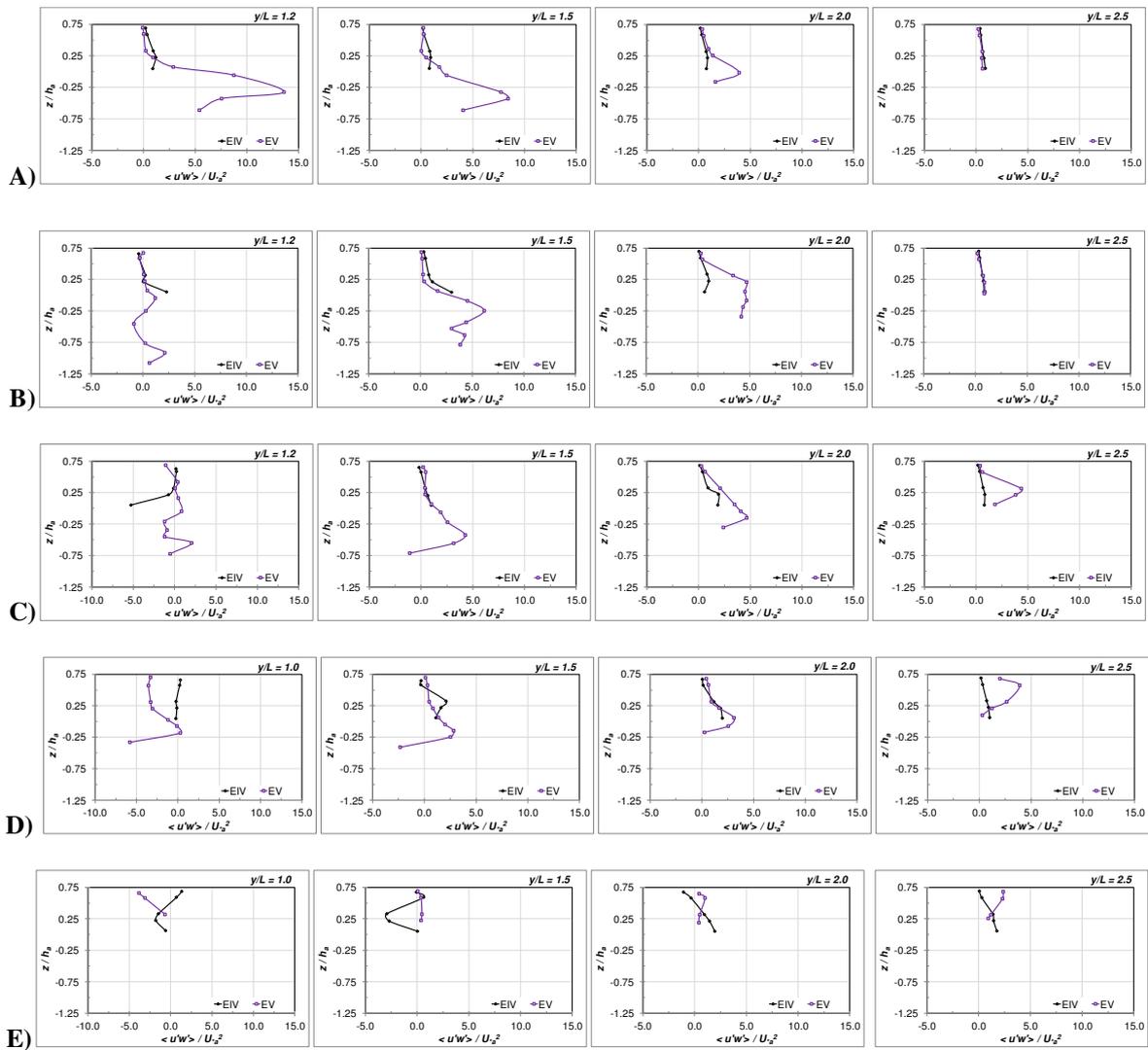
- ✓ En todas las secciones transversales ubicadas aguas abajo del estribo, para las condiciones experimentales del ensayo EIV se observa una región caracterizada por la presencia de tensiones negativas seguida por otra con tensiones positivas contigua, con los mayores valores (en magnitud) en las cercanías del fondo, ambas relacionadas con la presencia de la capa de corte desprendida desde el estribo. Hacia aguas abajo, la interfase entre las regiones con tensiones positivas y negativas se va inclinando, quedando las tensiones positivas por debajo de las negativas, en contacto con el fondo (Fig. VI.28.E, EIV).
- ✓ Con el desarrollo de las erosiones locales los máximos valores de tensiones adimensionales se asocian con la presencia de las corrientes helicoidales. Los perfiles que muestran la distribución vertical de  $\frac{-\langle u'w' \rangle}{U_{*a}^2}$  dentro de estas regiones de flujo presentan una forma muy similar a la mostrada por los perfiles de  $k$  (Fig. VI.25). Las figuras VI.29.A ( $\frac{y}{L} = 1.2$  ;  $\frac{y}{L} = 1.5$ ) y VI.29.B ( $\frac{y}{L} = 1.5$  ;  $\frac{y}{L} = 2.0$ ) demuestran esta situación para las secciones A y B respectivamente. En el interior de la hoya de erosión en esta región las tensiones adimensionales máximas alcanzan valores  $\frac{-\langle u'w' \rangle}{U_{*a}^2} \approx 13$  en la sección A. Los perfiles correspondientes a la progresiva  $\frac{y}{L} = 2.5$  de las secciones C, D y E demuestran el incremento de las tensiones adimensionales producto de la

presencia de la corriente helicoidal próxima al borde exterior de la hoya de erosión con magnitudes máximas observadas menores a las observadas en la sección A.

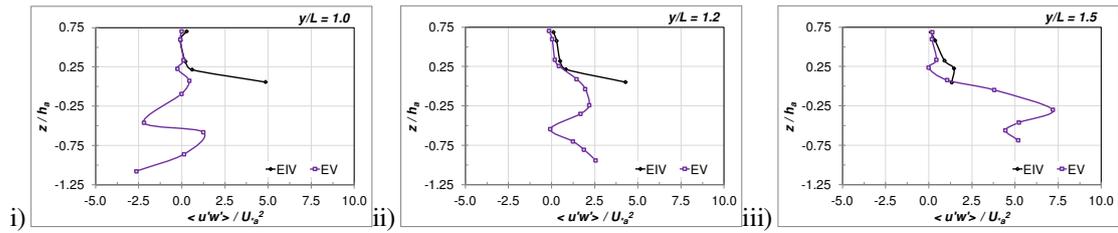
- ✓ Los resultados obtenidos a partir de las mediciones de velocidad realizadas en el ensayo EV demuestran que una vez el lecho erosionado la zona de tensiones negativas se desplazan con dirección hacia la margen izquierda. Esto se observa en los perfiles de distribución vertical de  $\frac{-\langle u'w' \rangle}{U_{*a}^2}$  que se muestran en la figura VI.29 (Sección D) y en la figura VI.31. En esta última figura se puede ver que las localizaciones  $\frac{y}{L} = 0.67$  en la situación inicial se encuentran inmersas en la zona de recirculación, con valores de tensiones próximos a cero y para la situación de lecho erosionado estas alcanzan valores negativos con magnitudes de  $\frac{-\langle u'w' \rangle}{U_{*a}^2} \approx -7$  para la sección de progresiva  $\frac{x}{L} = 1.33$ , los cuales en magnitud disminuyen en la dirección hacia aguas abajo. Este valor máximo negativo se da en una posición alejada del fondo,  $\frac{z}{h_a} \approx 0.55 - 0.60$ , tal como se muestra en la figura VI.31.
- ✓ Al igual que lo visto para la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad, en el sector exterior a la hoya de erosión ( $\frac{y}{L} > 2.5$ ) los perfiles de distribución vertical de  $\frac{-\langle u'w' \rangle}{U_{*a}^2}$  no cambian entre las situaciones inicial y final del proceso erosivo, con excepción de lo que ocurre en las cercanías del fondo en donde se verificó una disminución del mismo. Así lo demuestran los perfiles de figura VI.17 presentados anteriormente.



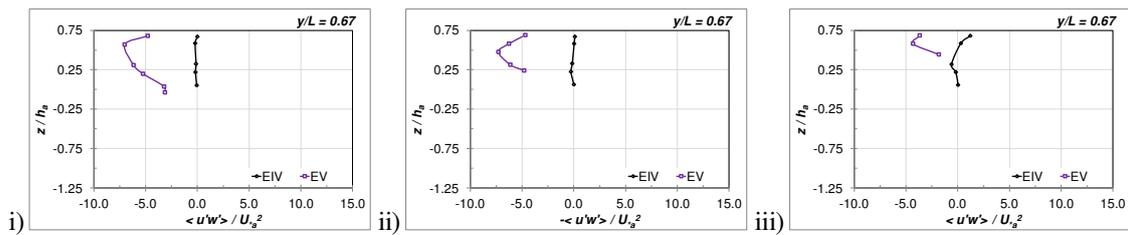
**Figura VI.28.-** Variaciones de las distribuciones de las tensiones de Reynolds adimensionales,  $\frac{-\langle u'w' \rangle}{U_a^2}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales A)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; B)  $\frac{x}{L} 0.0$ ; C)  $\frac{x}{L} = 0.67$ ; D)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; E)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . Estribo sin protección, EIV-EV



**Figura VI.29.-** Variaciones de perfiles de tensiones de Reynolds adimensionales,  $\frac{-(u'w')}{U_*^2}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales A)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; B)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; C)  $\frac{x}{L} = 0.67$ ; D)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; E)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . En todas las secciones se consideraron perfiles de progresivas transversales  $\frac{y}{L} = 1.5$ ;  $\frac{y}{L} = 2.0$ ;  $\frac{y}{L} = 2.5$ ; adicionalmente en las secciones A) y B) se consideró el perfil de progresiva  $\frac{y}{L} = 1.2$ ; mientras que en las secciones C), D) y D) el perfil de progresiva  $\frac{y}{L} = 1.0$ . Estribo sin protección, Ensayos EIV-EV



**Figura VI.30.-** Perfiles de distribución vertical de tensiones de Reynolds adimensionales,  $\frac{\langle u'w' \rangle}{U_{*a}^2}$ . Sección transversal localizada en  $\frac{x}{L} = -0.2$ ; i)  $\frac{y}{L} = 1.0$ ; ii)  $\frac{y}{L} = 1.2$ ; iii)  $\frac{y}{L} = 1.5$ . EIV-EV

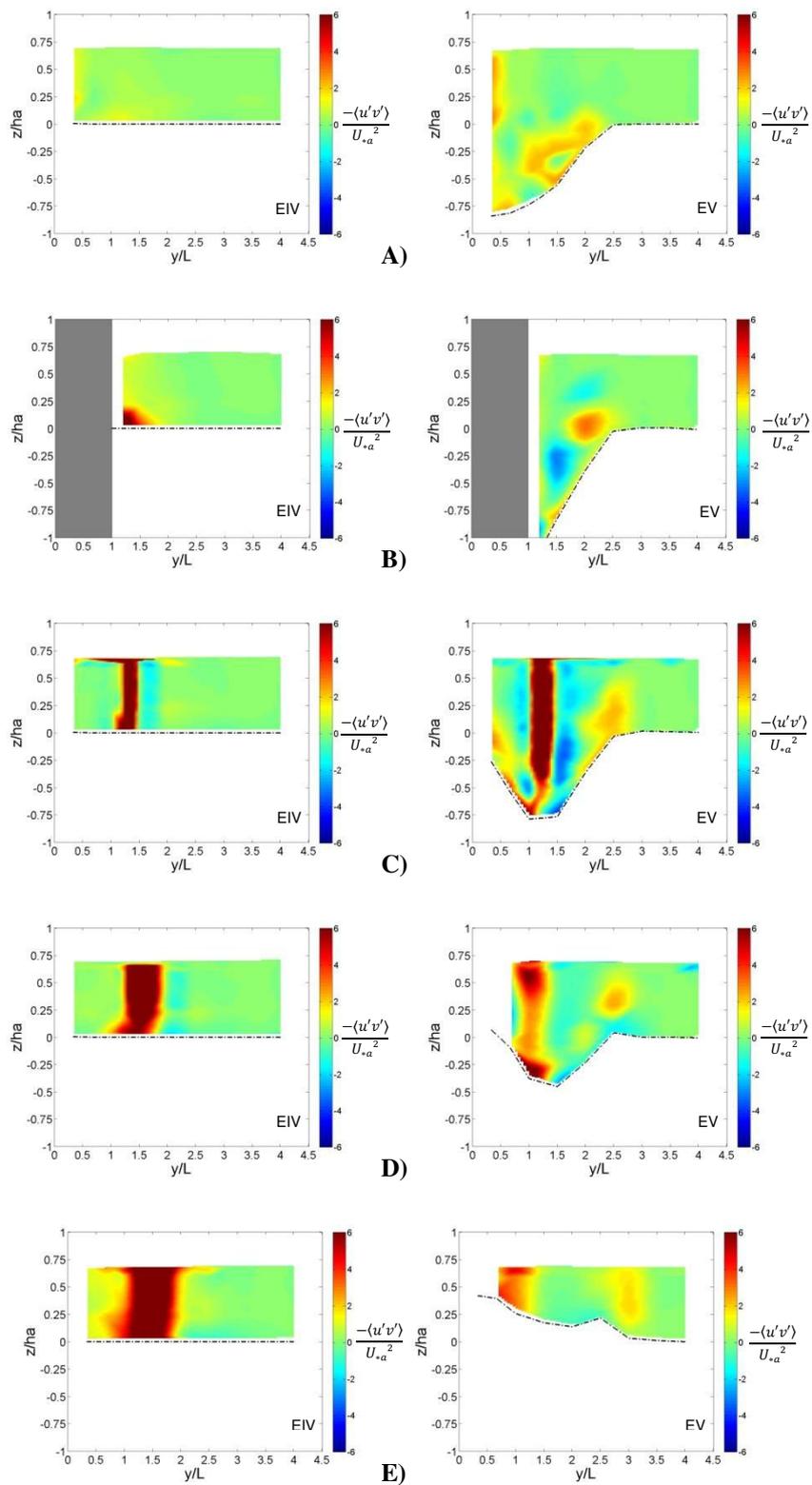


**Figura VI.31.-** Perfiles de distribución vertical de tensiones de Reynolds adimensionales,  $\frac{\langle u'w' \rangle}{U_{*a}^2}$ , en la progresiva transversal  $\frac{y}{L} = 0.67$  correspondiente a las secciones transversales i)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; ii)  $\frac{x}{L} = 2.0$ ; iii)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . EIV-EV

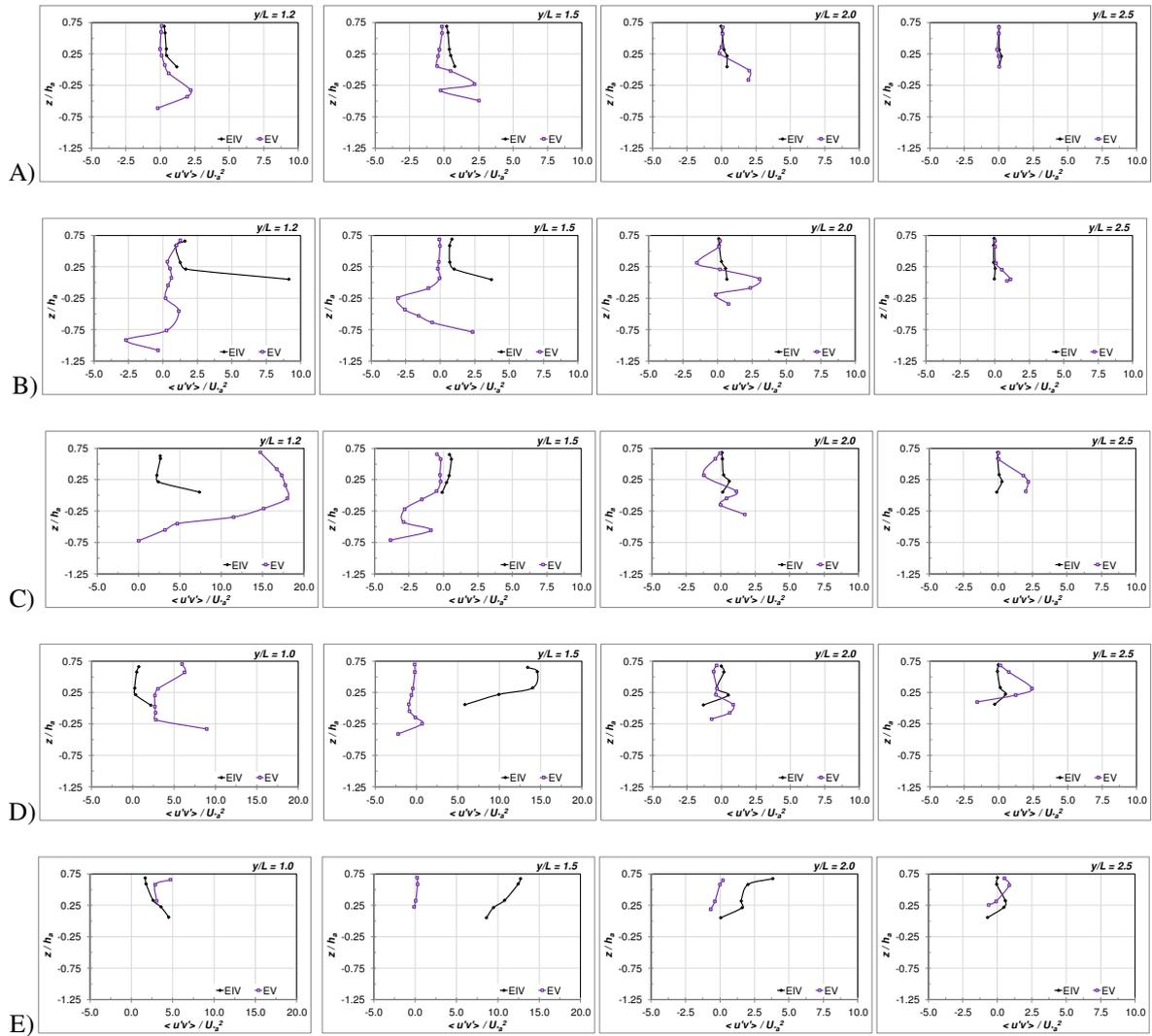
### VI.3.1.5.b Tensiones de Reynolds: Componente $-\rho \langle u'v' \rangle$

Las distribuciones de la tensión adimensional  $\frac{\langle u'v' \rangle}{U_{*a}^2}$  en las secciones transversales A, B, C, D, E que se consignan en la figura VI.13 se presentan en la figura VI.32, contemplando las condiciones del flujo asociadas a las dos morfologías del lecho representadas en los ensayos EIV y EV.

En la figura VI.33 se puede ver la variación de la distribución en profundidad de  $\frac{\langle u'v' \rangle}{U_{*a}^2}$  con el desarrollo del proceso de erosión local. Se han considerado cuatro verticales ubicadas en el sector que se erosiona, información que constituye parte de la utilizada para confeccionar la figura VI.32.



**Figura VI.32.-** Variaciones de las distribuciones de las tensiones de Reynolds adimensionales,  $\frac{-\langle uv'v' \rangle}{U_{*a}^2}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales A)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; B)  $\frac{x}{L} 0.0$ ; C)  $\frac{x}{L} = 0.67$ ; D)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; E)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . Estribo sin protección, EIV-EV

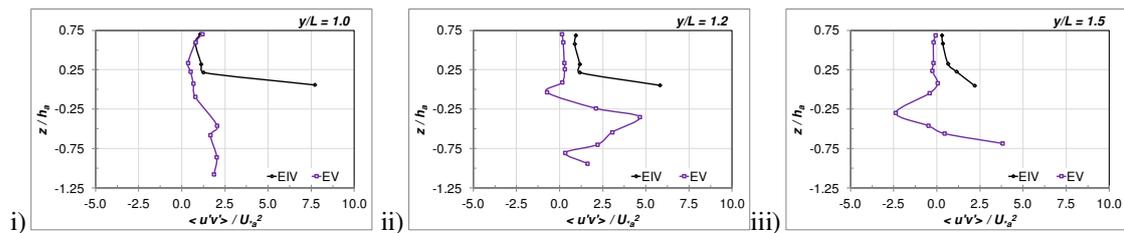


**Figura VI.33.-** Variaciones de perfiles de tensiones de Reynolds adimensionales,  $\frac{-\langle uv' \rangle}{U_*^2}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales A)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; B)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; C)  $\frac{x}{L} = 0.67$ ; D)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; E)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . En todas las secciones se consideraron perfiles de progresivas transversales  $\frac{y}{L} = 1.5$ ;  $\frac{y}{L} = 2.0$ ;  $\frac{y}{L} = 2.5$ ; adicionalmente en las secciones A) y B) se consideró el perfil de progresiva  $\frac{y}{L} = 1.2$ ; mientras que en las secciones C), D) y E) el perfil de progresiva  $\frac{y}{L} = 1.0$ . Estribo sin protección, Ensayos EIV-EV

Con respecto al comportamiento de las tensiones  $-\rho \langle u'v' \rangle$  observado en las figuras VI.32 y VI.33 se destacan los siguientes aspectos:

- ✓ Al inicio del proceso erosivo se identifica un núcleo con valores elevados (+) de tensiones en el fondo junto al extremo del estribo (Fig. VI.32.B). El perfil ( $\frac{y}{L} = 1.2$ ) de

figura VI.33.B demuestra cuánto más elevado es la tensión en dicho sector, no solo respecto de los valores encontrados para los niveles más elevados de dicho perfil, sino en comparación con el resto de las localizaciones correspondientes a las secciones A y B. En la posición aludida (sección B,  $\frac{y}{L} = 1.2$ )  $\frac{-\langle uv' \rangle}{U_{*a}^2}$  disminuyó notablemente con el desarrollo de las erosiones. Los perfiles que se muestran en la figura VI.34, relativos a verticales ubicadas muy próximas al extremo aguas arriba del estribo ( $\frac{x}{L} = -0.2$ ) demuestran un comportamiento semejante.



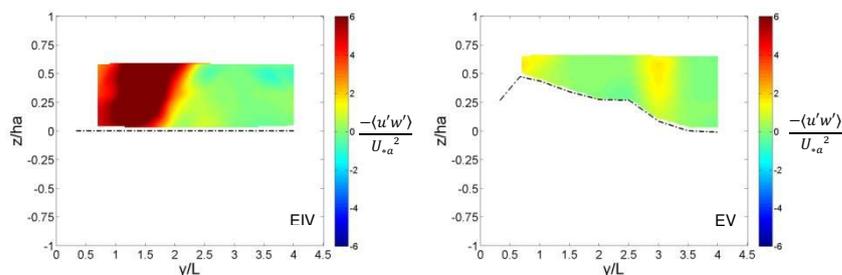
**Figura VI.34.-** Perfiles de distribución vertical de tensiones de Reynolds adimensionales,  $\frac{-\langle uv' \rangle}{U_{*a}^2}$ , en la sección transversal localizada en  $\frac{x}{L} = -0.2$ ; i)  $\frac{y}{L} = 1.0$ ; ii)  $\frac{y}{L} = 1.2$ ; iii)  $\frac{y}{L} = 1.5$ . EIV-EV

- ✓ En las secciones ubicadas aguas abajo del emplazamiento del estribo se observa para la situación inicial (Ensayo IV, secciones D y E) la existencia de una región de flujo con muy elevados valores de  $\frac{-\langle uv' \rangle}{U_{*a}^2}$ , todo a la largo del tirante, asociada con la capa de corte desprendida desde el estribo. Los perfiles correspondientes a la progresiva lateral  $\frac{y}{L} = 1.5$  de las figuras VI.33.D y E muestran como se distribuyen en la vertical las tensiones en este sector, con los mayores valores próximos a la superficie ( $\frac{-\langle uv' \rangle}{U_{*a}^2} \approx 15$ ). El ancho de esta faja de flujo aumenta hacia aguas abajo, al menos en la región en la que se realizaron las mediciones, limitada por la sección F ( $\frac{x}{L} = 5.33$ ), inclinando su borde exterior tal como lo muestra la figura VI.35. A ambos lados de esta región se observan una delgada capa con tensiones negativas, pero con magnitudes notablemente inferiores (Fig. VI.32. C, D, E).
- ✓ Con el desarrollo de erosiones, en aquellas regiones en las que se identificó la presencia de corrientes helicoidales se observan núcleos de flujos caracterizados por tensiones  $-\rho \langle u'v' \rangle$  positivas próximos a núcleos con tensiones negativas. Esta situación se

corresponde con la forma que presentan los perfiles que se muestran en la figura VI.33, en los que se alternan valores de  $\frac{-\langle u'v' \rangle}{U_{*a}^2}$  (+) y (-) (Fig. VI.33.A ( $\frac{y}{L} = 1.5$ ); Fig. VI.33.B ( $\frac{y}{L} = 1.5, \frac{y}{L} = 2.0$ ); Fig. VI.33.C ( $\frac{y}{L} = 2.0$ )). Se destaca que las magnitudes de las máximas tensiones (+) y (-) resultaron semejantes, esto es  $\left| \frac{-\langle u'v' \rangle}{U_{*a}^2} \right| \approx 2.5$ .

El perfil de figura VI.33.D ( $\frac{y}{L} = 2.5$ ) muestra un ejemplo de cómo varía con el desarrollo de las erosiones la distribución de  $\frac{-\langle u'v' \rangle}{U_{*a}^2}$  en una vertical localizada en coincidencia con la corriente helicoidal localizada próxima al borde exterior de la hoya de erosión.

- ✓ Los mapas de contornos correspondientes al ensayo EV de figura VI.32 demuestran el desplazamiento de la franja de flujo caracterizada por tener elevados valores (+) de tensiones  $-\rho \langle u'v' \rangle$  en dirección hacia la margen izquierda. El perfil de progresiva  $\frac{y}{L} = 1.2$  de figura VI.33.C muestra el notable incremento de tensiones experimentado en esta posición, debido a que en el ensayo EV la capa de corte ocupó dicha localización; mientras que los perfiles de progresiva  $\frac{y}{L} = 1.5$  de las figuras VI.33.D y E señalan una gran disminución en los valores de tensiones en toda la vertical, como consecuencia del desplazamiento de la capa de corte desprendida desde el estribo más allá de dicha localización.
- ✓ Los perfiles de distribución vertical de  $\frac{-\langle u'v' \rangle}{U_{*a}^2}$  en el sector no afectado por las erosiones no cambian entre las situaciones inicial y final del proceso erosivo, con excepción de lo que ocurre en las cercanías del fondo en donde se verificó una disminución del mismo. Así lo demuestran los perfiles de figura VI.17 presentados anteriormente.



**Figura VI.35.-** Variación de la distribución de tensiones de Reynolds adimensionales,  $\frac{-\langle u'v' \rangle}{U_{*a}^2}$  en la sección transversal de progresiva longitudinal  $\frac{x}{L} = 5.33$ . EIV – EV

### **VI.3.2 Distribución transversal de velocidades y parámetros de la turbulencia. Situación de estribo protegido: ensayos EVI-EVII-EVIII-EIX**

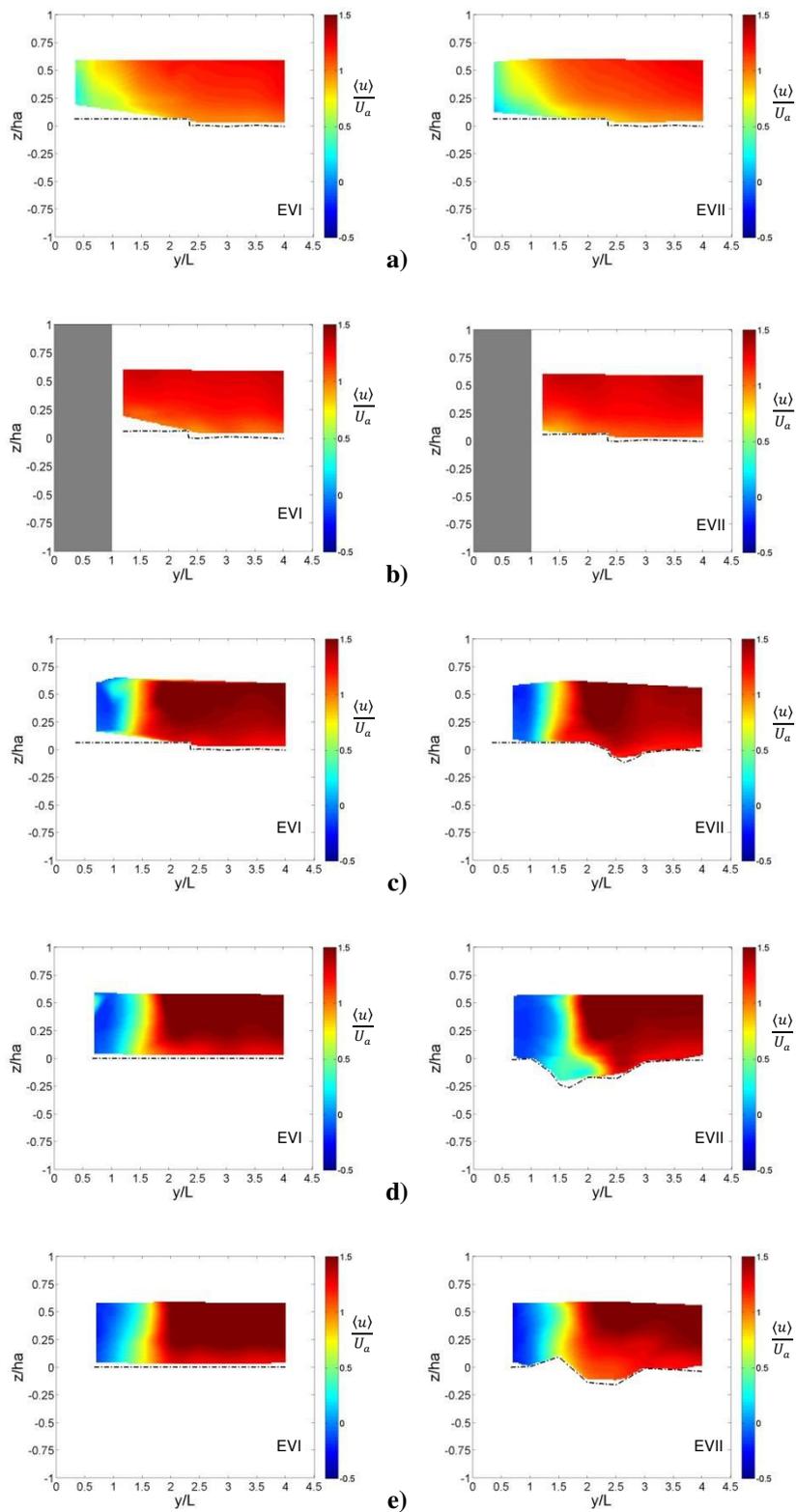
En esta sección se presenta la evolución de las distribuciones transversales de velocidades y parámetros de la turbulencia acorde se desarrolla el proceso erosivo entorno al estribo protegido con mantas flexibles. Se analizarán para ello las componentes longitudinales y verticales de la velocidad,  $\langle u \rangle$ ,  $\langle w \rangle$  respectivamente, la presencia de corrientes helicoidales, la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad,  $k$ , y las tensiones de Reynolds  $-\rho \langle u'w' \rangle$  y  $-\rho \langle u'v' \rangle$ ; todos evaluados a partir de las mediciones de velocidades realizadas en las secciones transversales a, b, c, d, e y f de la figura VI.14, en los ensayos EVI (condición de lecho inicial), EVII (lecho conformado al cabo de 100 minutos de desarrollo de erosiones), EVIII (lecho conformado al cabo de 400 minutos de erosión) y EIX (lecho conformado al cabo de 48 hs de desarrollo del proceso erosivo).

El análisis será semejante al realizado para el caso de estribo sin protección (ensayos EIV y EV) con el objeto de poder identificar similitudes y diferencias en el comportamiento del flujo en ambas situaciones.

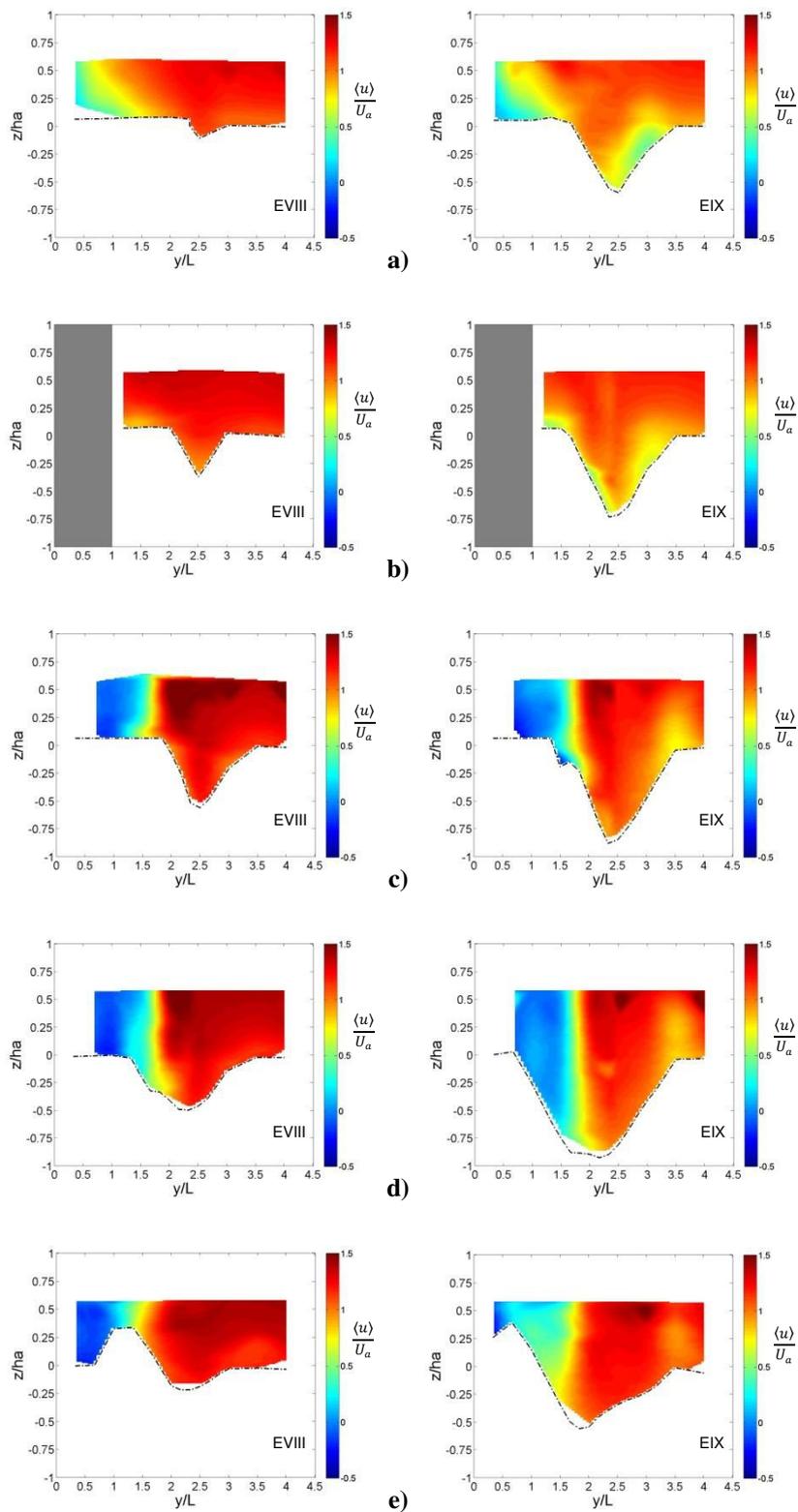
#### **VI.3.2.1 Componente longitudinal de la velocidad, $\langle u \rangle$**

Las figuras VI.36 y VI.37 se han construido de modo tal de poder observar la evolución de la distribución de la componente longitudinal de velocidades adimensionales,  $\frac{\langle u \rangle}{U_a}$ , con el desarrollo de las erosiones en torno al estribo protegido, en las diferentes secciones transversales consideradas para el análisis (Fig. VI.14). En la figura VI.36 se presenta la información derivada de las condiciones experimentales que definieron los ensayos EVI y EVII, y en la figura VI.37 la derivada de EVIII y EIX.

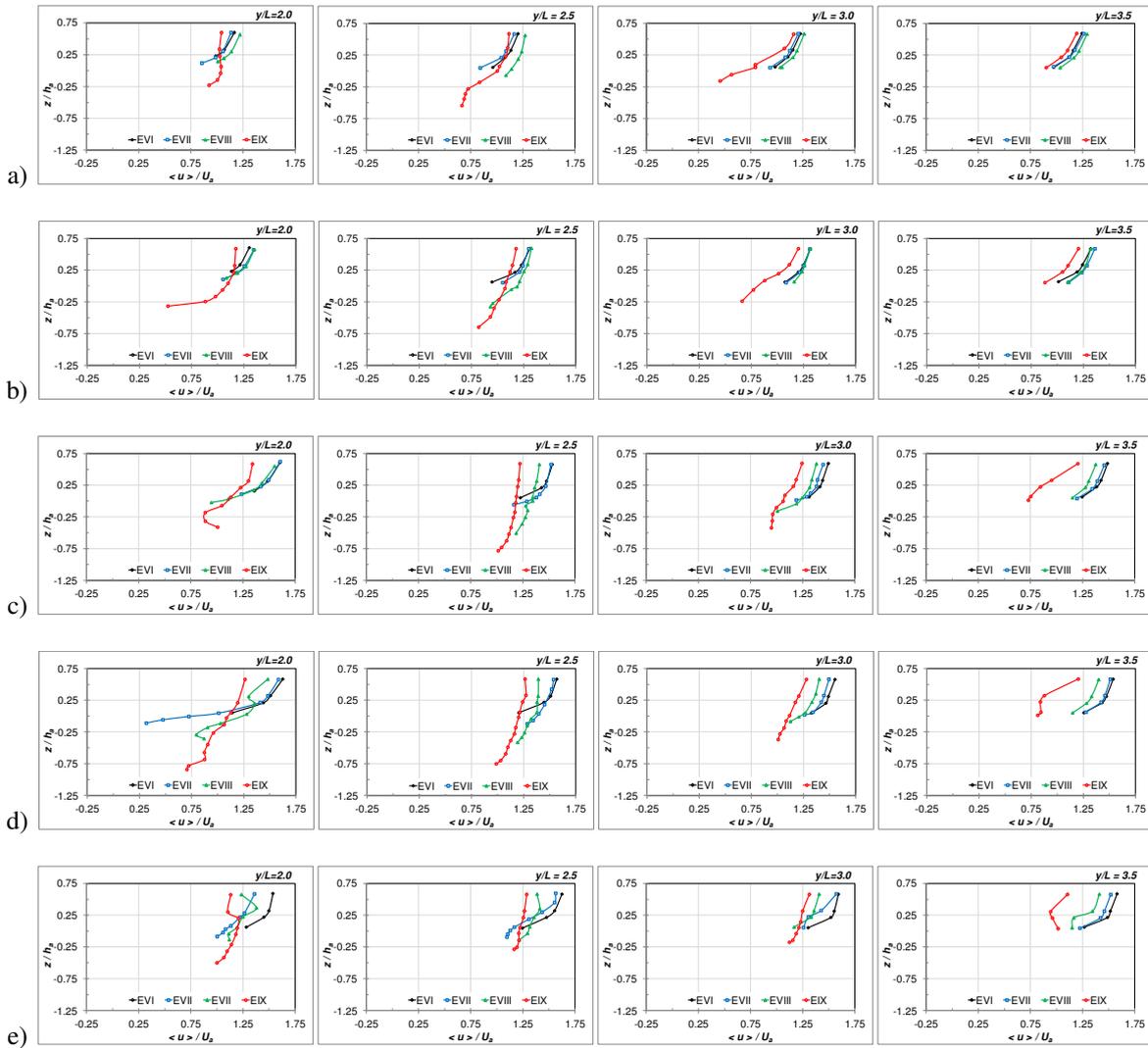
En la figura VI.38 se presenta la evolución de perfiles de velocidades adimensionales correspondientes a verticales de medición ubicadas en el sector erosionado. Se han seleccionado 4 verticales por cada una de las secciones a, b, c, d y e que conforman las figuras VI.36 y VI.37.



**Figura VI.36.-** Evolución de la distribución de velocidades longitudinales adimensionales,  $\frac{\langle u \rangle}{U_a}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales a)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; b)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; c)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; d)  $\frac{x}{L} = 2.0$ ; e)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . Estribo con protección. EVI-EVII



**Figura VI.37.-** Evolución de la distribución de velocidades longitudinales adimensionales,  $\frac{\langle u \rangle}{U_a}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales a)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; b)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; c)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; d)  $\frac{x}{L} = 2.0$ ; e)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . Estribo con protección. EVIII-EIX



**Figura VI.38.-** Evolución de perfiles de velocidades longitudinales adimensionales,  $\frac{\langle u \rangle}{U_a}$ , en las secciones transversales de progresivas longitudinales a)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; b)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; c)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; d)  $\frac{x}{L} = 2.0$ ; e)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . En todas las secciones se consideraron perfiles de progresivas transversales  $\frac{y}{L} = 2.0$ ;  $\frac{y}{L} = 2.5$ ;  $\frac{y}{L} = 3.0$  y  $\frac{y}{L} = 3.5$ . Estribo con protección. Ensayos EVI-EVII-EVIII-EIX

Del análisis de las figuras VI.36, VI.37 y VI.38 se destacan los siguientes aspectos relacionados con el comportamiento del campo de velocidades longitudinales actuante en el proceso de erosión junto al estribo de puente protegido, representado en el presente estudio:

- ✓ La configuración del campo de velocidades longitudinales observada al inicio del proceso de erosión junto al estribo protegido resultó similar a la que se pudo ver para el

caso de estribo sin protección, por lo que se validan todas las consideraciones realizadas al momento de analizar la figura VI.15 (EIV).

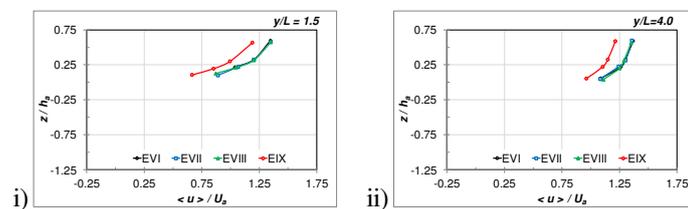
- ✓ Aguas arriba del estribo, junto a la pared de margen izquierda, se advierte la presencia de una región de flujo caracterizada por tener velocidades relativamente pequeñas y ocupar una parcela con aspecto de triángulo rectángulo, cuya base es aproximadamente  $1.5L$ , la cual no experimenta variaciones con el desarrollo de las erosiones, a diferencia de lo que ocurre cuando la protección del lecho no está presente, puesto que en dicha situación existen profundizaciones del lecho en ese sector.
- ✓ La sección transversal considerada aguas arriba del emplazamiento del estribo (Fig. VI.36.a y fig.VI.37.a), la cual presenta parte de su lecho recubierto por la protección, sólo se ve afectada por erosiones de cierta consideración para las condiciones experimentales del ensayo EIX. Esta situación se traduce en la escasa variabilidad que demuestran los perfiles de velocidades adimensionales de la figura VI.38.a, principalmente durante las tres primeras etapas del proceso (EVI, EVII, EVIII). Para la situación de mayor desarrollo de erosiones se distingue dentro de la hoya un núcleo de velocidades longitudinales pequeñas, recostado sobre el talud exterior de la hoya de erosión. La disposición de este sector de flujo resulta semejante al observado para el caso de estribo sin protección (Fig. VI.15), pero con un área menor, acorde al menor tamaño de la zona socavada en esta sección transversal. Los perfiles que muestran la evolución de la distribución vertical de  $\frac{\langle u \rangle}{U_a}$  en las progresivas  $\frac{y}{L} = 2.5$  e  $\frac{y}{L} = 3.0$  (Fig. VI.38.a) permiten observar la disminución de la magnitud de la velocidad en esta área. Hacia aguas abajo, este núcleo de velocidades reducidas sólo resultó visible en la sección de emplazamiento del estribo, pero con menores dimensiones (Fig.VI.37.b).
- ✓ En la sección transversal cuya traza coincide con la cara aguas arriba del estribo se observó una disminución en las velocidades del escurrimiento que tiene lugar por encima del nivel del lecho original en el estado de mayor erosión representado (EIX), las que se mantuvieron sin cambios en las etapas anteriores. Esta situación pudo verse también a ambos lados del sector erosionado, tal como lo demuestran los perfiles de velocidades de figura VI.39, correspondientes a las progresivas  $\frac{y}{L} = 1.5$  (sobre la protección) e  $\frac{y}{L} = 4.0$  (próxima a margen derecha).

- ✓ Las distribuciones de velocidades presentadas en las figuras VI.36.c, d, e y VI.37.c, d, e permiten señalar que con el desarrollo de las erosiones junto a la protección del lecho la zona de recirculación del flujo, localizada aguas abajo del estribo, se ensancha, desplazándose en dirección hacia la pared de margen derecha, alcanzando su mayor desarrollo lateral en las proximidades de la sección de progresiva  $\frac{x}{L} = 2.0$ . En función de ello es que en estas secciones una parte importante de la hoya de erosión se encuentra afectada por esta región del flujo. Esta tendencia se revierte hacia aguas abajo, tal como puede observarse en la figura VI.40, en la que se han incluido los mapas de contornos de velocidades derivados de los ensayos EVI y EIX en la sección f (Fig. VI.14) demostrando la reducción del sector ocupado por el flujo mencionado.
- ✓ Los mapas de contornos de velocidades longitudinales adimensionales construidos con los datos relevados en las secciones transversales ubicados aguas abajo del estribo muestran una disminución progresiva de las velocidades del escurrimiento que tiene lugar por encima del área erosionada ( $\frac{z}{h_a} > 0$ ;  $\frac{y}{L} > 2$ ) en todo el espesor en donde se realizaron las mediciones. La evolución de los perfiles de velocidad en este sector se pueden ver en las figuras VI.38.c, d y e ( $\frac{y}{L} = 2.5$ ;  $\frac{y}{L} = 3.0$ ,  $\frac{y}{L} = 3.5$ ). Al igual que lo visto para el caso de estribo sin protección, este comportamiento se mantiene en el sector de la sección no afectado por las erosiones locales ( $\frac{y}{L} > 3.5$ ), producto de la redistribución de caudales desencadenada por el desarrollo de las erosiones, ya mencionada en el capítulo V. Para demostrar este hecho se construyó la figura VI.41 en la que se puede observar la variación experimentada por un perfil de velocidades localizado en la progresiva transversal  $\frac{y}{L} = 4.0$ , correspondiente a la sección de progresiva  $\frac{x}{L} = 2.0$ . La figura VI.41 expresa también que, mientras que las velocidades disminuyen en toda la vertical, el resto de los parámetros presentados no experimenta variaciones de significación.
- ✓ Del mismo modo que para el caso de erosión junto al estribo sin protección se observa un déficit de la componente longitudinal de velocidades, comparado con las localizaciones vecinas, en correspondencia con el borde exterior de la hoya de erosión, el cual sólo fue posible observar en el estado de mayor desarrollo de las erosiones (EIX). En este sentido, se considera que no haber visualizado la presencia de esta zona en los estados de erosión intermedios representados (EVII y EVIII) no permite afirmar

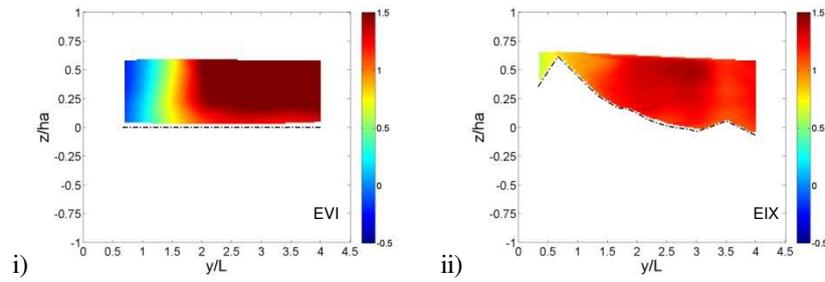
su inexistencia, ya que podrían tener un tamaño lo suficientemente pequeño para que no sean posible capturarlos por la grilla de medición adoptada para este estudio.

La presencia de esta zona se corresponde con el cambio en la forma que lucen los perfiles de velocidad localizados en  $\frac{y}{L} = 3.5$  de las figuras VI.38 c, d, e.

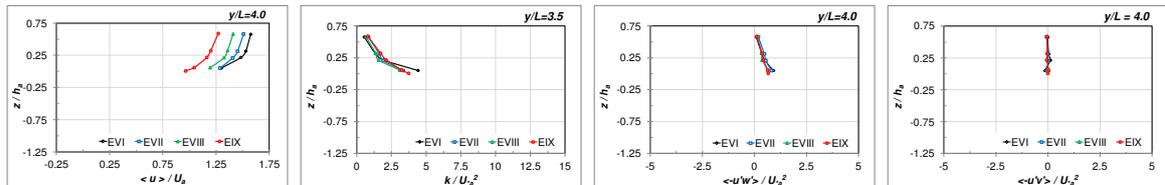
- ✓ La evolución de los perfiles de velocidad correspondientes a la progresiva  $\frac{y}{L} = 2.5$  (posición en donde se dan las mayores profundizaciones al costado de la protección, figuras VI.36.b,c y figuras VI.37.b, c) resultó similar para las secciones b, c, d (Fig. VI.14) (Figs. VI.38.b, c, d), sugiriendo la interacción entre el avance de erosiones en este sector y la configuración del flujo asociada. En efecto, se detecta un incremento de velocidades en las cercanías del fondo en los primeros momentos del desarrollo de las socavaciones, con el acrecentamiento de las profundizaciones disminuyen las velocidades en toda la vertical, para finalmente llegar a un perfil de distribución de velocidades aproximadamente logarítmico, forma que difiere de la que presentan los perfiles de velocidades observados en las verticales de los costados ( $\frac{y}{L} = 3.0$ ) para el ensayo EIX (Figs. VI.38.a, b, c).
- ✓ Las figuras VI.36.e (EVII) y VI.37.e (EVIII) demuestran que las velocidades longitudinales por debajo del nivel  $\frac{z}{h_a} = 0.2$  disminuyen de un modo más acentuado que en el resto de las secciones para condiciones de erosión semejantes. Este sector del flujo posee importantes velocidades verticales ascendentes, tal como se puede ver en el ítem siguiente.



**Figura VI.39.-** Evolución de perfiles de velocidades longitudinales adimensionales,  $\frac{\langle u \rangle}{U_a}$ , en verticales localizadas en la sección  $\frac{x}{L} = 0.0$ . i)  $\frac{y}{L} = 1.5$ ; ii)  $\frac{y}{L} = 4.0$ . Ensayos EVI-EVII-EVIII-EIX



**Figura VI.40.-** Evolución de la distribución de velocidades longitudinales adimensionales,  $\frac{\langle u \rangle}{U_a}$ , en la sección transversal de progresivas longitudinal  $\frac{x}{L} = 5.33$ . i) EVI. ii) EIX



**Figura VI.41.-** Variación de distribuciones verticales de: i) velocidades longitudinales,  $\frac{\langle u \rangle}{U_a}$ , ii) energía asociada a las fluctuaciones de velocidad,  $\frac{k}{U_a^2}$ , iii) tensiones  $\frac{-\langle u'w' \rangle}{U_a^2}$  y iv) tensiones  $\frac{-\langle u'v' \rangle}{U_a^2}$ , para una vertical ubicada a continuación de la posición de la hoya de erosión. Sección d).  $\frac{y}{L} = 4.0$ . Ensayos EVI-EVII-EVIII-EIX

### VI.3.2.2 Componente vertical de la velocidad, $\langle w \rangle$

El proceso de erosión en torno al estribo protegido representado en este estudio está caracterizado por la presencia de determinadas corrientes verticales de flujo, cuya evolución se presenta en la figura VI.42 (ensayos EVI y EVII) y en la figura VI.43 (ensayos EVIII y EIX). Las distribuciones transversales de  $\frac{\langle w \rangle}{U_a}$  que se incluyen corresponden a las secciones transversales a, b, c, d y e (Fig. VI.14). Del análisis de las figuras mencionadas surgen las siguientes consideraciones:

- ✓ En la situación inicial, previo al desarrollo de erosiones (EVI) se observaron las mismas configuraciones de velocidades verticales que las identificadas para el caso de estribo sin protección (Fig. VI.18).

Un aspecto particular que demuestran las figuras VI.42.a, b, c es la presencia de velocidades descendentes débiles en las inmediaciones del borde lateral de la protección.

- ✓ Con el desarrollo de erosiones se manifiestan velocidades verticales descendentes, aún en situaciones en que las profundizaciones del lecho son de escasa significación, tal como se observa en las figuras VI.42.c, d y en las figuras VI.43.a, b. Estas regiones de velocidades  $\langle w \rangle$  negativas, presentes en la totalidad del tirante, aumentan en magnitud y se expanden en un área cada vez mayor en la medida que avanza el proceso erosivo, afectando una porción mayoritaria de la hoya de erosión.

Las velocidades descendentes de mayor magnitud ( $\frac{\langle w \rangle}{U_a} \approx -0.4$ ) fueron medidas entre los ensayos EVIII y EIX, siempre posicionadas dentro de la hoya de erosión. Esta situación puede observarse en los perfiles de distribución de  $\frac{\langle w \rangle}{U_a}$  que se exhiben en las figuras VI.44.a, b, c ( $\frac{y}{L} = 2.0$ ;  $\frac{y}{L} = 2.5$ ).

Esta corriente descendente se debilita a partir de la sección transversal de progresiva  $\frac{x}{L} = 2.0$ , (Fig. VI.43.d) resultando totalmente inexistente para  $\frac{x}{L} = 3.33$ , (Fig. VI.43.e).

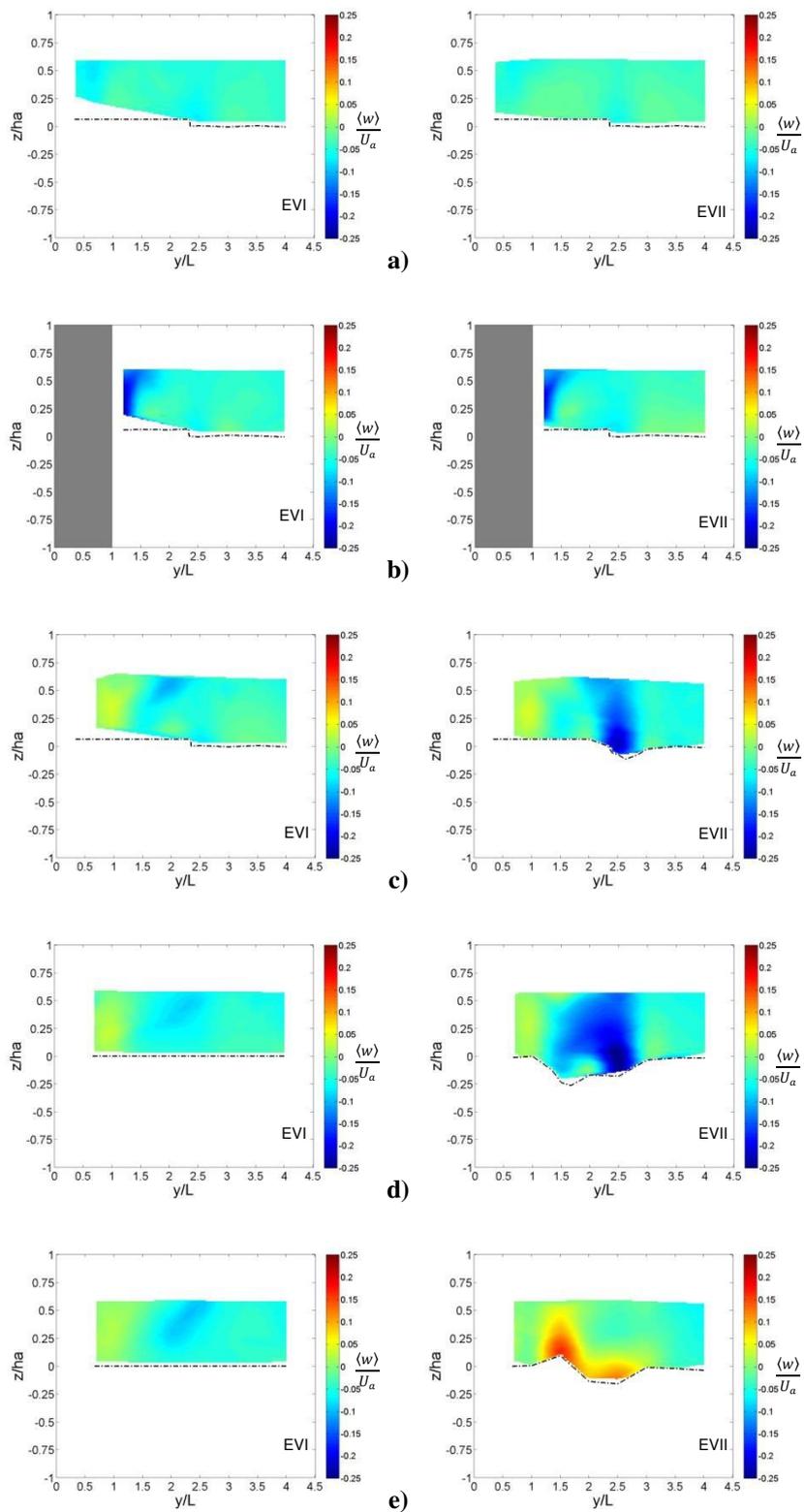
- ✓ Se observan velocidades ascendentes significativas sobre el talud exterior y el borde inmediato de la hoya de erosión, las cuales acrecientan su intensidad con el aumento en las profundizaciones. Es así como en el ensayo EVIII resultan visibles en las secciones c, d, e, mientras que en el ensayo EIX todas las secciones analizadas lo demuestran. Las magnitudes máximas en este sector fueron  $\frac{\langle w \rangle}{U_a} \approx 0.25$ .

En las secciones ubicadas aguas abajo del estribo, el núcleo de velocidades  $\langle w \rangle$  positivas localizadas sobre el borde exterior de la hoya perturba el escurrimiento hasta en las posiciones en que se realizaron mediciones más alejadas del lecho (Fig. VI.44.c,  $\frac{y}{L} = 3.5$  y Fig. VI.45.d y e ( $\frac{y}{L} = 3.5$ )).

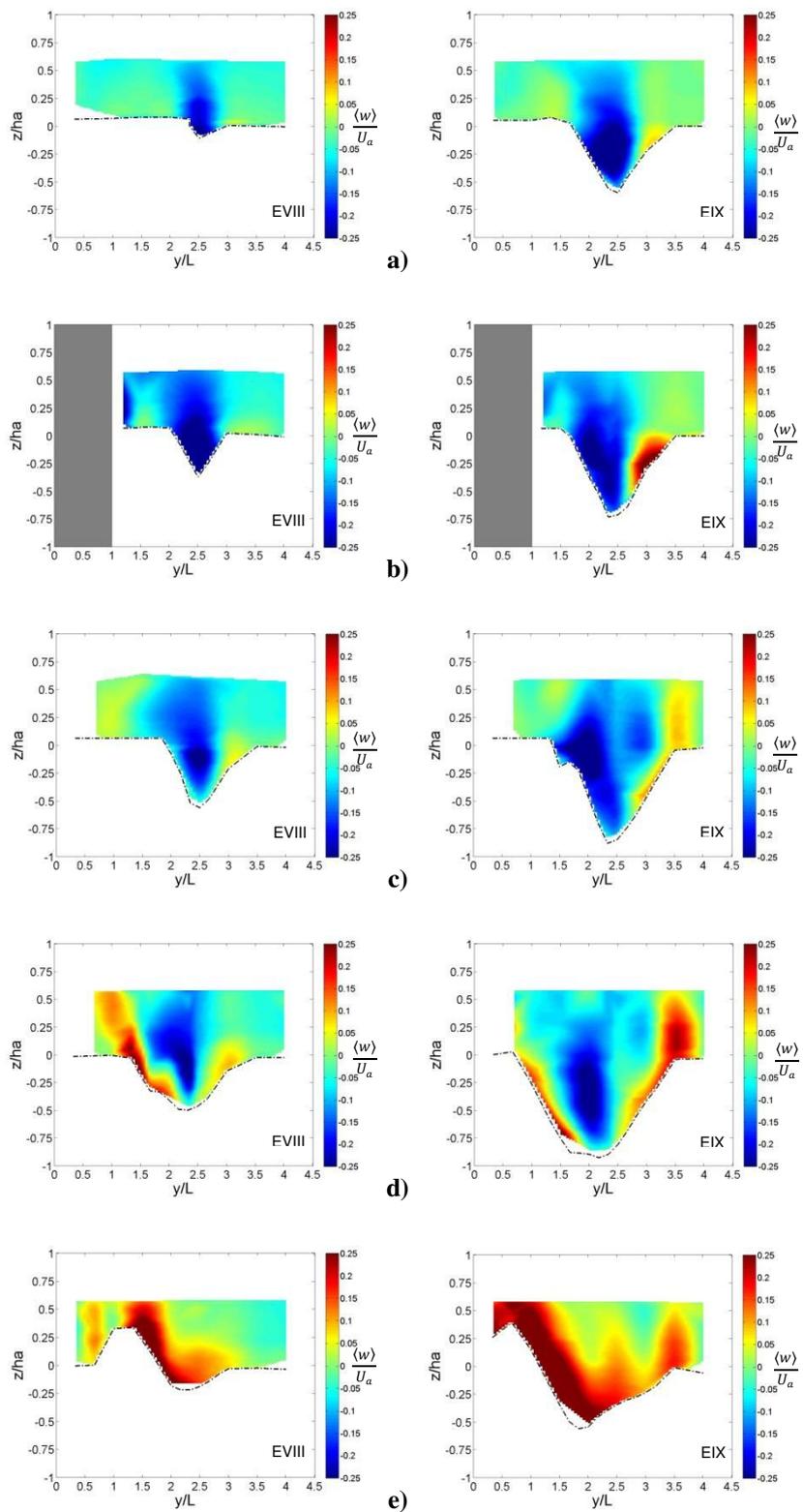
- ✓ Resulta particular la presencia de un segundo núcleo de velocidades ascendentes ubicado sobre el talud interior de la hoya de erosión, el cual aparece en las secciones consideradas más alejadas del estribo (Figs. VI.43.d, e). En este sector se encontraron

valores máximos de velocidad  $\frac{\langle w \rangle}{U_a} \approx 0.50$ , muy superiores a los hallados sobre el talud exterior (Fig. VI.45.e ( $\frac{y}{L} = 1.5$ )).

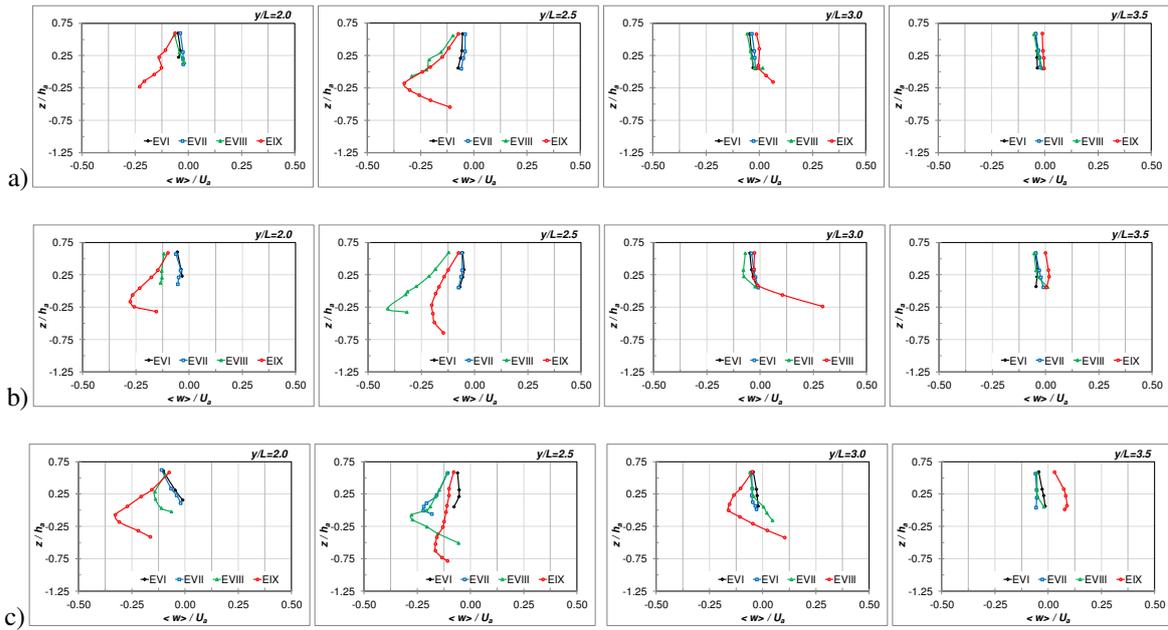
- ✓ En la sección de progresiva  $\frac{x}{L} = 3.33$ , existieron velocidades ascendentes durante todo el proceso erosivo, siendo una gran proporción de la sección afectada por estas velocidades durante el estado de mayor desarrollo de erosión (EIX) (Figs. VI.43.e).



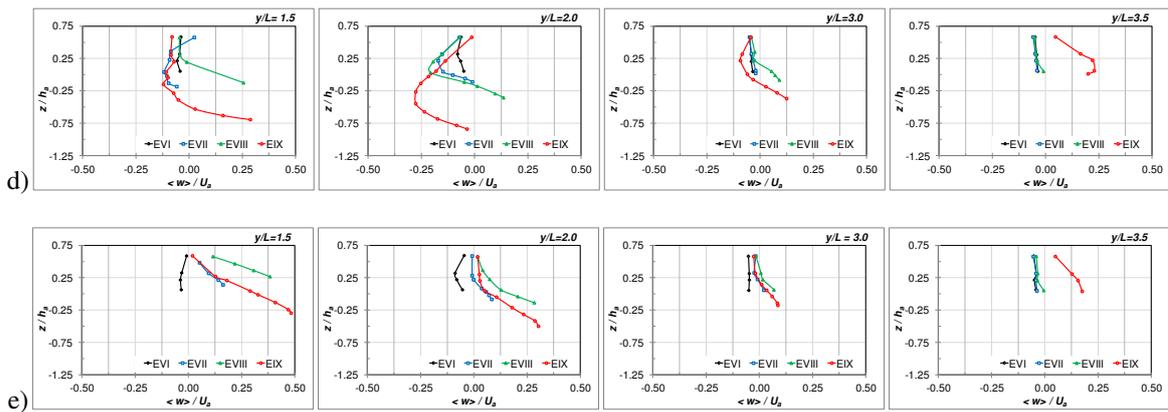
**Figura VI.42.-** Evolución de la distribución de velocidades verticales adimensionales,  $\frac{\langle w \rangle}{U_a}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales a)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; b)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; c)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; d)  $\frac{x}{L} = 2.0$ ; e)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . Estribo con protección. EVI-EVII



**Figura VI.43.-** Evolución de la distribución de velocidades verticales adimensionales,  $\frac{\langle w \rangle}{U_a}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales a)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; b)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; c)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; d)  $\frac{x}{L} = 2.0$ ; e)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . Estribo con protección. EVIII-EIX



**Figura VI.44.-** Evolución de perfiles de velocidades verticales adimensionales,  $\frac{\langle w \rangle}{U_a}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales a)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; b)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; c)  $\frac{x}{L} = 1.33$ . Progresivas transversales  $\frac{y}{L} = 2.0$ ;  $\frac{y}{L} = 2.5$ ;  $\frac{y}{L} = 3.0$  y  $\frac{y}{L} = 3.5$ . Estribo con protección. Ensayos EVI-EVII-EVIII-EIX



**Figura VI.45.-** Evolución de perfiles de velocidades longitudinales adimensionales,  $\frac{\langle w \rangle}{U_a}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales d)  $\frac{x}{L} = 2.0$  y e)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . Progresivas transversales  $\frac{y}{L} = 1.5$ ;  $\frac{y}{L} = 2.0$ ;  $\frac{y}{L} = 3.0$  y  $\frac{y}{L} = 3.5$ . Estribo con protección. Ensayos EVI-EVII-EVIII-EIX

### VI.3.2.3 Identificación de corrientes helicoidales en el plano “yz”

Se aplicaron las expresiones VI.1 a VI.4 a los datos de velocidades medidos durante los ensayos EVI, EVII, EVIII y EIX. A partir de los resultados obtenidos se construyeron las figuras VI.46 a VI.49, en las que se representan los vectores de velocidad promediados en profundidad,  $V_{xy}$ , correspondientes a cada una de las verticales de medición pertenecientes a las secciones transversales a, b, c, d y e. (Fig. VI.14).

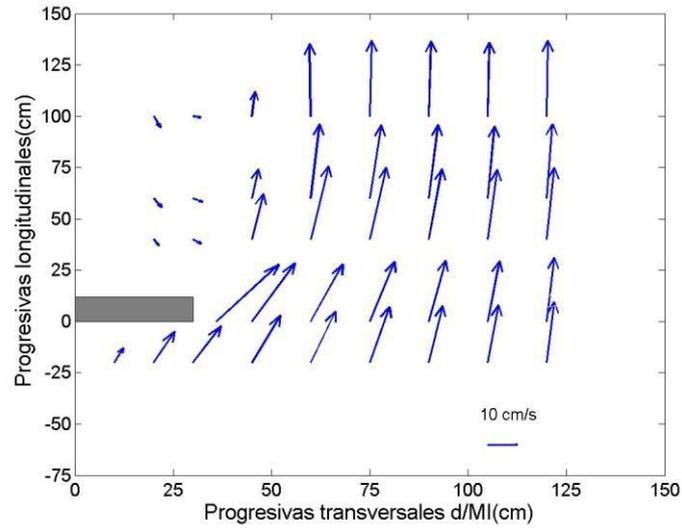
A lo largo del tramo de canal analizado, en aquel sector de escurrimiento con progresivas transversales mayores a 75 cm ( $\frac{y}{L} > 2.5$ ), se observa una disminución en los ángulos de inclinación de los vectores de velocidad  $\varphi$  (Fig. VI.20), con el desarrollo del proceso erosivo, encontrándose valores de  $\varphi \approx 0$  (velocidades de flujo paralelas a la dirección del flujo principal) en la situación de máxima erosión representada (EIX) (Fig. VI.49).

Cuando se analizan las secciones localizadas aguas arriba y en coincidencia con el emplazamiento del estribo se puede ver que, durante el desarrollo del proceso erosivo, las velocidades no experimentaron cambios significativos en su orientación sobre la mitad izquierda de la sección (cercana al estribo), esto es progresivas laterales menores a 75 cm ( $\frac{y}{L} < 2.5$ ).

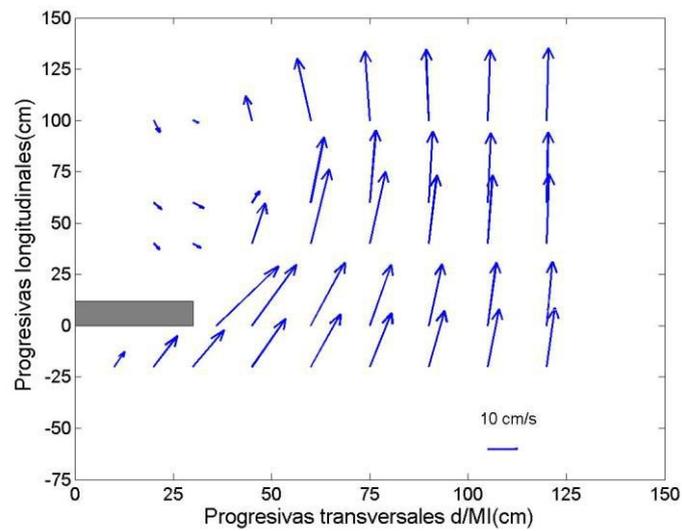
Los resultados correspondientes a las secciones ubicadas a 40 cm ( $\frac{x}{L} = 1.33$ ) y 60 cm ( $\frac{x}{L} = 2.0$ ) aguas abajo del estribo demuestran que las magnitudes de  $V_{xy}$  disminuyeron notablemente en las proximidades del borde de la región de recirculación de agua ( $\frac{y}{L} < 2$ ), al tiempo que las mismas manifiestan un ángulo de inclinación  $\varphi$  mayor, orientados hacia el sector de mayores profundizaciones. En ambas secciones transversales se observa que  $\varphi$  disminuye en el sector para el que  $45\text{cm} < y < 75\text{cm}$  ( $1.5 < \frac{y}{L} < 2.5$ ), observándose valores próximos a cero en la sección coincidente con  $x = 60\text{ cm}$  ( $\frac{x}{L} = 2.0$ ).

Resulta particular el comportamiento de las velocidades  $V_{xy}$  en la sección considerada más aguas abajo, esto es  $x=100\text{ cm}$  ( $\frac{x}{L} = 3.33$ ), tal es el caso de aquellas correspondientes a progresivas  $y < 45\text{cm}$ , ( $\frac{y}{L} = 1.5$ ) las que demuestran un progresivo incremento de sus magnitudes. En esta sección se observan ángulos de inclinación  $\varphi$  negativos, indicando un flujo medio orientado hacia la pared del canal de margen izquierda, dirección que, en esta

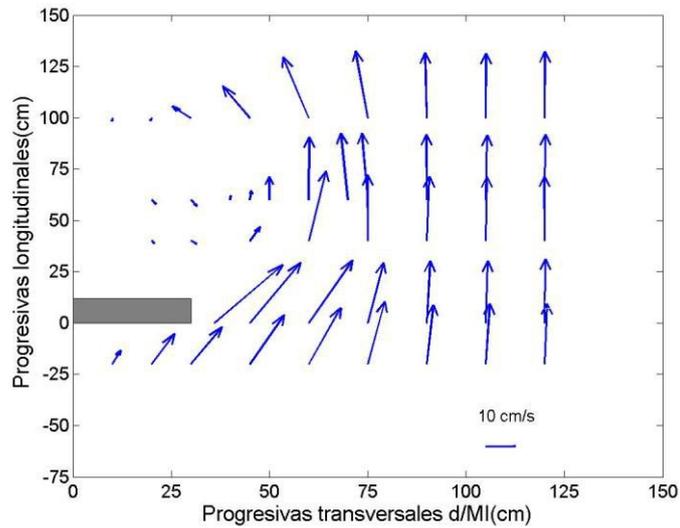
sección, se verifica para aquellos vectores actuantes hasta aproximadamente la mitad de la sección transversal, esto es  $y < 75 \text{ cm}$ , ( $\frac{y}{L} < 2.5$ ) (Fig. VI.49).



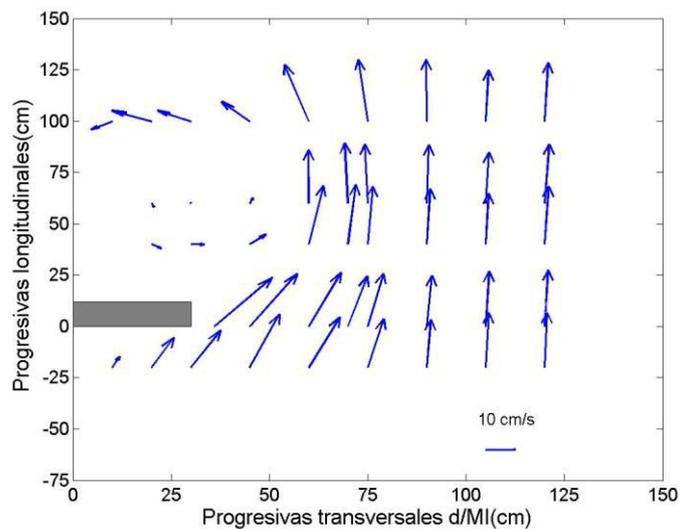
**Figura VI.46.-** Vectores de velocidad promediados en la vertical. EVI



**Figura VI.47.-** Vectores de velocidad promediados en la vertical. EVII



**Figura VI.48.-** Vectores de velocidad promediados en la vertical. EVIII



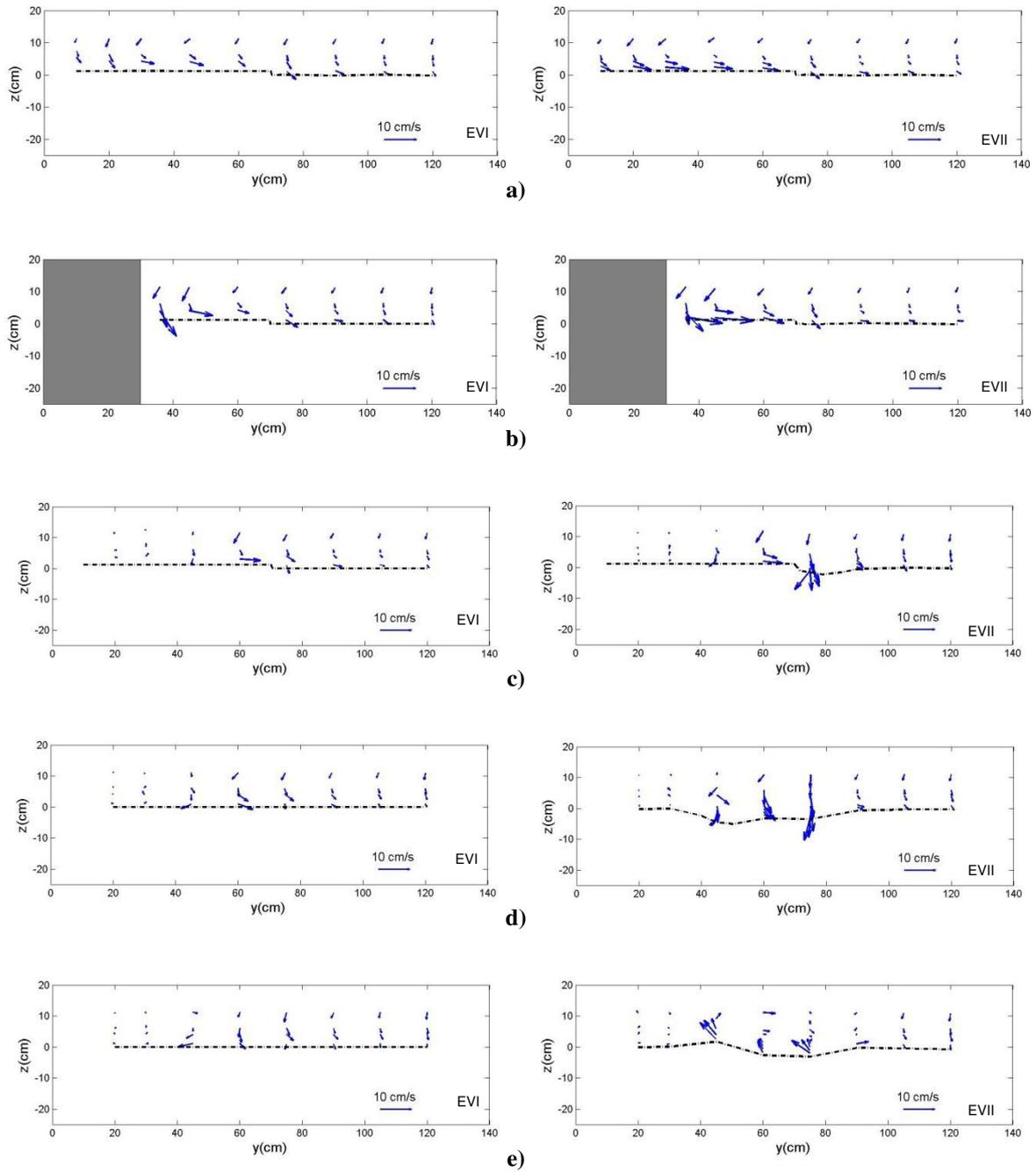
**Figura VI.49.-** Vectores de velocidad promediados en la vertical. EIX

Con el objetivo de aislar la velocidad secundaria (generada por el flujo helicoidal) asociada a cada vector velocidad medido,  $v_s$ , se calcularon las componentes de cada uno de ellos según la dirección normal al vector promedio en la vertical  $V_{xy}$  que corresponda, de acuerdo a la vertical particular de que se trate (Figs. VI. 46 a VI.49), a partir de las expresiones VI.5 a VI.11, anteriormente presentadas.

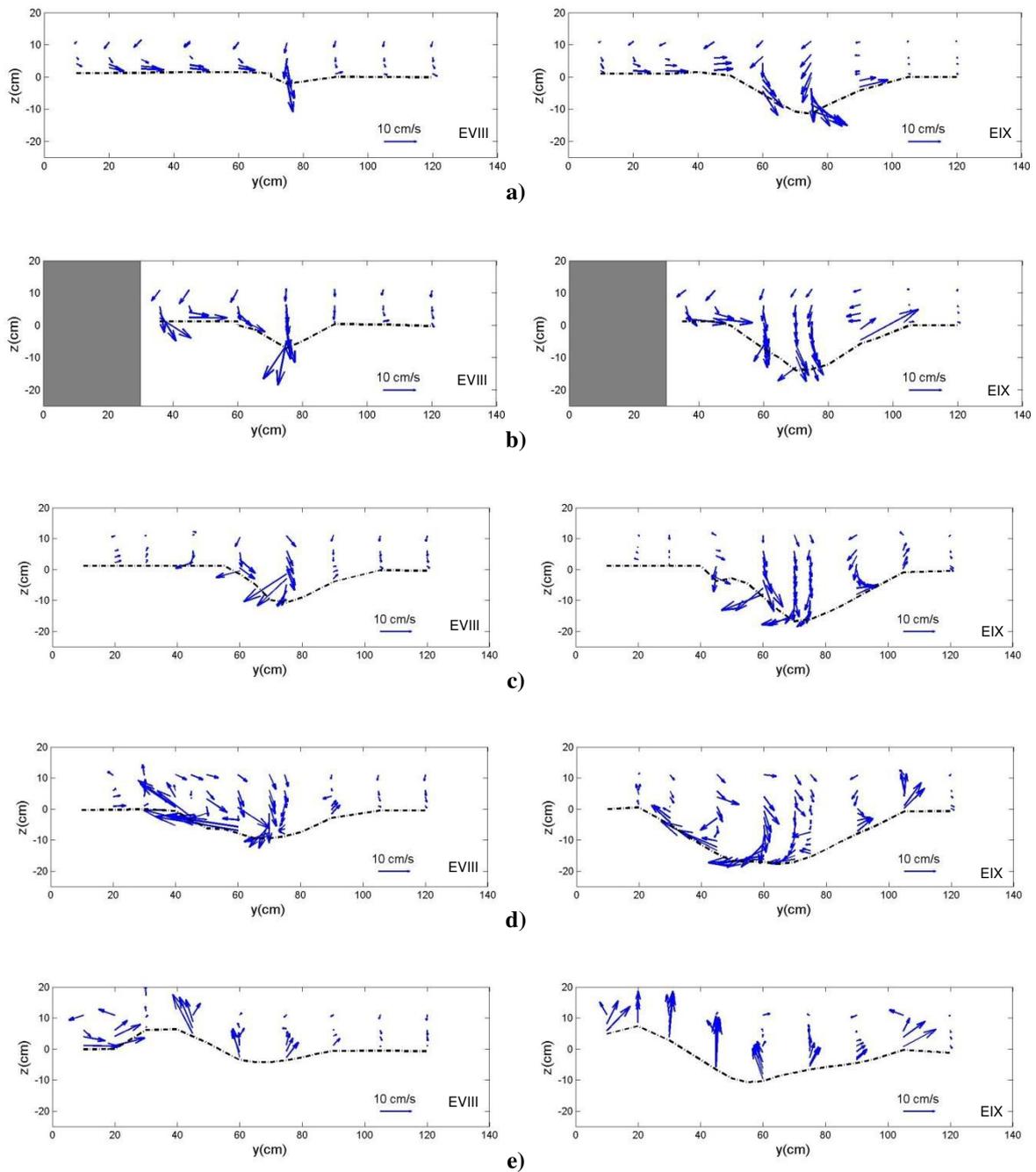
Para identificar patrones de flujo lateral y evaluar su evolución con el desarrollo de las erosiones en torno al estribo protegido se construyeron las figuras VI.50 y VI.51, en las que se pueden ver los vectores resultantes de componer la proyección según el eje “y” de la velocidad secundaria  $v_{sy}$  y la componente vertical de la velocidad registrada,  $\langle w \rangle$ . La figura VI.50 refiere a los datos relevados en los ensayos EVI y EVII, mientras que la figura VI.51 a los provenientes de los ensayos EVIII y EIX. El análisis conjunto de las figuras indicadas sugiere las cuestiones subsecuentes:

- ✓ Los resultados disponibles correspondientes a la situación inicial del proceso erosivo junto al estribo protegido (EVI) no proporcionan información adicional a la encontrada para el caso de estribo sin protección (EIV) (Fig. VI.23).
- ✓ Los datos disponibles registran la presencia de una corriente helicoidal con sentido de rotación anti-horario en el estado de máxima erosión representado (EIX). En las secciones a ( $x=-20$  cm;  $\frac{x}{L} = -0.67$ ) y b ( $x=0.0$  cm;  $\frac{x}{L} = 0.0$ ) este patrón se observa principalmente sobre el talud exterior de la hoya de erosión, mientras que en las secciones c ( $x=40$  cm;  $\frac{x}{L} = 1.33$ ), d ( $x=60$  cm;  $\frac{x}{L} = 2.0$ ) y e ( $x=100$  cm;  $\frac{x}{L} = 3.33$ ) se ubica en las proximidades del borde exterior de la hoya de erosión, (Fig.VI.51).  
La disposición de esta región de flujo resulta semejante a la encontrada para el caso de erosión junto al estribo sin protección (Fig. VI.23) y al igual que lo visto para aquella situación concuerda con las zonas de déficit de la componente longitudinal de velocidades  $\langle u \rangle$  y la presencia de velocidades ascendentes significativas.
- ✓ La figura VI.51. d muestra además la presencia, en los ensayos EVIII y EIX, de una corriente helicoidal con sentido de rotación horario, la cual se desarrolla sobre el talud interno de la hoya de erosión. En esta sección “d” la protección ya no está presente, por lo que, a diferencia de lo que ocurre en las secciones anteriores, las erosiones para progresivas  $y < 60$  cm ( $\frac{y}{L} < 2.0$ ) fueron de consideración. Esta corriente, visible para las condiciones experimentales de los ensayos EVIII y EIX se caracteriza por tener velocidades importantes en las cercanías del fondo. Esta corriente de sentido horario es muy débil en la sección  $x=40$  cm ( $\frac{x}{L} = 1.33$ ) (Fig. VI.51.c)
- ✓ En la sección e ( $x=100$  cm;  $\frac{x}{L} = 3.33$ ) para el ensayo EVIII se observa la presencia de una corriente con sentido de rotación anti-horario, localizada entre la pared del canal de

margen izquierda y la zona de depósito de sedimento, por lo que su evolución está condicionada por la dinámica de esta última.



**Figura VI.50.-** Composición entre la velocidades helicoidales proyectadas en el plano “yz”,  $v_{sy}$ , y la velocidad vertical,  $\langle w \rangle$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales a)  $x=-20\text{cm}$  ( $\frac{x}{L} = -0.67$ ); b)  $x=0.0\text{cm}$ , ( $\frac{x}{L} = 0.0$ ); c)  $x=40\text{cm}$ , ( $\frac{x}{L} = 1.33$ ); d)  $x=60\text{cm}$ , ( $\frac{x}{L} = 2.0$ ); e)  $x=100\text{cm}$ , ( $\frac{x}{L} = 3.33$ ). Estribo con protección. Ensayos EVI-EVII

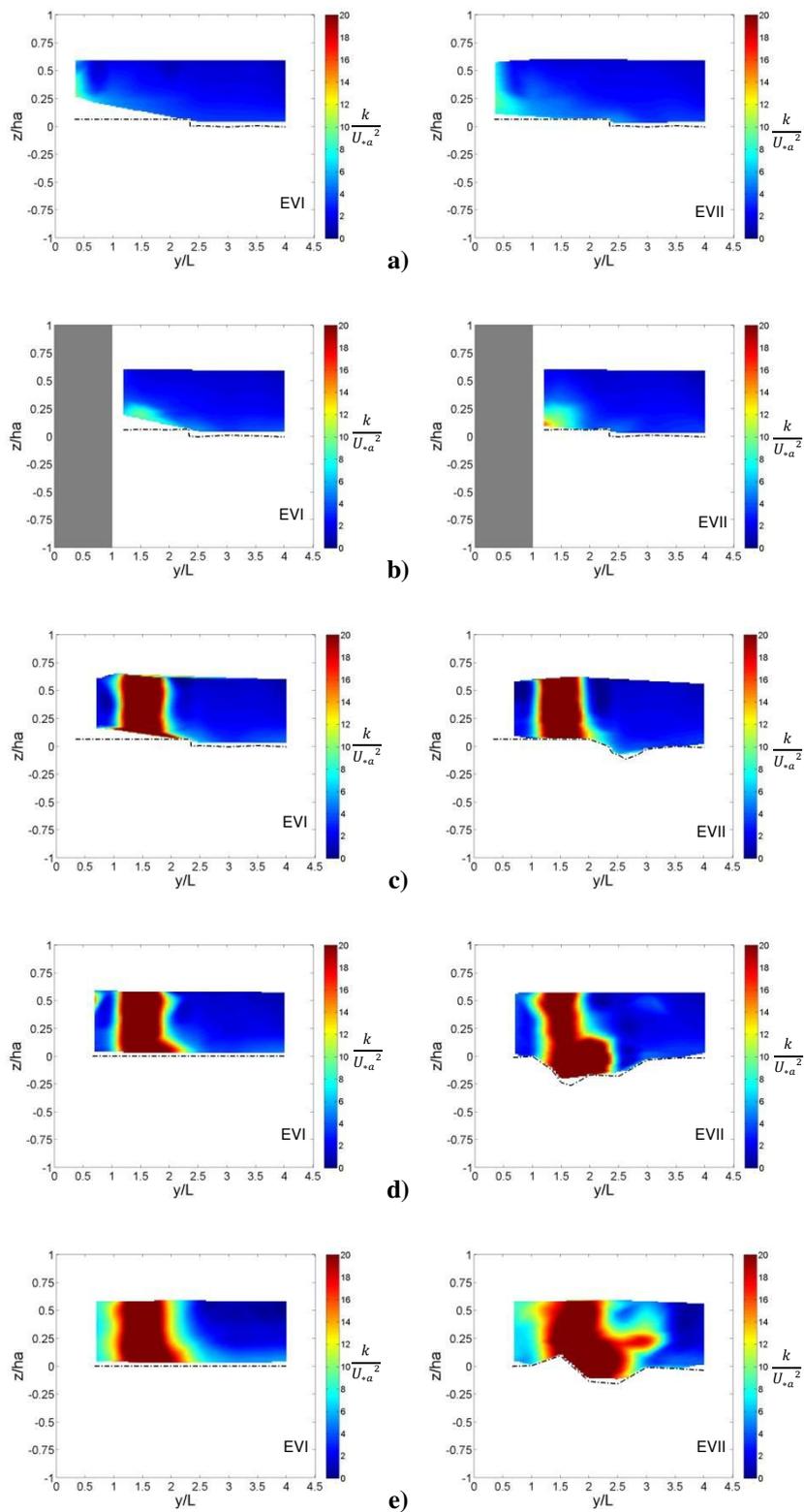


**Figura VI.51.-** Composición entre las velocidades helicoidales proyectadas en el plano “yz”,  $v_{sy}$ , y la velocidad vertical,  $\langle w \rangle$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales a)  $x=-20\text{cm}$  ( $\frac{x}{L} = -0.67$ ); b)  $x=0.0\text{cm}$ , ( $\frac{x}{L} = 0.0$ ); c)  $x=40\text{cm}$ , ( $\frac{x}{L} = 1.33$ ); d)  $x=60\text{cm}$ , ( $\frac{x}{L} = 2.0$ ); e)  $x=100\text{cm}$ , ( $\frac{x}{L} = 3.33$ ). Estribo con protección. Ensayos EVIII-EIX

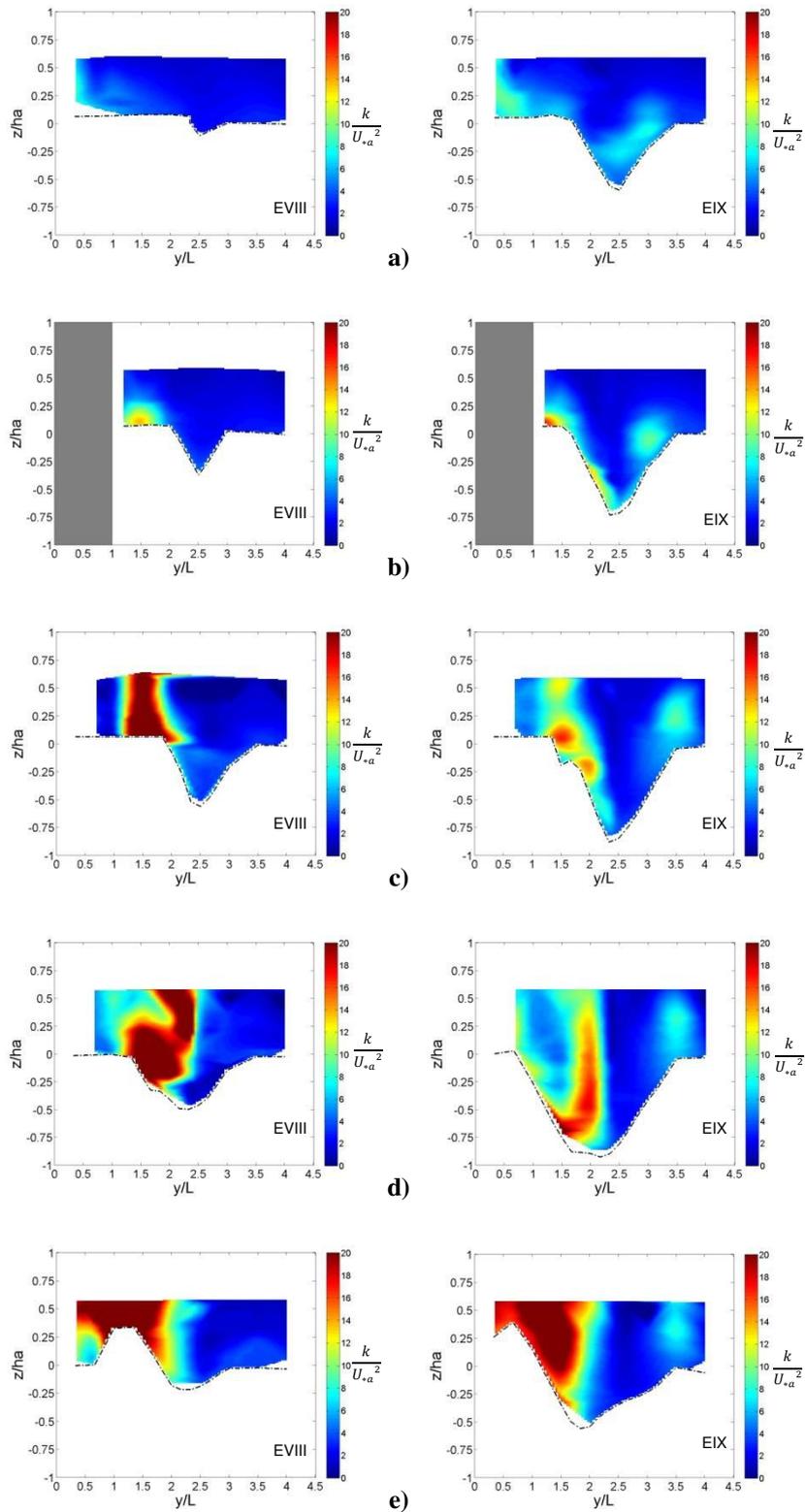
#### VI.3.2.4 Energía asociada a las fluctuaciones de velocidad, $k$

La existencia de regiones del flujo con valores significativos de energía asociada a las fluctuaciones de velocidad y la evolución que las mismas tienen acorde al desarrollo de las erosiones en torno al estribo protegido se pueden analizar a partir de las figuras VI.52 y VI.53, en las que se han representado las distribuciones transversales de  $\frac{k}{U_{*a}^2}$  en diferentes secciones. La figura VI.52 se construyó sobre la base de los resultados de evaluar la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad,  $k$ , en los puntos medidos durante los ensayos EVI y EVII, mientras que la figura VI.53 corresponde a los ensayos EVIII y EIX. La pertinencia de lograr representaciones que resulten contrastables entre las diferentes secciones transversales y diferentes estados del proceso de erosión justifican la adopción de una única escala de representación de  $\frac{k}{U_{*a}^2}$  en todos los casos contemplados en las figuras VI.52 y VI.53, la cual es la misma que la utilizada al momento de analizar el comportamiento de este parámetro para el caso de estribo sin protección (Fig. VI.24).

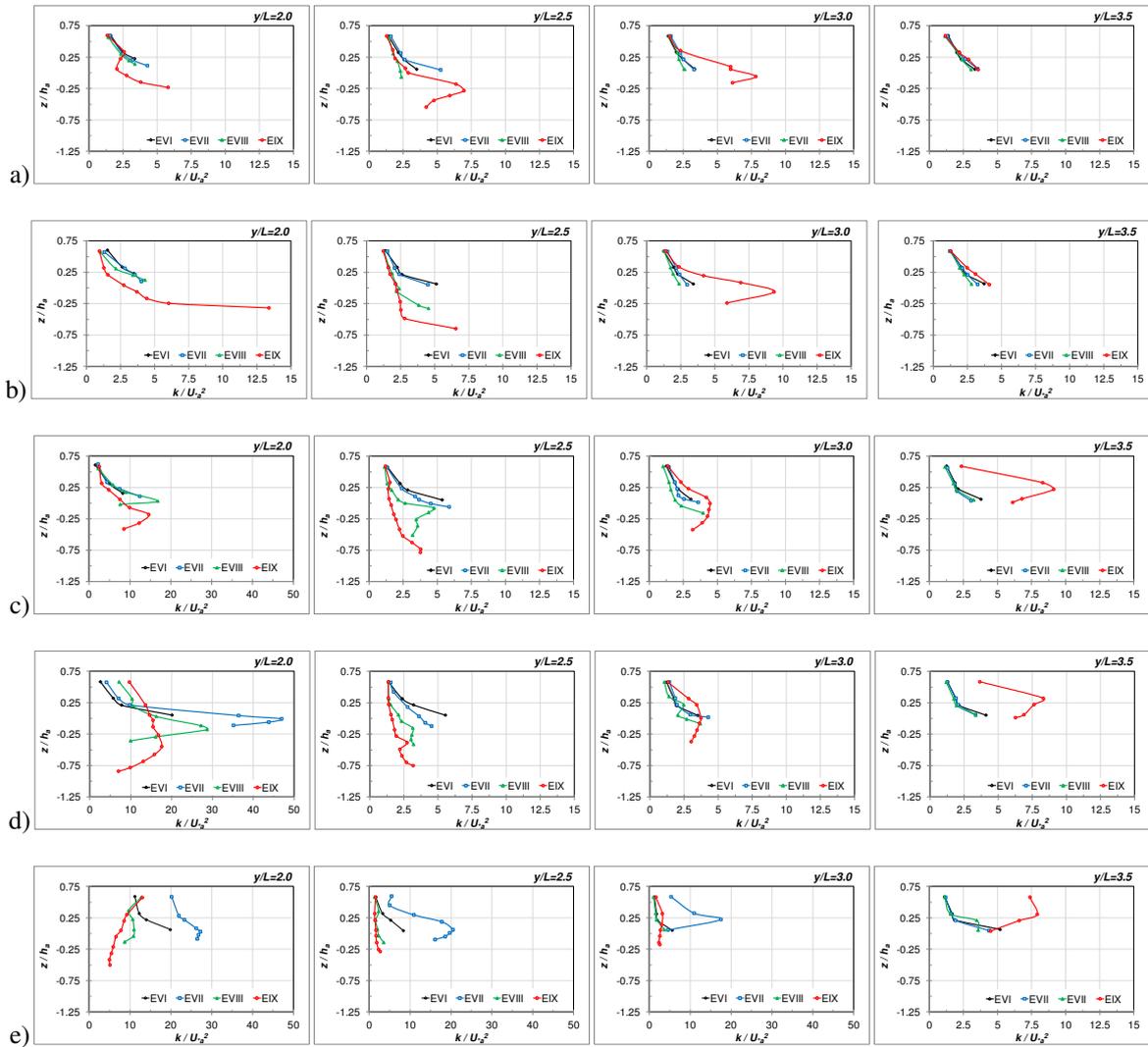
Es necesario realizar algunas consideraciones respecto del máximo valor adoptado, el cual define la escala de colores que aparece al costado de cada sección, ya que dicho valor máximo de  $\frac{k}{U_{*a}^2} = 20$  resulta superado en algunas situaciones. La gran variación encontrada en  $k$ , cuya magnitud depende de la zona del escurrimiento particular de que se trate y la instancia del proceso erosivo que se contemple indica que, de haberse considerado un límite mayor a las escalas referidas, determinados comportamientos detectados en ciertas regiones pasarían inadvertidos. Por ello, en forma complementaria, se incorpora la figura VI.54, en la que se ha representado la evolución de los perfiles de distribución de  $\frac{k}{U_{*a}^2}$  en las verticales de medición de velocidades posicionadas en correspondencia con el sector erosionado, pertenecientes a las mismas secciones transversales que las contempladas en las figuras VI.52 y VI.53, esto es las a, b, c, d, e (Fig. VI.14). A partir de la información mencionada surgen ciertos aspectos distintivos:



**Figura VI.52.-** Evolución de la distribución de la energía de las fluctuaciones de velocidad adimensional,  $\frac{k}{U_* a^2}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales a)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; b)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; c)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; d)  $\frac{x}{L} = 2.0$ ; e)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . Estribo con protección. EVI-EVII



**Figura VI.53.-** Evolución de la distribución de energía de las fluctuaciones de velocidad adimensional,  $\frac{k}{U_a^2}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales a)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; b)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; c)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; d)  $\frac{x}{L} = 2.0$ ; e)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . Estribo con protección. EVIII-EIX



**Figura VI.54.-** Evolución de perfiles de energía asociada a las fluctuaciones de velocidad adimensional,  $\frac{k}{U_*a^2}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales a)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; b)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; c)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; d)  $\frac{x}{L} = 2.0$ ;  $\frac{x}{L} = 3.33$ . En todas las secciones se consideraron perfiles de progresivas transversales  $\frac{y}{L} = 2.0$ ;  $\frac{y}{L} = 2.5$ ;  $\frac{y}{L} = 3.0$  y  $\frac{y}{L} = 3.5$ . Estribo con protección. Ensayos EVI-EVII-EVIII-EIX

- ✓ Los patrones de distribución de energía  $k$  encontrados al inicio del proceso de erosión (EVI) coinciden con los observados para igual condición correspondiente al caso de estribo sin protección (EIV) (Fig. VI.24).
- ✓ La zona del flujo localizada en el encuentro entre la cara aguas arriba del estribo y la pared de margen izquierda para la cual los valores de  $\frac{k}{U_*a^2}$  en la situación inicial (EVI) resultan algo superiores a los encontrados en el resto de la sección se mantiene sin

cambios durante los restantes estados representados (Fig. VI.52.a y Fig.VI.53.a), ya que este sector de la sección no se ve afectado por erosiones debido a la presencia de la protección del lecho. Esta misma observación puede realizarse para el núcleo de elevados valores de  $k$  localizado junto al extremo del estribo, sector también revestido por la protección (Fig. VI.52.b y Fig.VI.53.b).

- ✓ Los mapas de contornos de  $\frac{k}{U_{*a}^2}$  que se exponen en las figuras VI.52 c, d, e, correspondientes a las secciones transversales ubicadas aguas abajo del sitio de emplazamiento del estribo, muestran para las condiciones del ensayo EVI, la zona de flujo en la que la energía resulta sustancialmente superior a la existente en el resto de la sección, asociada con la presencia de la capa de corte desprendida desde el estribo. Esta región escurre sobre la protección del lecho hasta la progresiva longitudinal  $\frac{x}{L} = 1.53$ . A partir de allí, en coincidencia con su localización, tiene lugar el inicio de las profundizaciones del lecho (Fig. VI.52.d ).
- ✓ Un aspecto particular observado es el aumento localizado de la energía  $k$  en el sector ocupado por la hoya de erosión incipiente, ni bien iniciado el proceso erosivo (Fig. VI.52.d (EVII)). El grado de incremento experimentado por la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad se puede ver claramente en la figura VI.54.d ( $\frac{y}{L} = 2.0$ ), la que demuestra los mayores valores  $\frac{k}{U_{*a}^2}$  para las condiciones experimentales del EVII (el máximo valor de  $\frac{k}{U_{*a}^2}$  pasó de 20 en el EVI a 47 en el EVII). Esta información coincide con la presentada en la figura VI.5, derivada de las mediciones de velocidades continuas en el tiempo, realizadas en el punto CP1. En la figura citada se demostraba la existencia de un valor pico de energía alcanzado en los primeros momentos del proceso erosivo en dicha localización, el cual disminuyó con el transcurso del tiempo. Este núcleo de elevada energía está posiblemente asociado con la discontinuidad en el sentido longitudinal que se genera en las profundidades del lecho producto de la presencia de la protección, la cual durante las primeras instancias del proceso erosivo mantiene sus niveles originales, mientras que aguas abajo se producen descensos del lecho producto de las erosiones. Para ilustrar esta situación se presenta la figura VI.55, en la cual se muestra la evolución del comportamiento encontrado para  $\frac{k}{U_{*a}^2}$  en el perfil longitudinal correspondiente a la progresiva lateral  $\frac{y}{L} = 2.0$  . En dicha figura el máximo

de la escala de colores se ha aumentado respecto del considerado para las figuras VI.52 y VI.53, con el objeto de poder apreciar la tendencia de  $k$  con el desarrollo del proceso erosivo. De este modo es posible observar a partir de los resultados derivados del ensayo EVII (Fig. VI.55.ii) (tiempo de evolución  $t=100$  minutos) cuánto más elevados son los valores de la energía en el sector comprometido con los descensos del lecho, respecto de los encontrados para el resto del área representada, valores que se van atenuando con el progreso de las erosiones (Fig. VI.55.iii y fig.VI.55.iv).

- ✓ La evolución de la región del flujo identificada con elevados valores de energía y asociada con la presencia de la capa de corte que se muestra en la figuras VI.52 y VI.53 insinúa un desplazamiento de la ubicación de esta zona hacia la parte central del canal con el progreso de las erosiones, (Fig. VI.52.d y VI.53.d). Este hecho podría explicar el incremento observado de  $\frac{k}{U_{*a}^2}$  por encima del nivel del lecho original en el perfil correspondiente a  $\frac{y}{L} = 2.0$  de la figura VI.54.d.

A partir de la progresiva longitudinal  $\frac{x}{L} = 3.33$  este núcleo de elevada energía tiende a replegarse hacia la margen izquierda, tal como se observa en la figura VI.56 en la que se muestran las distribuciones iniciales (EVI) y finales (EIX) de  $\frac{k}{U_{*a}^2}$  en la sección extrema aguas abajo del tramo de medición contemplado en este estudio ( $\frac{x}{L} = 5.33$ ), representada por la sección f de figura VI.14.

Con respecto al máximo valor observado de  $k$  encontrado en esta zona las figuras VI.52 y VI.53 sugieren una atenuación del mismo con el desarrollo de las erosiones.

La figura VI.53.e (EIX) muestra un núcleo en el flujo con valores significativos de energía localizado sobre el talud interior de la hoya de erosión, afectando a la totalidad del tirante medido, marcando un comportamiento algo diferente a lo observado en las secciones ubicadas más aguas arriba (Fig. VI.53.d) para este sector de la sección.

El análisis conjunto del comportamiento de  $k$  con el de las componentes verticales y transversales de las velocidades en las secciones transversales extremas consideradas señala una clara correspondencia entre el incremento de  $\frac{k}{U_{*a}^2}$  observado y las magnitudes de  $\langle v \rangle$  y  $\langle w \rangle$  medidas. Las figuras VI.57, VI.58 y VI.59 demuestran cómo, para las condiciones experimentales del ensayo EIX, una vez que el flujo se ve obligado a “abandonar” la hoya de erosión impone al escurrimiento sobre el talud interior de la

hoya componentes verticales y transversales que aumentan su magnitud, en la medida que consideramos secciones más aguas abajo, lo cual se traduce en mayores niveles de energía en ese sector de la sección.

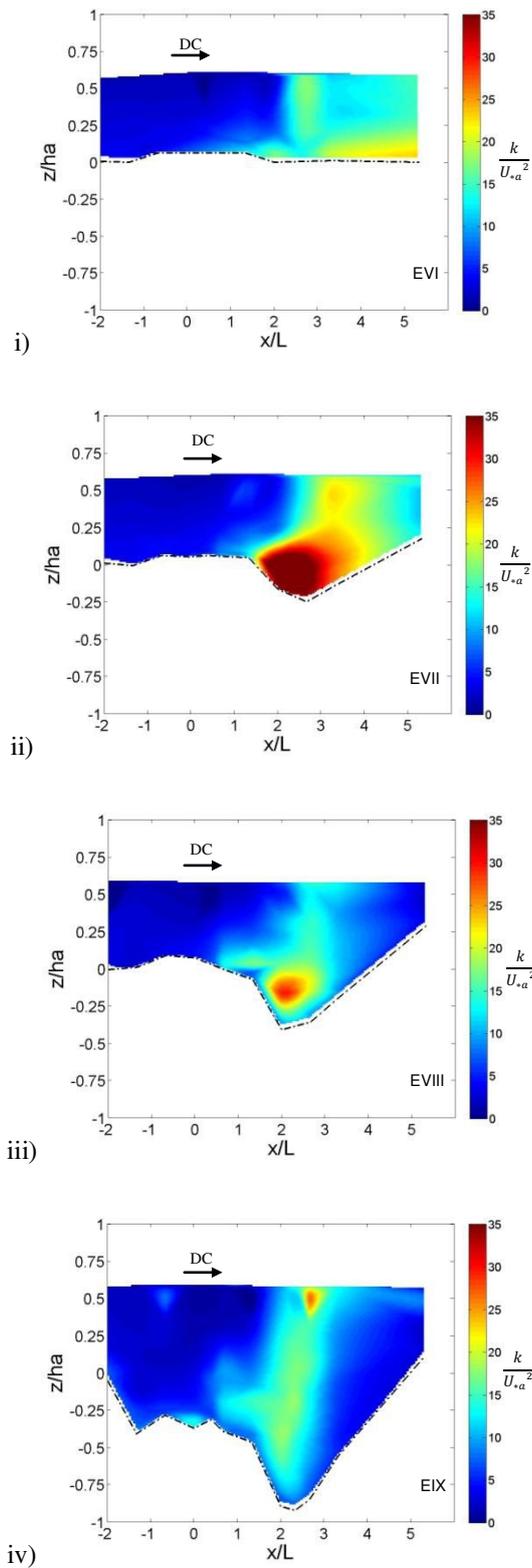
Es decir que en estas secciones los valores de energía encontrados responden tanto a la presencia de la capa de corte desprendida desde el estribo como a la configuración particular del flujo condicionada por la morfología en el extremo final de la hoya de erosión.

- ✓ Se observa en la (Fig. VI.53) un incremento de  $\frac{k}{U_{*a}^2}$ , para la condición de máxima erosión representada (EIX), **en aquellos sitios en los que se identificaron flujos helicoidales** (Fig. VI.51). No obstante ello los niveles de energía correspondientes fueron menos significativos que los analizados en los ítems anteriores (Estribo sin protección).

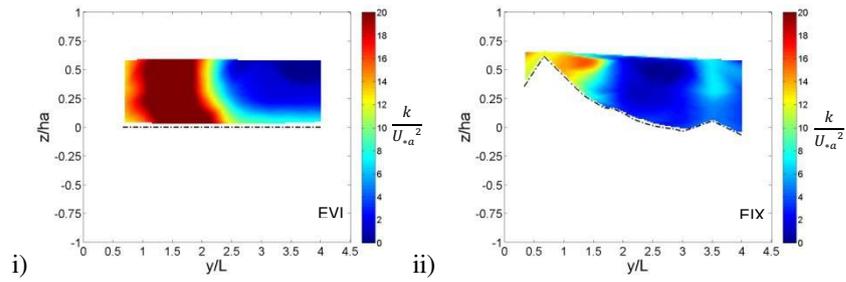
En las secciones transversales a y b los máximos valores de energía en correspondencia con corrientes helicoidales se observaron dentro de la hoya de erosión ( $\frac{k}{U_{*a}^2} \approx 9$ ). Esta situación queda reflejada en las distribuciones en la vertical que se muestran en los perfiles de la figura VI.54.a ( $\frac{y}{L} = 2.5$ ;  $\frac{y}{L} = 3.0$ ) y de la figura VI.54.b ( $\frac{y}{L} = 3.0$ ). En las secciones transversales c, d, e el incremento de energía observado y atribuido a este efecto se puede encontrar sobre el talud exterior y en las proximidades del borde de la hoya de erosión. Los perfiles correspondientes a la progresiva  $\frac{y}{L} = 3.5$  de las figuras VI.54.c, VI.54.d y VI.54.e demuestran como los niveles de energía aumentan respecto de los encontrados en las etapas anteriores del proceso erosivo, alcanzando valores máximos de  $\frac{k}{U_{*a}^2} \approx 9$ . Resulta de interés destacar que la forma de la distribución vertical de  $\frac{k}{U_{*a}^2}$  que lucen estos perfiles referidos es semejante a la observada en los perfiles sujetos a una situación equivalente, para el caso de estribo sin protección (Fig.VI.25), pero con valores máximos de energía  $k$  sustancialmente inferiores.

A partir del análisis conjunto de las figuras VI.36, VI.51 y VI.53 se plantea, también en este contexto, la correspondencia encontrada entre la presencia de las corrientes helicoidales, el déficit de velocidad en la dirección longitudinal, la presencia de velocidades verticales significativas y el incremento en los niveles de energía asociada a las fluctuaciones de velocidad.

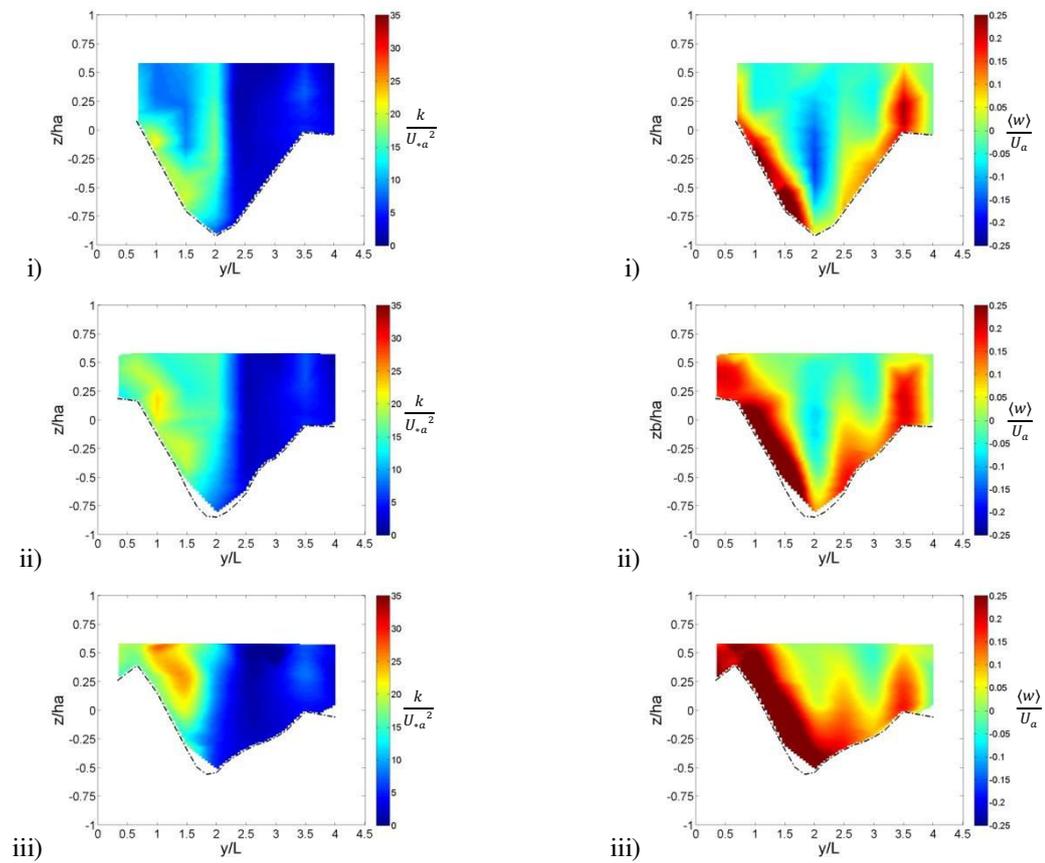
- ✓ En el sector en el cual se producen las mayores profundizaciones junto al borde lateral de la protección ( $\frac{y}{L} = 2.5$ ) se observa una disminución progresiva de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad en toda la vertical con el progreso de las erosiones, (Fig. VI.54.c y VI.54.d).
- ✓ En la porción del flujo que escurre al costado de la hoya de erosión, esto es para progresivas  $\frac{y}{L} \geq 4$ , no se aprecian variaciones significativas en los valores de  $\frac{k}{U_{*a}^2}$  entre las cuatro condiciones ensayadas (Fig. VI.52 y VI.53), lo cual difiere con lo visto para la componente longitudinal de la velocidad, la que disminuyó en toda la vertical acorde se desarrollan las erosiones, tal como se muestra en la figura VI.40.



**Figura VI.55.-** Evolución de la distribución de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad,  $\frac{k}{U_a^2}$ , en el perfil longitudinal correspondiente a  $\frac{y}{L} = 2.0$ . Ensayos i) EVI; ii) EVII; iii) EVIII; iv) EIX

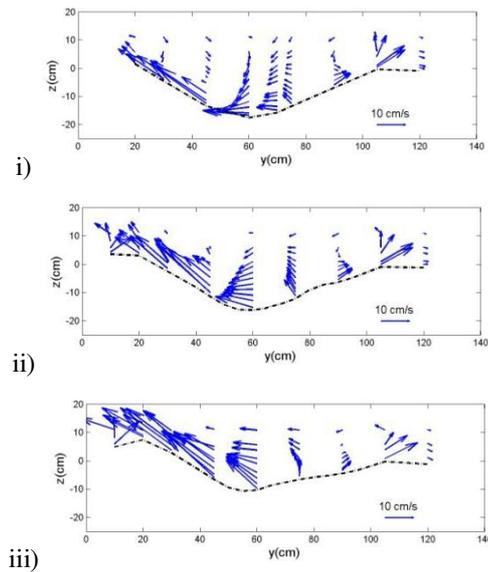


**Figura VI.56.-** Distribución de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad,  $\frac{k}{U_{*a}^2}$ , en la sección transversal correspondiente a  $\frac{x}{L} = 5.33$ . Ensayos i) EVI; ii) EIX



**Figura VI.57.-** Distribución de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad,  $\frac{k}{U_{*a}^2}$ , i)  $\frac{x}{L} = 2.33$ ; ii)  $\frac{x}{L} = 2.67$ ; iii)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . EIX

**Figura VI.58.-** Distribución transversal de la componente vertical de velocidad adimensional,  $\frac{\langle w \rangle}{U_a}$ , i)  $\frac{x}{L} = 2.33$ ; ii)  $\frac{x}{L} = 2.67$ ; iii)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . EIX



**Figura VI.59.-** Vectores de velocidades en el plano  $yz$ ,  $v_{yz}$ . Secciones transversales i)  $x=70\text{cm}$  ( $\frac{x}{L} = 2.33$ ); ii)  $x=80\text{cm}$  ( $\frac{x}{L} = 2.67$ ); iii)  $x=100\text{cm}$ , ( $\frac{x}{L} = 3.33$ ). EIX

### VI.3.2.5 Tensiones de Reynolds

#### VI.3.2.5.a Tensiones de Reynolds: Componente $-\rho u'w'$

La interrelación que existe entre las tensiones de Reynolds  $-\rho\langle u'w' \rangle$  y el proceso de erosión en torno al estribo protegido se puede analizar a partir de las figuras VI.60 (ensayos EVI y EVII) y VI.61 (ensayos EVIII y EIX), en las que se han representado la evolución de  $\frac{-\langle u'w' \rangle}{U_{*a}^2}$  en las secciones transversales “a”, “b”, “c”, “d”, “e” de figura VI.14.

Surgen en consecuencia las siguientes consideraciones:

- ✓ Los resultados obtenidos a partir de las mediciones de velocidad representativas de las condiciones del flujo existentes al inicio del proceso erosivo (EVI) reproducen los mismos patrones de distribución de  $\frac{-\langle u'w' \rangle}{U_{*a}^2}$  que los vistos en el ensayo EIV (Fig.VI.28). En este caso el núcleo de tensiones positivas que se encuentra en las proximidades del lecho actúa sobre la protección hasta su límite en la progresiva longitudinal  $\frac{x}{L} = 1.53$ . Una vez superada la misma, su acción se transfiere sobre el lecho erosionable, correspondiendo su ubicación con el sector en donde comienzan las profundizaciones

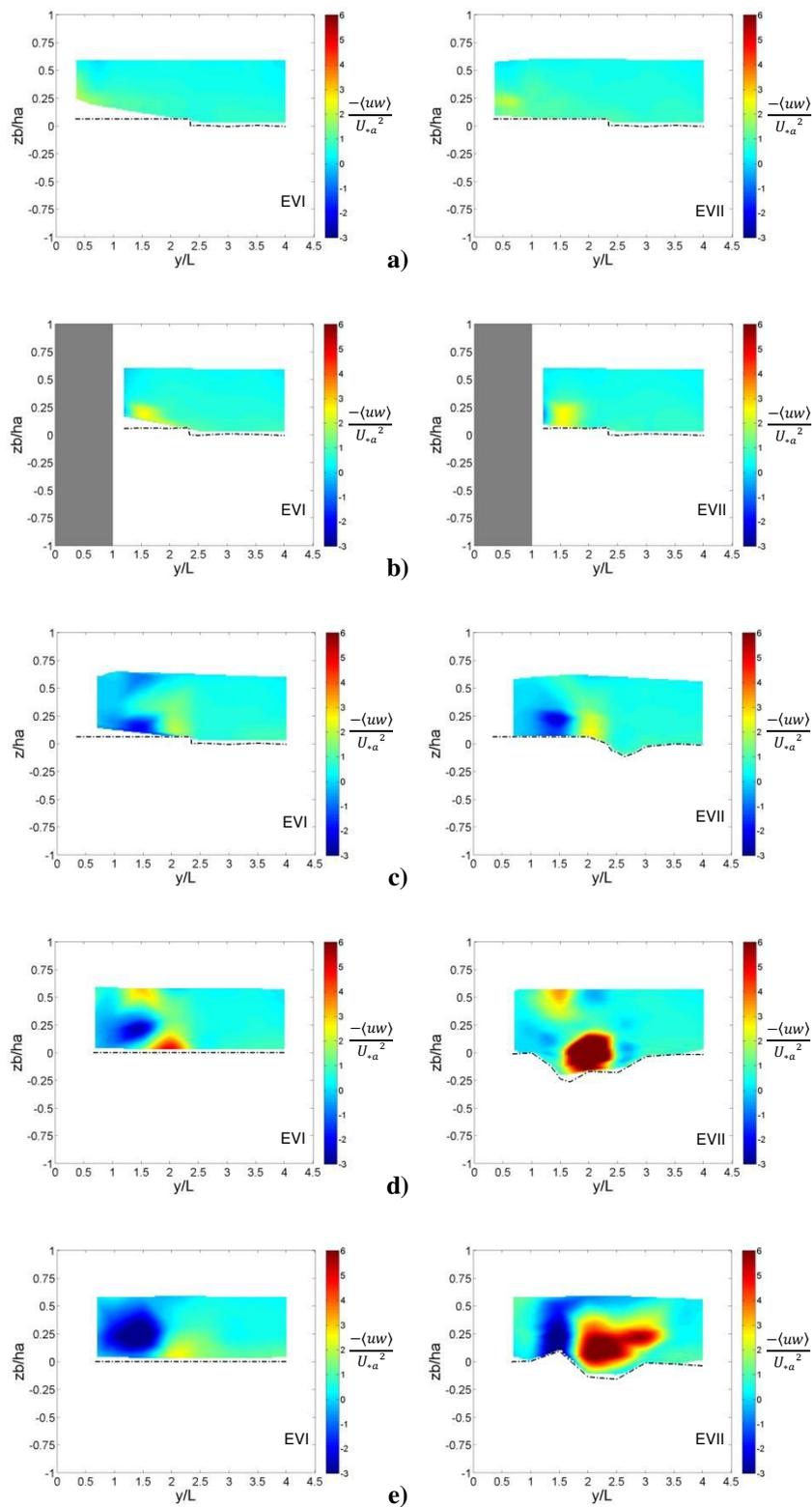
del lecho (Fig. VI.60.d). En la sección “d” ( $\frac{x}{L} = 2.0$ ) las tensiones adimensionales máximas evaluadas en la condición inicial fueron  $\frac{-\langle u'w' \rangle}{U_{*a}^2} \approx 5$  (Fig. VI.62.d ( $\frac{y}{L} = 2.0$ )), valor comparable con los máximos encontrados en la situación inicial (EIV) en torno al estribo sin protección (Fig. VI.30).

✓ En las primeras etapas del desarrollo de las erosiones (EVII) el núcleo de tensiones positivas aumenta sus dimensiones tanto en la dirección transversal como longitudinal hacia aguas abajo; los valores máximos en esta situación se incrementaron notablemente, hallando  $\left[ \frac{-\langle u'w' \rangle}{U_{*a}^2} \right]_{MAX} \approx 17.5$  (Fig. VI.62.d ( $\frac{y}{L} = 2.0$ ) y Fig. VI.63). Este comportamiento, posiblemente generado por la discontinuidad vertical introducida por la presencia de la protección se representa en la figura VI.63, en la que se puede ver la evolución de la distribución de  $\frac{-\langle u'w' \rangle}{U_{*a}^2}$  acorde se dan variaciones en los niveles del lecho en el perfil longitudinal  $\frac{y}{L} = 2.0$ . Tanto en la figura VI.63 como en las figuras VI.61.d y VI.61.e se observa la disminución de  $\frac{-\langle u'w' \rangle}{U_{*a}^2}$  con el incremento del sector erosionado luego del EVII.

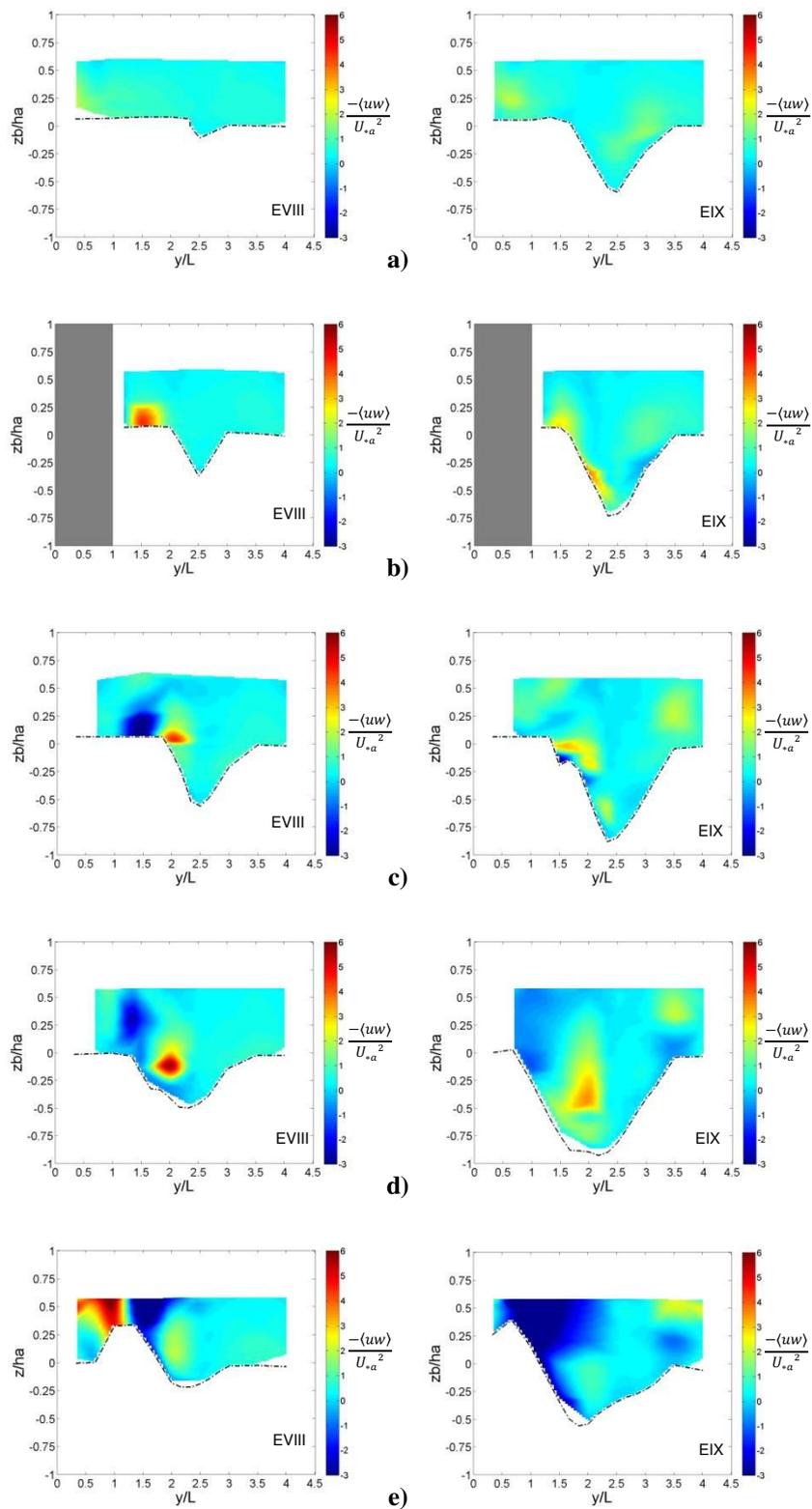
✓ En la situación de mayor erosión representada, (EIX), se observa un incremento, respecto de los estados anteriores, en la magnitud de las tensiones adimensionales en correspondencia con sitios en los que se desenvuelven corrientes helicoidales (Fig. VI.51). Los valores máximos encontrados en relación con ello son muy inferiores a los que se muestran en la figura VI.28, para estructuras del flujo semejantes, pero asociadas con la hoya de erosión junto al estribo sin protección. Los perfiles de distribución de  $\frac{-\langle u'w' \rangle}{U_{*a}^2}$  en las verticales dispuestas en  $\frac{y}{L} = 3.0$  que se muestran en las figuras VI.62.a y VI.62.b son un ejemplo de ello, en donde se hallaron valores de  $\left[ \frac{-\langle u'w' \rangle}{U_{*a}^2} \right]_{MAX} \approx 1.6$ .

En la figura VI.62.c ( $\frac{y}{L} = 3.5$ ) se puede ver el incremento de las tensiones  $-\rho\langle u'w' \rangle$  para las condiciones del ensayo EIX debido a la corriente helicoidal detectada en el borde de la hoya de erosión, con  $\left[ \frac{-\langle u'w' \rangle}{U_{*a}^2} \right]_{MAX} \approx 2.0$ . Este valor máximo también se encontró en las secciones “d” y “e” ( $\frac{y}{L} = 3.5$ ), solo que en las proximidades del fondo las tensiones adimensionales resultaron con magnitudes semejantes, pero con signo negativo (Fig. VI.62.d y VI.62.e).

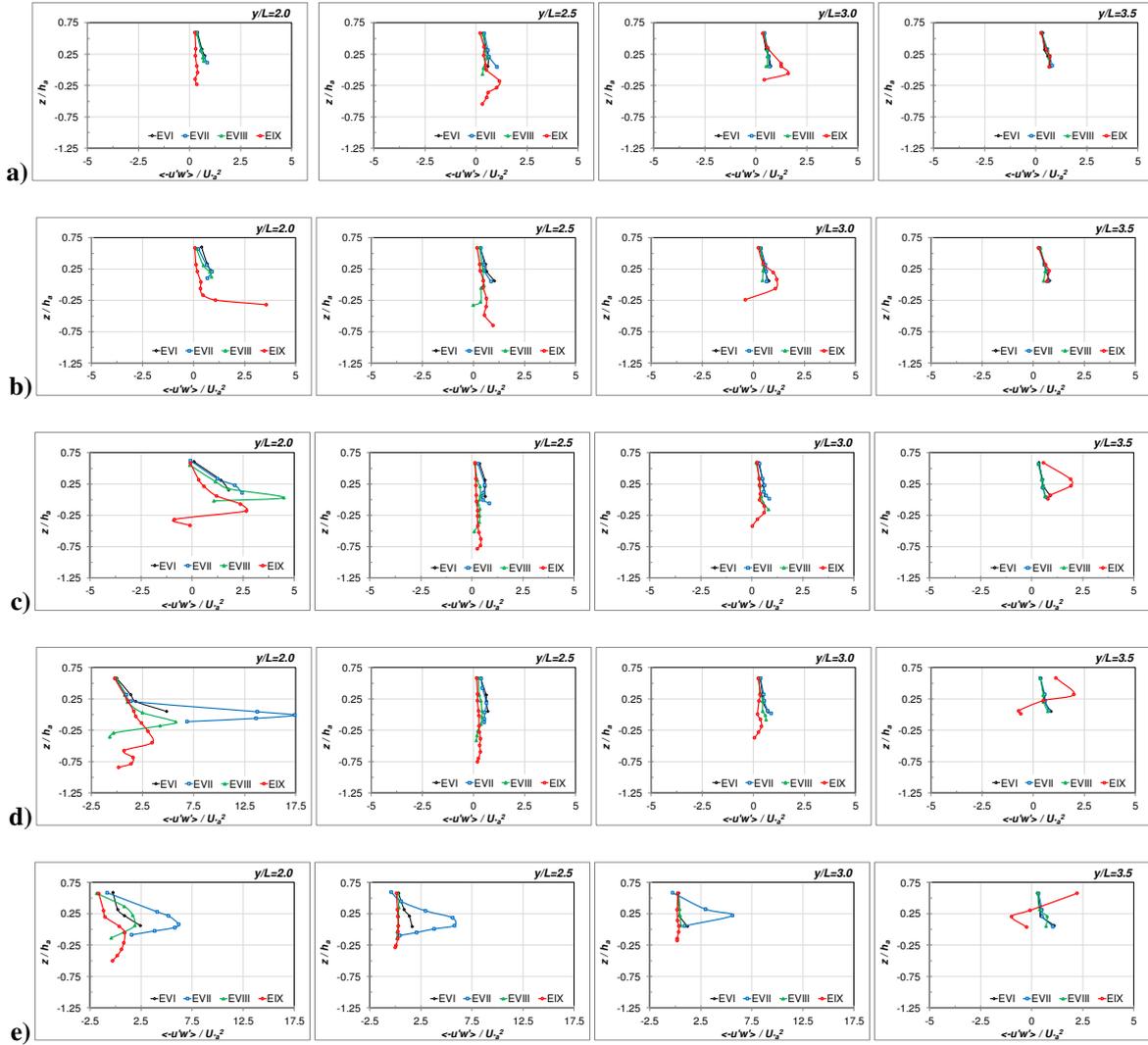
- ✓ No se advierte una tendencia de evolución clara del núcleo de tensiones negativas observado en la situación inicial, el cual se vincula con la zona de desprendimiento del flujo desde el estribo. Las figuras VI.60.c; VI.60.d VI.61.c; VI.61.d sugieren una disminución progresiva de las magnitudes de tales tensiones con el progreso de las erosiones. Sin embargo, los resultados provenientes del EIX que describen el comportamiento de estas tensiones en la sección “e” señalan la existencia de magnitudes importantes sobre el talud interior de la hoya de erosión, posiblemente asociados con la configuración del escurrimiento en este sector, marcada por la presencia de importantes componentes verticales y transversales de velocidad (Fig. VI.43.e y Fig. VI.59.iii).
- ✓ En el sector en el cual se producen las mayores profundizaciones junto al borde lateral de la protección ( $\frac{y}{L} = 2.5$ ) se observa una disminución progresiva de las tensiones adimensionales  $\frac{-\langle u'w' \rangle}{U_{*a}^2}$  en toda la vertical con el progreso de las erosiones, (Fig. VI.62.c y VI.62.d).
- ✓ En la porción del flujo que escurre al costado de la hoya de erosión, esto es para progresivas  $\frac{y}{L} \geq 4$ , no se aprecian variaciones significativas en las magnitudes de  $\frac{-\langle u'w' \rangle}{U_{*a}^2}$  entre las cuatro condiciones ensayadas, lo cual difiere con lo visto para la componente longitudinal de la velocidad, la cual disminuyó en toda la vertical acorde se desarrollan las erosiones, tal como se muestra en la figura VI.41.



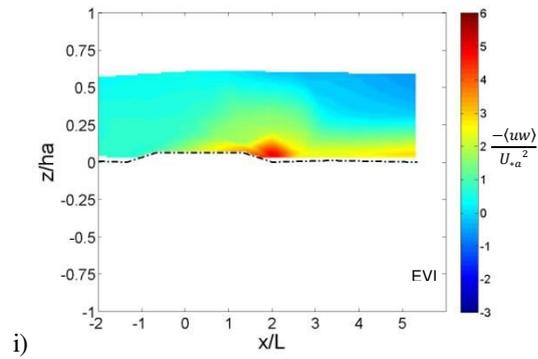
**Figura VI.60.-** Evolución de la distribución de las tensiones de Reynolds adimensionales,  $\frac{-\langle uw \rangle}{U_{*a}^2}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales longitudinales a)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; b)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; c)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; d)  $\frac{x}{L} = 2.0$ ; e)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . Estribo con protección. EVI-EVII



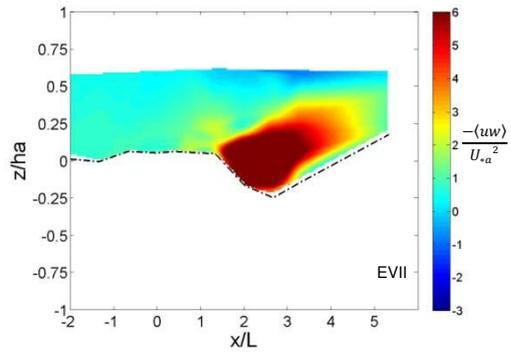
**Figura VI.61.-** Evolución de la distribución de las tensiones de Reynolds adimensionales,  $\frac{-\langle uw \rangle}{U_{*a}^2}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales longitudinales a)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; b)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; c)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; d)  $\frac{x}{L} = 2.0$ ; e)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . Estribo con protección. EVIII-EIX



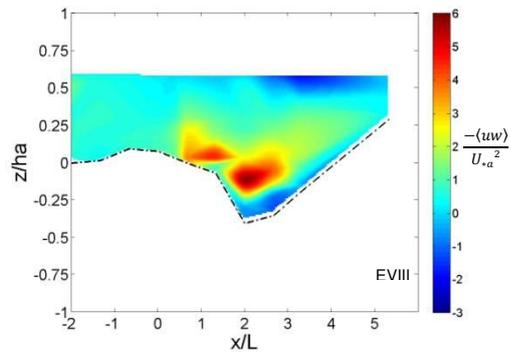
**Figura VI.62.-** Evolución de perfiles de tensiones de Reynolds adimensionales,  $\frac{-(u'w')}{U_*a^2}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales a)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; b)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; c)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; d)  $\frac{x}{L} = 2.0$ ;  $\frac{x}{L} = 3.33$ . En todas las secciones se consideraron perfiles de progresivas transversales  $\frac{y}{L} = 2.0$ ;  $\frac{y}{L} = 2.5$ ;  $\frac{y}{L} = 3.0$  y  $\frac{y}{L} = 3.5$ . Estribo con protección. Ensayos EVI-EVII-EVIII-EIX



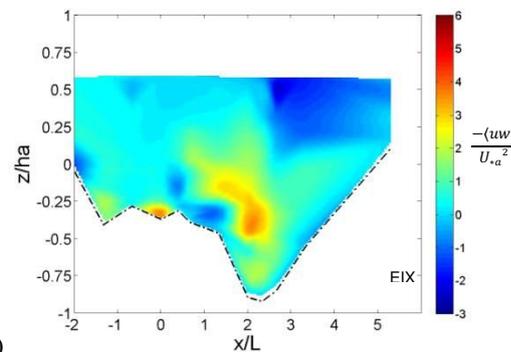
i)



ii)



iii)



iv)

**Figura VI.63.-** Evolución de la distribución de las tensiones,  $\frac{-(uw)}{U_{*a}^2}$ , en el perfil longitudinal correspondiente a  $\frac{y}{L} = 2.0$ . Ensayos i) EVI; ii) EVII; iii) EVIII; iv) EIX

VI.3.2.5.b Tensiones de Reynolds: Componente  $-\rho\langle u'v' \rangle$

La evolución del comportamiento de las tensiones adimensionales  $\frac{-\langle uv \rangle}{U_{*a}^2}$  con el desarrollo de las erosiones en torno al estribo protegido se presenta para las secciones “a”, “b”, “c”, “d”, “e” (Fig. VI.14) en las figuras VI. 64 (EVI y EVII), VI.65 (EVIII y EIX), VI.66, de las cuales se destacan los siguientes aspectos:

- ✓ La distribución inicial de tensiones  $\frac{-\langle uv \rangle}{U_{*a}^2}$ , (EVI), concuerda con la observada para la situación de estribo sin protección.

Se destaca, para esta situación, que el sector en donde se inician las profundizaciones del lecho, se ve sometido a una región caracterizada por tener elevadas tensiones positivas junto a otra con magnitudes relativamente altas, pero de signo negativo (Fig. VI.64.d).

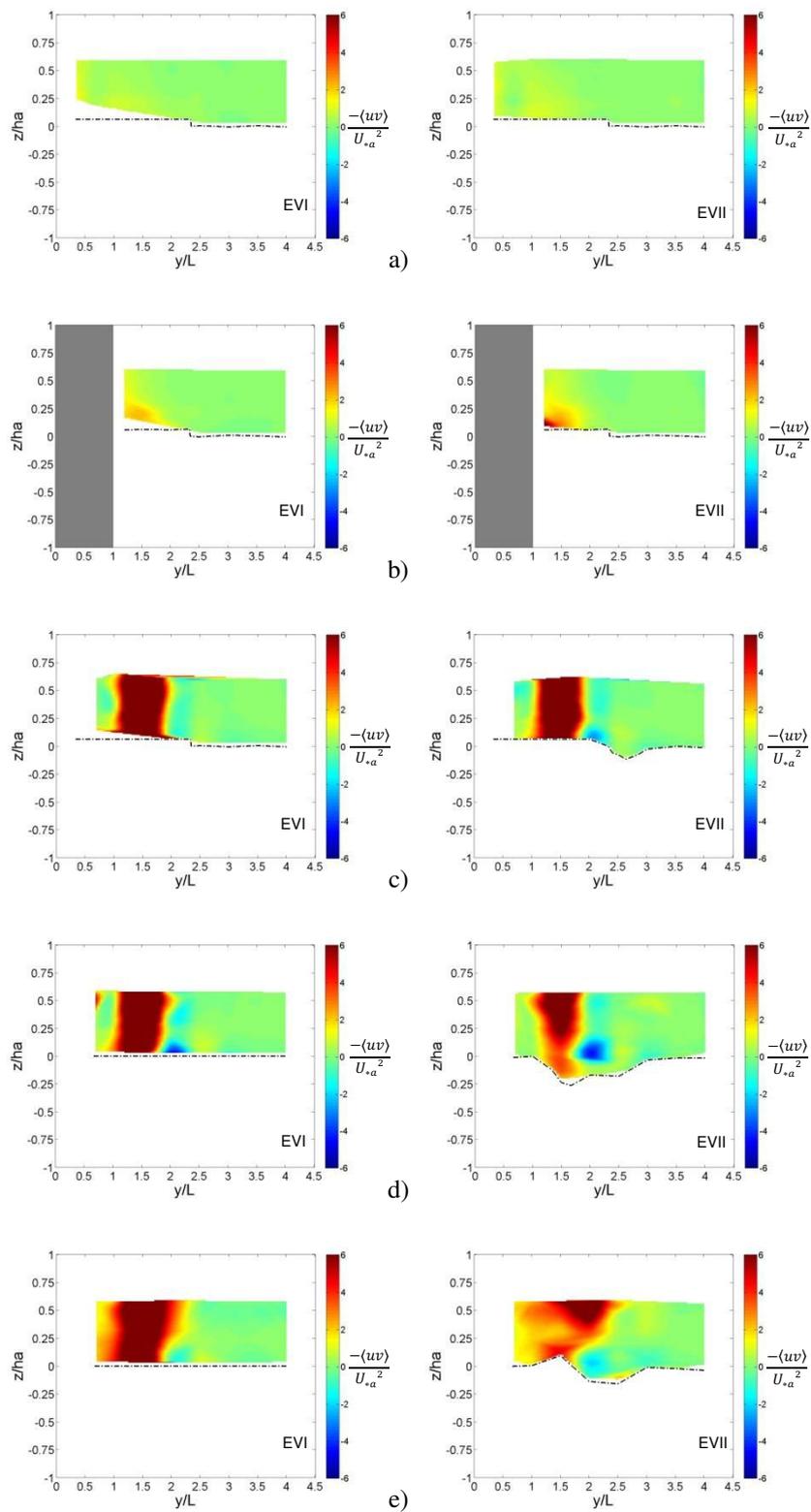
- ✓ El núcleo de tensiones positivas se desplaza en dirección hacia el centro del canal con las profundizaciones del sector erosionado, resultando valores máximos de  $\frac{-\langle uv \rangle}{U_{*a}^2}$  menores, al menos para las verticales seleccionadas para realizar las mediciones. El perfil localizado en la progresiva lateral  $\frac{y}{L} = 2$  en la figura VI.66.d demuestra como las tensiones  $-\rho\langle u'v' \rangle$  pasan de ser negativas en el momento inicial a tener magnitudes relativamente elevadas  $\left(\left[\frac{-\langle u'w' \rangle}{U_{*a}^2}\right]_{MAX} \approx 5.75\right)$  pero con signo positivo, para la condición de máxima erosión representada (EIX).

- ✓ Al igual que lo visto para la situación de estribo sin protección, para las condiciones del EIX se observan núcleos caracterizados por tensiones  $-\rho\langle u'v' \rangle$  positivas próximos a núcleos con tensiones negativas, en aquellas regiones en las que se identificó la presencia de corrientes helicoidales. Esta situación se corresponde con la forma que presentan los perfiles que se muestran en la figura VI.66, en los que se alternan valores de  $\frac{-\langle uv \rangle}{U_{*a}^2}$  (+) y (-) (Fig. VI.66.a  $\left(\frac{y}{L} = 2.5\right)$ ; Fig. VI.66.b  $\left(\frac{y}{L} = 3.0\right)$ ). Las magnitudes de tensiones máximas en estas zonas fueron menores a las encontradas para EV  $\left(\left[\frac{-\langle u'w' \rangle}{U_{*a}^2}\right]_{MAX} \approx 1.1\right)$ .

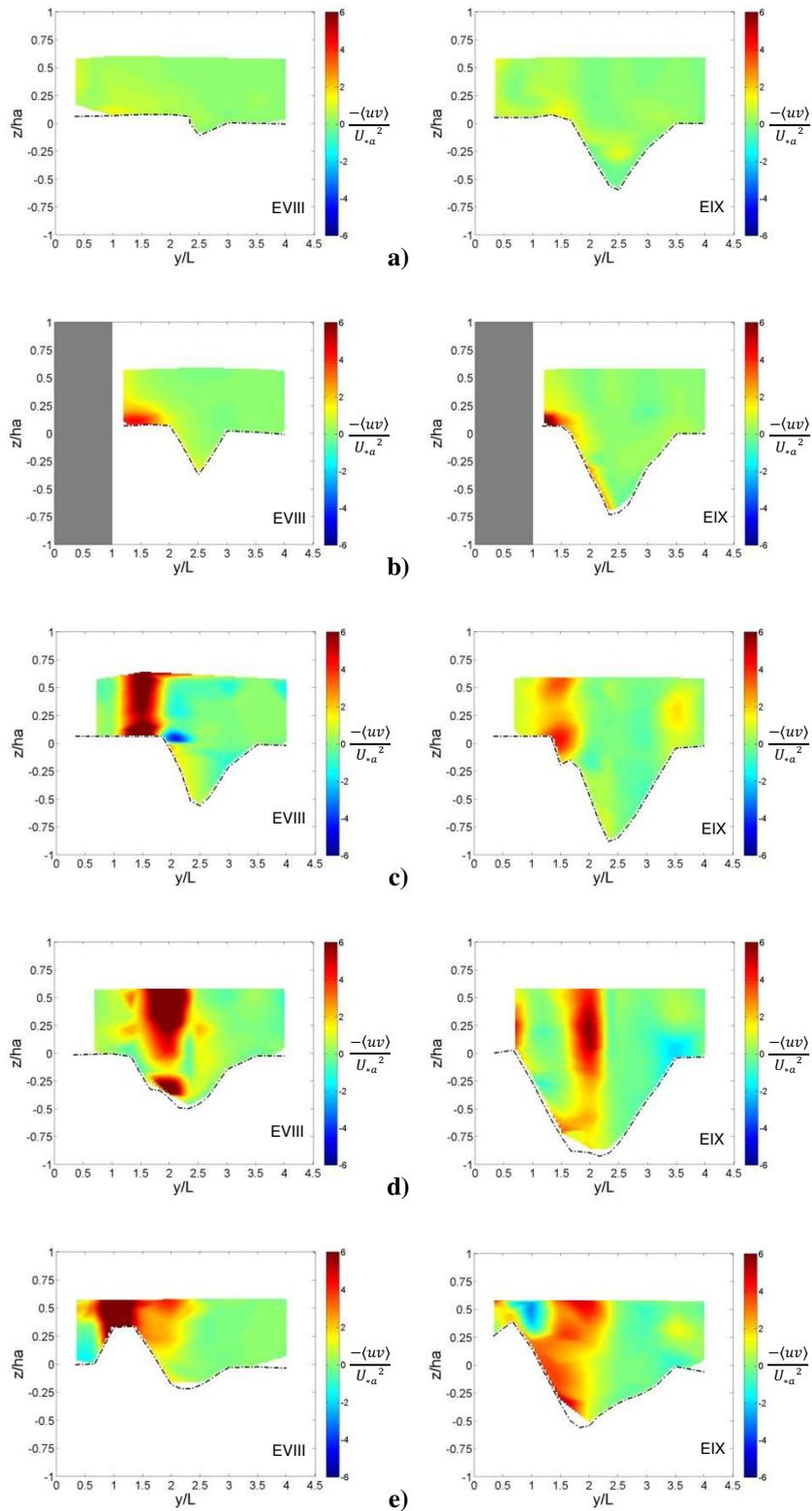
Los perfiles correspondientes al EIX en la progresiva  $\frac{y}{L} = 3.5$  de las figuras VI.66.d y VI.66.e, en coincidencia con la corriente helicoidal localizada próxima al borde exterior

de la hoya de erosión, muestran que  $\frac{-\langle uvv' \rangle}{U_{*a}^2}$  resultó positivo en la parte superior del tirante y negativo en la parte inferior.

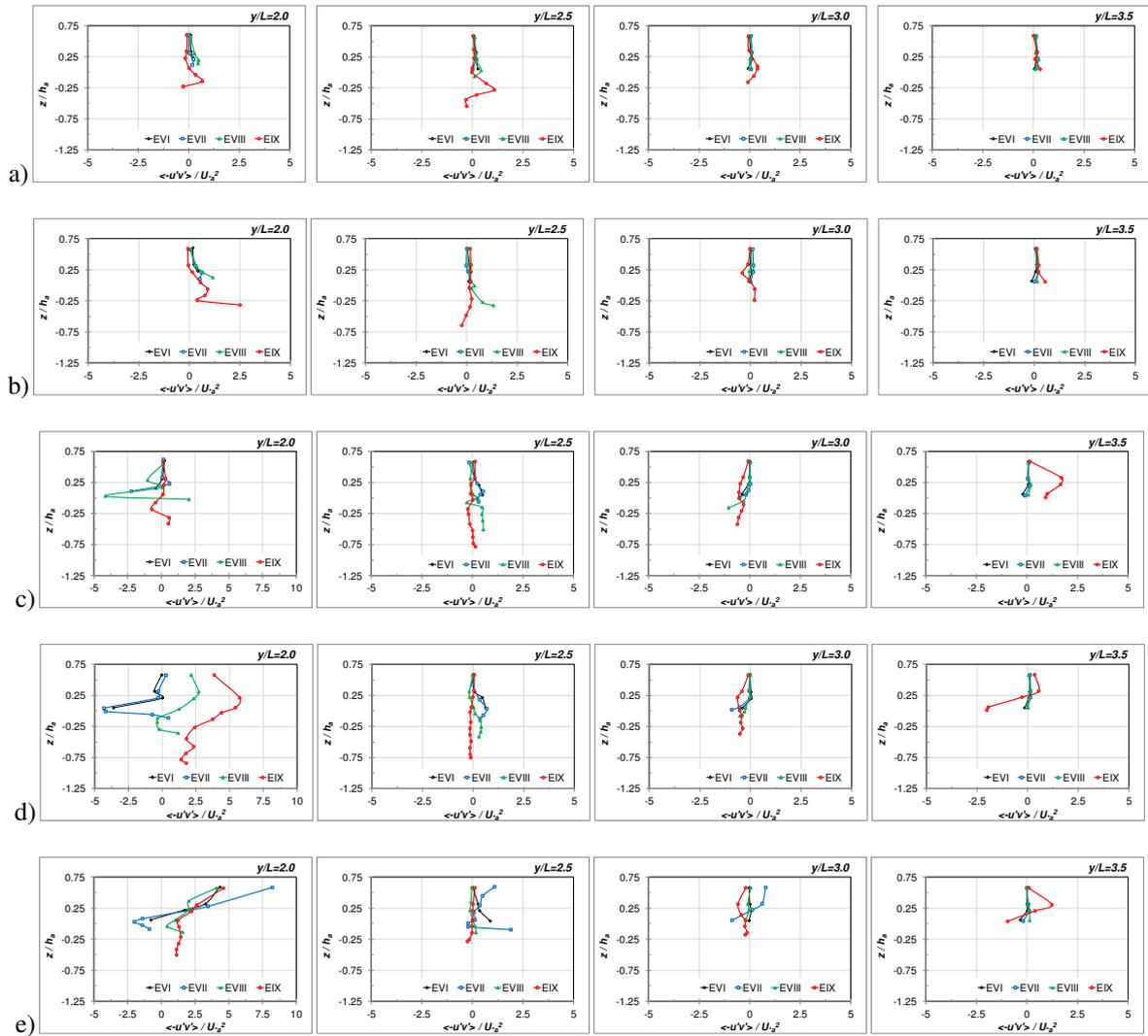
- ✓ En el sector en el cual se producen las mayores profundizaciones junto al borde lateral de la protección ( $\frac{y}{L} = 2.5$ ) se observa una disminución progresiva de las tensiones adimensionales  $\frac{-\langle uvv' \rangle}{U_{*a}^2}$  con el progreso de las erosiones, resultando valores muy próximos a cero en toda la vertical (Fig. VI.66.c y VI.66.d).
- ✓ En la porción del flujo que escurre al costado de la hoya de erosión, esto es para progresivas  $\frac{y}{L} \geq 4$ , no se aprecian variaciones significativas en las magnitudes de  $\frac{-\langle uvv' \rangle}{U_{*a}^2}$  entre las cuatro condiciones ensayadas, lo cual difiere con lo visto para la componente longitudinal de la velocidad, la cual disminuyó en toda la vertical acorde se desarrollan las erosiones, tal como se muestra en la figura VI.41.



**Figura VI.64.-** Evolución de la distribución de las tensiones de Reynolds adimensionales,  $\frac{-(uv)}{U_a^2}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales longitudinales a)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; b)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; c)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; d)  $\frac{x}{L} = 2.0$ ; e)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . Estribo con protección. EVI-EVII



**Figura VI.65.-** Evolución de la distribución de las tensiones de Reynolds adimensionales,  $\frac{-\langle uv \rangle}{U_{+a}^2}$ . Secciones transversales de progresivas longitudinales longitudinales a)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; b)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; c)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; d)  $\frac{x}{L} = 2.0$ ; e)  $\frac{x}{L} = 3.33$ . Estribo con protección. EVIII-EIX



**Figura VI.66.-** Evolución de perfiles de tensiones de Reynolds adimensionales,  $\frac{-\langle u'v' \rangle}{U_a^2}$ , en las secciones transversales de progresivas longitudinales a)  $\frac{x}{L} = -0.67$ ; b)  $\frac{x}{L} = 0.0$ ; c)  $\frac{x}{L} = 1.33$ ; d)  $\frac{x}{L} = 2.0$ ;  $\frac{x}{L} = 3.33$ . En todas las secciones se consideraron perfiles de progresivas transversales  $\frac{y}{L} = 2.0$ ;  $\frac{y}{L} = 2.5$ ;  $\frac{y}{L} = 3.0$  y  $\frac{y}{L} = 3.5$ . Estribo con protección, Ensayos EVI-EVII-EVIII-EIX

## **Capítulo VII: conclusiones**

### **VII.1 Principales conclusiones del trabajo**

Los objetivos generales y específicos planteados en esta Tesis se centraron en la evaluación de la evolución temporal de la interacción entre el flujo turbulento y los procesos de erosión en torno a un estribo de puente prismático que cuenta con una protección flexible del lecho. Para ello, se llevaron a cabo experimentos en un canal de laboratorio perteneciente a la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral mediante metodologías que permitieron: a) la caracterización continua de la evolución del lecho y del flujo en localizaciones definidas y, b) caracterizaciones sinópticas detalladas del lecho y del flujo previo al desarrollo de erosiones y en tres diferentes estados de evolución del proceso erosivo, adecuadamente establecidos. Debido a la rápida evolución que caracteriza a los fenómenos de erosión local, y el prolongado tiempo requerido para realizar mediciones de velocidades tridimensionales del flujo con una de las metodologías se fijó el lecho de modo tal de mantener inalterables las condiciones morfológicas durante la etapa de mediciones de velocidades del flujo, asociadas con cada estado representado. Los efectos no deseados sobre las características del flujo asociados a la fijación del lecho, han sido evaluados y no fueron significativos.

Para contrastar los resultados obtenidos para el estribo protegido se ensayaron, para las mismas condiciones hidráulicas, las situaciones de lecho inicial y con erosión junto al estribo próxima al equilibrio, en ambos casos sin la presencia de la protección.

La compleja configuración del flujo en un fenómeno como el estudiado y el detalle requerido en la información hidrodinámica demandaron una etapa de optimización de las técnicas experimentales empleadas, fundamentalmente en las relacionadas con el registro de velocidades del escurrimiento, como así también de las estrategias empleadas para su posterior tratamiento. Se utilizaron dos técnicas experimentales de avanzadas que ofrecen información complementaria: Velocimetría por Seguimiento de Partículas a Gran Escala (LSPTV, por sus siglas en inglés, utilizada en este caso para caracterizar la evolución temporal de las mayores escalas del campo de velocidades superficiales) y un Velocímetro

Acústico Doppler (ADV, por sus siglas en inglés, empleado aquí para caracterizar la evolución temporal de las tres componentes de las velocidades del flujo con elevada resolución temporal). Entre los aspectos considerados en la optimización de la técnica LSPTV se destaca la determinación del tamaño y densidad de partículas óptimas. En lo atinente a la configuración de registro óptima del ADV apropiada para medición buscada de velocidades, se tuvieron en cuenta aspectos tales como la presencia de partículas suspendidas en el flujo, la existencia de zonas de interferencia acústica y las resoluciones espacial y temporal de registro del instrumento. El tiempo de medición empleado pudo fundarse en un análisis de la incertidumbre esperada en la determinación de parámetros turbulentos del flujo. Con respecto al procesamiento de señales de velocidad registradas con ADV se determinó la conveniencia de evaluar la presencia de valores anómalos (conocidos como “spikes”) y su posterior reemplazo y no implementar el método de “análisis espectral” a las series de velocidades registradas como metodología de corrección del ruido en las señales medidas.

El muy buen grado de ajuste a las leyes universales evaluadas experimentalmente por Nezu (1977) de las distribuciones de parámetros de la turbulencia calculados a partir de las velocidades medidas en el flujo no perturbado por la presencia del estribo dan crédito a los procedimientos de optimización de la configuración de registro y procesamiento de la señal del Velocímetro Acústico Doppler.

La etapa experimental realizada, considerando todos los aspectos mencionados, permitió contar con un detallado conjunto de datos de velocidades del flujo y profundidades de erosión con los cuales se analizaron los campos bidimensionales y tridimensionales de flujo, la presencia de corrientes helicoidales y la interacción entre los parámetros de la turbulencia y el desarrollo de la erosión en estudio. Estos datos además proporcionan información fundamental para la validación de modelos numéricos.

A continuación se presentan las principales conclusiones surgidas del trabajo realizado:

- Las evidencias experimentales obtenidas demuestran que, con el estribo protegido, las erosiones se iniciaron en las inmediaciones del borde de aguas abajo de la protección. Al poco tiempo se forma en el extremo una fosa lateral, la que progresa tanto en profundidad como lateralmente. Con el paso del tiempo las erosiones se extienden hacia

aguas arriba, junto al borde longitudinal de la protección y llegan a “envolverla” casi totalmente. De este modo la morfología resultante alteró sectores del cauce no afectados en la situación de estribo sin protección, situación que debiera tenerse en cuenta a la hora de evaluar el comportamiento de posibles estructuras ubicadas en la proximidad del sector afectado (pilas cercanas, obras aguas arriba y abajo próximas a la margen, etc).

Estas etapas del proceso erosivo se detectaron cuando se analizó la variación de los niveles del lecho aguas abajo y al costado de la protección, en la sección de emplazamiento del estribo. Ambas mostraron tendencias logarítmicas de evolución con el tiempo, distinguiéndose diferentes pendientes de las rectas de ajuste a los datos durante el desarrollo del proceso erosivo. Este comportamiento difiere del observado con el estribo no protegido ya que, en dicha situación, se observó que las profundizaciones del lecho en el punto de máxima erosión se disponen entorno a una única recta de pendiente definida, cuando se representaron los datos en escala logarítmica.

- Cuando se comparó la evolución del proceso erosivo en las dos situaciones ensayadas (con y sin protección del lecho), se observó que el progreso de las erosiones durante los primeros momentos fue más rápido para la situación de estribo sin protección respecto de la del estribo protegido. No obstante ello se identificó un extenso período de tiempo, aproximadamente el 30 % del tiempo total ensayado en el que la tasa de cambio experimentada por las máximas profundidades de erosión resultaron equivalentes para ambas situaciones, tal como lo reflejan las pendientes de las rectas de ajuste a los datos. Durante la etapa final de la evolución de los procesos de erosión ( $t > 2000$  minutos) las mayores variaciones se dieron para el caso de estribo protegido (punto CP1, EII), período durante el cual se produce una declinación de las erosiones al costado de la protección.
- La máxima profundidad de erosión con estribo protegido fue un 78 % de la encontrada para el caso de estribo sin protección, mientras que la extensión del área afectada por los procesos de erosión (dirección longitudinal) fue un 50 % mayor respecto de la situación de estribo sin protección.
- Los resultados experimentales demostraron que los descensos del lecho comenzaron en el sector no protegido que toma contacto con la capa de corte desprendida del estribo.

En ese sector se identificaron altos niveles de energía en el flujo asociados a las fluctuaciones de velocidad, valores positivos elevados de la componente de tensiones de Reynolds  $-\rho\langle u'w' \rangle$ , comparables a los máximos encontrados en el sector donde se inician las erosiones en el caso de estribo sin protección, e importantes tensiones  $-\rho\langle u'v' \rangle$  tanto positivas como negativas.

- Un aspecto particular observado es el aumento localizado de la energía  $k$  y las tensiones  $-\rho\langle u'w' \rangle$  en el sector ocupado por la hoya de erosión incipiente en los primeros momentos del proceso de erosión, comentado en el punto anterior. En efecto, se pudo verificar la existencia de un valor pico de energía y tensiones de Reynolds en los primeros momentos del proceso erosivo en el lugar mencionado, que disminuyó luego con el progreso de las erosiones con el tiempo. Este comportamiento está posiblemente asociado con la discontinuidad que se genera en los niveles del lecho en el sentido longitudinal producto de la presencia de la protección, la cual durante las primeras instancias del proceso erosivo mantiene sus niveles originales, mientras que el lecho aguas abajo descende debido al desarrollo de las erosiones. Esta evolución temporal no monótona en el tiempo (crece y luego decrece) demostrada por los parámetros del flujo turbulento evaluados, confirman que a la hora de analizar la interacción que existe entre el flujo y los procesos de erosión no alcanza con considerar solo sus estados inicial y final, sino que también deben ser contemplados estados intermedios (aspecto característico del trabajo experimental detallado en esta tesis), sobre todo correspondientes a las primeras etapas del desarrollo.
- Con el transcurso del tiempo las erosiones se extienden hacia aguas arriba a lo largo del borde longitudinal de la protección. Este proceso está determinado por un incremento de velocidades en las cercanías del fondo en los primeros momentos del desarrollo de las socavaciones. El aumento de las profundizaciones produce una disminución de las velocidades longitudinales y de la energía asociada a las fluctuaciones de velocidad en toda la vertical y el desarrollo de velocidades verticales descendentes, las que aumentan en magnitud y se expanden en un área cada vez mayor en la medida que avanza el proceso erosivo. Acompañando a esta situación se observan velocidades ascendentes significativas sobre el talud exterior y el borde inmediato de la hoya de erosión, las cuales acrecientan su intensidad con el aumento en las profundizaciones. Se distingue la presencia de un segundo núcleo de velocidades ascendentes, cuya magnitud resulta muy

superior a las anteriores, ubicado sobre el talud interior de la hoya de erosión, el cual aparece en las secciones consideradas más alejadas del estribo, imponiendo una dinámica particular al flujo que abandona la hoya de erosión, en el que se registran también importantes velocidades transversales.

- El progreso de las erosiones en toda el área va acompañado de un descenso de las velocidades medias en el flujo principal afectando inclusive a las velocidades superficiales. Se observó que para la situación de máxima erosión representada, la velocidad media máxima resultó semejante a la encontrada para la situación de estribo sin protección. Además, en la medida que se va profundizando el lecho en torno a la protección progresivamente se deriva caudal hacia el sector erosionado, dando lugar a concentraciones de flujo que resultan de mayor importancia cuanto mayor es el volumen de sedimento erosionado. Los máximos caudales específicos encontrados resultaron semejantes a los observados para el caso de estribo sin protección.

El aporte de caudal al sector erosionado mayoritariamente proviene del tramo de escurrimiento lindero ubicado a la derecha de la fosa profundizada (lado opuesto a la localización del estribo), por lo que en este sector se registró un progresivo descenso de los caudales específicos.

- El cambio en la morfología del lecho con el desarrollo de erosiones tiene sus consecuencias sobre la configuración del flujo actuante. En este sentido pueden identificarse dos regiones aguas abajo del estribo. La primera, localizada aproximadamente hasta una progresiva longitudinal  $\frac{x}{L} = 2$  en la que se observa un desplazamiento hacia el sector de máximas erosiones de la zona del flujo caracterizada por valores elevados de energía asociada a las fluctuaciones de velocidades, con el consecuente ensanchamiento de la zona de recirculación. La segunda región se identifica para  $\frac{x}{L} > 2$  en donde los valores de energía elevados se distribuyen hasta la margen izquierda, inclusive sobre el sector de sedimentación del material erosionado. Es decir que en las secciones extremas del tramo erosionado y zona de depósito los valores de energía encontrados responden tanto a la presencia de la capa de corte desprendida desde el estribo como a la configuración particular del flujo condicionada por la morfología a partir del extremo final de la hoya de erosión. Esta disposición de la zona de recirculación del flujo y capa de corte lindante aguas abajo del estribo difiere de

la que resultó para el caso de estribo no protegido, ya que en aquel caso ésta reduce su ancho y su longitud una vez erosionado el lecho.

- En la zona donde se depositó el sedimento proveniente del sector erosionado en general se encontraron valores negativos de la componente  $-\rho\langle u'w' \rangle$  de las tensiones de Reynolds.
- En el estado de mayor erosión representado, se pudo observar en todo el tramo erosionado una corriente helicoidal de sentido de rotación anti-horario, la cual hasta la posición del estribo se localiza sobre el talud exterior de la hoya de erosión, y hacia aguas abajo sobre la parte superior del mismo. Se destaca la correspondencia encontrada entre la presencia de estas corrientes helicoidales, el déficit de velocidad en la dirección longitudinal, la presencia de velocidades verticales significativas y el incremento en los niveles de energía asociada a las fluctuaciones de velocidad. La forma de la distribución vertical de  $\frac{k}{U_*a^2}$  en esta zona es semejante a la observada en los perfiles sujetos a una situación equivalente, para el caso de estribo sin protección, pero con valores máximos de energía  $k$  sustancialmente inferiores.
- Aguas abajo del estribo, en el flujo principal que escurre en el sector de la sección transversal contiguo a la hoya de erosión se observó que las velocidades longitudinales disminuyen producto del desarrollo de las erosiones mientras que el resto de los parámetros analizados (energía  $k$  y componentes de tensiones de Reynolds) se mantuvieron sin cambios.

## VII.2 Consideración final

El interés por profundizar el conocimiento de los procesos involucrados en los fenómenos de erosión junto a estribos protegidos ha sido el impulsor del desarrollo del presente trabajo. El diseño experimental propuesto y las tareas consecuentes han permitido ratificar las hipótesis de partida y cumplir con los objetivos planteados. Más allá de las restricciones experimentales inherentes a todo trabajo de laboratorio, surge claramente como resultado la interdependencia existente entre el flujo, el estribo, el lecho y la protección durante todo el desarrollo del proceso erosivo. Las principales contribuciones de esta tesis se resumen a continuación:

- Se optimizaron técnicas y métodos experimentales que podrían ser utilizados en otros estudios que involucren caracterización hidrodinámica en procesos de erosión local. Se destacan los avances realizados en la caracterización simultánea de la evolución del lecho y del flujo durante gran parte del proceso, en localizaciones definidas, y algunos aspectos relacionados a las caracterizaciones sinópticas detalladas del lecho y del flujo en diferentes estados de evolución del proceso erosivo (rigidización del lecho, tiempo de medición, resolución espacial y temporal de registro de los velocímetros utilizados, etc.). Específicamente en lo que refiere a las mediciones con ADV se contribuyó a la realización de una guía práctica que contempla los avances realizados en esta tesis (Ver Anexo 1), la información publicada en las revistas científicas y en los manuales del usuario de los distintos instrumentos y sintetiza la experiencia de los autores al respecto sobre la base de actividades experimentales realizadas en cuatro laboratorios de instituciones de tres países latinoamericanos (Argentina, Chile y Uruguay) y una de Estados Unidos. Estas instituciones son el Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA) y el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina; Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) de la Universidad Nacional del Litoral, Argentina; el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, Uruguay; el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile y el Civil and Environmental Engineering, Ven Te Chow Hydrosystems Laboratory, University of Illinois at Urbana–Champaign.
- Se generó un conjunto de datos completo de velocidades del flujo y profundidades de erosión, los cuales además de proporcionar información fundamental para analizar las evoluciones de los campos bi y tridimensionales del flujo acorde se desarrolla el procesos de erosión, están disponibles para ser usados en la validación de modelos numéricos. La implementación de estos modelos permitirá completar el conocimiento alcanzado, ya que puede brindar resultados cuya densidad permitirán dilucidar aspectos tratados de un modo limitado de acuerdo a las características de la grilla de medición empleada en este estudio.

- En lo que se refiere a los procesos más importantes observados en estribos con protección, se concluye que la erosión se inicia en las inmediaciones del borde aguas abajo de la protección, en coincidencia con la localización de la capa de corte, en donde se encontraron altos valores de energía asociada a las fluctuaciones de velocidad y tensiones de corte. Una vez iniciada la erosión la evolución del lecho y parámetros de la turbulencia es no monótona. La evolución de los procesos de erosión y sedimentación están condicionados tanto por estructuras del flujo medio (flujo helicoidales, velocidades verticales y laterales) como turbulentas.
- Al comparar las situaciones de estribo con y sin protección se puede destacar que las principales diferencias se dan en la ubicación de sector donde se inicia la erosión y cómo evoluciona en el espacio y en el tiempo.
- Entre las similitudes se destaca la existencia de valores semejantes de parámetros turbulentos en los sectores de inicio de erosión.

Una vez desarrollada las erosiones, las máximas velocidades medias en la vertical resultaron semejantes, al igual que los máximos caudales específicos.

En el estado de mayor erosión representado, se destaca la correspondencia encontrada entre la presencia de corrientes helicoidales, el déficit de velocidad en la dirección longitudinal, la presencia de velocidades verticales significativas y el incremento en los niveles de energía asociada a las fluctuaciones de velocidad.

- Los resultados generados en esta tesis pueden ser tenidos en cuenta para diseños futuros de protecciones de estribos de puentes. Se debe contemplar el hecho que al utilizar la protección se perturbaron sectores del cauce no afectados en la situación sin protección, hecho que podría poner en riesgo otras estructuras aledañas. Se destaca además que, en función de la geometría del estribo y de la protección, la configuración del flujo podría determinar que las erosiones se inicien en un sector del lecho diferente al observado en el diseño experimental considerado en la presente investigación, y por lo tanto evolucionar de un modo diferente.

### VII.3 Recomendaciones futuras

A pesar de la gran cantidad de estudios existentes en la literatura, la realidad indica que en la actualidad los puentes continúan fallando debido a los procesos de erosión que tienen lugar junto a sus fundaciones, particularmente sus estribos, por lo que el desarrollo de sistemas de protección novedosos, efectivos y económicos, sigue siendo hoy un requerimiento clave para la ingeniería de puentes.

El estudio realizado en el marco de esta Tesis ha concentrado su atención científica en la evaluación de la evolución temporal de la interacción entre el flujo turbulento y los procesos de erosión en torno *a un estribo de puente prismático de pared vertical con sección definida* que cuenta con una *protección contra la erosión semejante a las mantas flexibles*, colocada de modo tal de revestir el terreno natural en las inmediaciones del estribo, evitando que las erosiones se desarrollen en ese lugar. Para definir lineamientos directamente extrapolables al diseño ingenieril de protecciones para estribos de puentes se requiere incluir aspectos adicionales a los abordados en este estudio. A continuación se mencionan algunos factores que se estima de interés contemplar para tal fin:

- Tipo de estribo: Se recomienda evaluar con una metodología similar a la utilizada en esta Tesis, diferentes estribos particularmente en lo que refiere a su forma y longitud, ya que de su geometría depende la configuración del flujo que interviene en el desarrollo de erosiones, como la localización de la capa de corte involucrada, aspecto clave en el proceso.
- Conformación de la protección del lecho: se considera importante contemplar otros tipos de protecciones del lecho cuya constitución proporcionen diferentes condiciones de rugosidad y grado de flexibilidad a los aquí estudiados. De este modo se podrá indagar en cuanto a la influencia que tienen tales cuestiones en el proceso de interrelación entre el desarrollo de las erosiones y el flujo turbulento. Se considera de sumo interés explorar el empleo de geobolsas o tubos confeccionados con geotextiles rellenos conocidos como geocontenedores. Esta tecnología ha adquirido importancia en las últimas décadas, gracias a los desarrollos y avances logrados en el campo de los geotextiles. Su utilización se ha impuesto debido a que es una solución económica, duradera, de fácil instalación y altamente flexible. Los geocontenedores pueden ser construidos de las dimensiones que se desee, respondiendo a los requerimientos del

proyecto. Son bolsas o tubos, confeccionados a partir de un geotextil no tejido de poliéster, aptos para ser rellenos con material suelto, húmedo o seco (arena, tierra o lodo), ya sea en obrador o en su posición definitiva.

- Interferencia con otras estructuras: un aspecto que debe considerarse es la posibilidad de que obras aledañas al sector protegido se vean involucradas en el sector comprometido por el proceso de erosión junto a la protección. Un ejemplo de esta situación lo constituye la presencia de las propias pilas del puente más próxima al estribo.
- Realización de estudios de campo: que permitan evaluar la influencia del número de Reynolds en los procesos estudiados

Los resultados que se obtengan de estudios semejantes y complementarios a los de esta Tesis y que incluya los aspectos mencionados, permitirán definir criterios racionalmente fundados para el diseño de medidas de protección eficientes en la reducción de las erosiones locales junto al estribo y, simultáneamente, viables desde un punto de vista técnico y económico.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$B_a$ : ancho de la sección de aproximación

$b_{opt}$ : longitud de bloque óptima para el método MBB

$c$ : velocidad del sonido en el agua

$C_1$  y  $C_2$ : son coeficientes que dependen del tipo de protección

$d$ : profundidad de colocación del rip-rap

$D_n$ : espesor nominal de la protección

$D_r$ : diámetro representativo del conjunto de elementos que compone el enrocado

$d_s$ : diámetro medio del sedimento

$E$ : espesor del estribo (dimensión longitudinal)

$f_n$ : frecuencia característica

$f_R$ : frecuencia de registro del ADV

$F_{Ra} = \frac{U_a}{\sqrt{g h_a}}$ : Número de Froude del flujo de aproximación

$f_s$ : frecuencia de muestreo del ADV

$f_\theta$ : es la frecuencia acústica del ADV

$g$ : aceleración de la gravedad

$h$ : tirante del escurrimiento

$h_a$ : tirante del flujo de aproximación, en una vertical ubicada en el centro de la sección transversal

$h_e$ : tirante del flujo junto al estribo

$h_f$ : la profundidad del escurrimiento en el valle de inundación

$h_{ESTRIBO}$ : altura del estribo

$h_v$ : altura del volumen de medición del ADV

$k$ : energía asociada a las fluctuaciones de velocidad

$K$ : energía asociada a las fluctuaciones de velocidad media en la vertical

$K_G$ : factor que tiene en cuenta la forma del canal

$K_h$ : factor perfil de velocidades en el cálculo del espesor nominal de la protección

$K_s$ : factor que tiene en cuenta la forma del estribo

$K_T$ : factor de turbulencia en el cálculo del espesor nominal de la protección

$K_a$ : factor de pendiente del talud en el cálculo del espesor nominal de la protección

$k_K$ : constante de Von Karman

$k_s$ : altura de rugosidad efectiva

$L$ : longitud del estribo en la dirección transversal

$L_a$ : escala de longitud advectiva

$L_{ADV}$ : escala de longitud característica de la medición con ADV.

$N$ : cantidad de observaciones sobre las que realiza el promediado el ADV

$\hat{p}$ : presión

$Q$ : caudal

$q$ : caudal específico en una vertical dada

$q_a$ : caudal específico en la vertical considerada en el flujo de aproximación

$Re_a = \frac{U_a h_a}{\nu}$ : número de Reynolds en el flujo de aproximación

$Re_*$ : número de Reynolds de corte

$SNR$ : relación señal-ruido del ADV

$T$ : escala de tiempo integral de la señal de velocidad

$TKE$ : energía cinética turbulenta

$T_m$ : tiempo de muestreo

$U$ : velocidad longitudinal media en la vertical

$U_a$ : velocidad longitudinal media en la vertical en el flujo de aproximación

$U_c$ : velocidad de convección

$U_e$ : velocidad media del escurrimiento junto al estribo

$U_*$ : velocidad de corte

$U_{*a}$ : velocidad de corte del flujo de aproximación

$U_{*c}$ : velocidad de corte crítica para inicio del movimiento

$u$ ;  $v$ ;  $w$ : velocidades instantáneas en las direcciones longitudinal, transversal y vertical, respectivamente.

$u'$ ;  $v'$ ;  $w'$ : velocidades fluctuantes en las direcciones longitudinal, transversal y vertical, respectivamente.

$V$ : velocidad transversal media en la vertical

$V_m$ : velocidad media en la vertical correspondiente al pie del talud en el cálculo del espesor nominal de la protección

$v_b$ : velocidad del agua en la dirección de uno de los receptores del ADV

$v_p$ : componente de velocidad primaria

$v_s$ : componente de velocidad secundaria

$V_{xy}$ : vector velocidad en el plano “x-y” promediado en profundidad

$V_{xyS}$ : velocidad en el plano “x-y” superficial

$v_{xy}$ : vector velocidad resultante, en el plano x-y en cada posición de medición en una vertical

$\vec{v}$ : vector velocidad

$W$ : ancho de la protección

$x, y, z$ : direcciones longitudinal, transversal y vertical

$Z$ : distancia desde el centro del volumen de medición al fondo

$z_b$ : cota del lecho

$z_o$ : altura de rugosidad

$Z_e$ : profundidad de erosión

$Z_{e6000}$ : profundidad de erosión relevada al cabo de 6000 minutos

$\beta$ : ángulo de inclinación del flujo principal respecto al estribo

$\gamma_s$ : peso específico del sedimento

$\delta_v$ : espesor de la subcapa viscosa

$\Delta$ : densidad relativa de la protección (en su conjunto)

$\Delta t$ : duración del pulso emitido por el ADV

$\Delta T$ : intervalo de tiempo entre los pulsos emitidos por el ADV

$\Delta\varphi$ : diferencia de fase entre los dos pulsos emitidos por el ADV

$\theta$ : orientación del vector velocidad resultante,  $v_{xy}$

$\theta_{Cp}$ : tensión de corte crítica adimensional de la protección en el cálculo del espesor nominal de la protección

$\theta_w$ : ángulo definido en la figura I.5

$\lambda$ : longitud de onda

$\mu$ : viscosidad dinámica del agua

$\nu$ : viscosidad cinemática del agua

$\rho$ : densidad del agua

$\sigma_g$ : desvío estándar geométrico del sedimento

$\tau_c$ : tensión de corte crítica del sedimento para inicio del movimiento

- $\phi$ : diámetro del volumen de medición del ADV Vectrino
- $\phi_w$ : ángulo definido en la figura I.5
- $\varphi$ : ángulo de inclinación del vector de velocidad  $V_{xy}$
- $\phi_r$ : factor de estabilidad en el cálculo del espesor nominal de la protección
- $\omega$ : vorticidad
- $\langle u \rangle$ : velocidad media temporal en la dirección longitudinal
- $\langle v \rangle$ : velocidad media temporal en la dirección transversal
- $\langle w \rangle$ : velocidad media temporal en la dirección vertical
- $\langle u \rangle_{sup}$ : velocidad en la superficie del agua
- $\langle u'^2 \rangle$ : varianza de la componente de velocidad en la dirección longitudinal
- $\langle v'^2 \rangle$ : varianza de la componente de velocidad en la dirección transversal
- $\langle w'^2 \rangle$ : varianza de la componente de velocidad en la dirección vertical
- $\langle u'^2 \rangle^{1/2}$ : desvío de la componente de velocidad en la dirección longitudinal
- $\langle v'^2 \rangle^{1/2}$ : desvío de la componente de velocidad en la dirección transversal
- $\langle w'^2 \rangle^{1/2}$ : desvío de la componente de velocidad en la dirección vertical
- $-\rho \langle u'v' \rangle$ : componente de la tensión de Reynolds en la dirección  $x$ - $y$
- $-\rho \langle u'w' \rangle$ : componente de la tensión de Reynolds en la dirección  $x$ - $z$
- $-\rho \langle v'w' \rangle$ : componente de la tensión de Reynolds en la dirección  $y$ - $z$

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Ahmed, F. y Rajaratnam, N. (2000) “Observations on flow around bridge abutment.” *Journal of Engineering Mechanics*. Vol 126, No 1, Jan. 2000.A.S.C.E., pp. 51-59.
- Ahmed, F. y Rajaratnam, N. (2000). “Observations on flow around bridge abutment”. *J. Eng. Mech.* 126(1), 51-59.
- Anderson y Lohrmann (1995). “Open water test of the Sontek acoustic Doppler Velocimeter.” *Proc., IEEE Fifth Working Conf. On Current Measurements*, IEEE Oceanic Engineering Society, St. Petersburg, Fla., 188–192.
- Arneson, L.A, Zevenbergen, L.W., Lagasse, P.F., Clopper, P.E.(2012). “Evaluating Scour at Bridges - Fifth Edition”. Publication No. FHWA-HIF-12-003 U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration.
- Ballio F. y Orsi, E. (2001). “Time evolution of scour around bridge abutments”. *Water Engineering Research* 2, 243-259.
- Bathurst, J. C., Thorne, C. R. and Hey, R. D. 1977. ‘Direct measurements of secondary currents in river bends’, *Nature*, 269, 504–506.
- Bendat, J. y Piersol, A. (2000). “Random data”. 3rd Ed., Wiley, New York.
- Breusers, H.N.C. y Raudkivi, A.J. (1991) “Scouring: Hydraulic Structures Design Manual Series, Vol. 2” (IAHR Design Manual). Published by Taylor & Francis. ISBN 10: 9061919835 - ISBN 13: 978906191983.
- Capuano, D., Carravetta, A. y Gol, U. (2004). “Activation of scour around bridge abutment” 563 *Proceedings Of The Second International Conference On Fluvial Hydraulics*, 23-25 June 2004, Napoli, Italy. *River Flow 2004*. Edited by Massimo Greco, Armando Carravetta & Renata Delia Morte Federico II University of Napoli, Italy.
- Cardoso, A. y Bettess, R. (1999). “Effects of time and channel geometry on scour at bridge abutments”. *J. Hydraul. Eng.*, 125(4), 388-399.
- 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.

- Carrasco, A. y Vionnet, C.A. (2004). "Separation of scales on a broad, shallow turbulent flow", *Journal of Hydraulic Research*, 42:6, 630-638, DOI: 10.1080/00221686.2004.9628316.
- Cenedese, A. y Querzoli, G. (1997). "Lagrangian statistics and transilient matrix measurements by PTV in a convective boundary layer". *Measurements Science Technology*, Vol. 8, pp. 1553.
- Chrisohoides, A.; Sotiropoulos, F. y Sturm, T. (2003). "Coherent Structures in Flat-Bed Abutment Flow: Computational Fluid Dynamics Simulations and Experiments". *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol.129.Nº3.
- Cunha, L. V. (1971) "Erosões localizadas junto de obstáculos salientes de margens". Tesis Doctoral. Lisboa Portugal, 295 p.
- Dey, S. y Barbhuiya, A. K. (2005). "Flow field at a vertical-wall abutment". *J. Hydraulic Engineering*, 131(12), 1126-1135.
- Dey, S. y Barbhuiya, A. K. (2006a). "Velocity and turbulence in a scour hole at a vertical-wall abutment". *Flow measurement and Instrumentation* 17(2006) 13-21.
- Dey, S. y Barbhuiya, A. K. (2006b). "3D flow field in a scour hole at a wing-wall abutment". *J. Hydraul. Res.*, 44(1), 33-50.
- Dongol, D.M. (1994) "Scour at bridge abutments." Report Nº 544, School of Engineering, The University of Auckland, Auckland, New Zealand, 409 p.
- Duan, J.G. (2009). "Mean flow and turbulence around a laboratory spur dike". *J. Hydraul. Eng.* 135(10), 803-810.
- Efron y Tibshirani (1993): "An introduction to the Bootstrap". Nueva York, Chapman & Hall/CRC, 1993.
- Efron, B. (1979). "Bootstrap methods: Another look at the jackknife". *The Annals of Statistics*, 7, 1-26.
- Eve, N. y Melville, B. (2000). "Riprap protection of abutment under clear water conditions", Part of Building Partnerships – 2000 Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning & Management. Section 45, Chapter 1.
- Froehlich, D. C. (1989). "Local Scour at bridge abutments". Proc., Nat.Hydr.Conf., ASCE, New York, 13-18.

- García, C., Cantero, M., Niño, Y., García, M. (2005). “Turbulence measurements with acoustic Doppler velocimeters”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131, 1062–1073.
- García, C.M; Jackson P. y García, M. (2006). “Confidence intervals in the determination of turbulence parameters”. *Experiment in Fluids*. 40: 514 – 522. ISSN: 0723-4864 (Paper) 1432-1114 (Online).
- García, M. H. (2008) “Sedimentation Engineering: Theories, Measurements, Modeling and Practice: Processes, Management, Modeling, and Practice” (ASCE Manual and Reports on Engineering Practice No. 110) 1st Edition. ISBN-13: 978-0784408148. ISBN-10: 0784408149.
- Gil Montero, V., Romagnoli, M., García, C., Cantero, M. y Scacchi, G. (2014). “Optimization of ADV sampling strategies using DNS of turbulent flow”, *Journal of Hydraulic Research*, 52:6, 862-869, DOI: 10.1080/00221686.2014.967818.
- Gil-Flores, J. (2005). “Aplicación del método Bootstrap al contraste de hipótesis en la investigación educativa”. *Revista de Educación*, 336, 251-265.
- Goring, D., y Nikora, V. (2002). “Despiking acoustic Doppler velocimeter data”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(1), 117–126.
- Hamming, R. (1983). “Digital filters”. 2nd Ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Jesson, M.; Sterling, M.; Bridgeman, J. (2013). “Despiking velocity time-series. Optimisation through the combination of spike detection and replacement methods”. *Flow Measurement and Instrumentation* 30(2013)45–51.
- Kandasamy, J. K. (1985) “Local scour at skewed abutments.” Report N° 375, School of Engineering, The University of Auckland. Auckland, New Zealand, 125 p.
- Kandasamy, J. K. (1989) “Abutments scour.” Report N° 458, School of Engineering, The University of Auckland, Auckland, New Zealand, 278 p.
- Koken, M., y G. Constantinescu (2008). “An investigation of the flow and scour mechanisms around isolated spur dikes in a shallow open channel: Conditions corresponding to the initiation of the erosion and deposition process”, *Water Resour. Res.*, 44, W08406.
- Koken, Mete (2011). “Coherent structures around isolated spur dikes at various approach flow angles”, *Journal of Hydraulic Research*, 49:6, 736-743.

- Koken, M., y G. Constantinescu (2011). "Flow and turbulence structure around a spur dike in a channel with a large scour hole", *Water Resour. Res.*, 47, W12511.
- Koken, M. y Constantinescu, G. (2014). "Flow and Turbulence Structure around Abutments with Sloped Sidewalls." *J. Hydraul. Eng.*, 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000876, 04014031.
- Koken, M. y Gogus, M. (2015). "Effect of spur dike length on the horseshoe vortex system and the bed shear stress distribution", *Journal of Hydraulic Research*, 53:2, 196-206.
- Kouchakzadeh, S. y Townsend, R.D. (1997) "Maximum scour depth at bridge abutments terminating in the flood plain zone". *Canadian Journal of Civil Engineering*. 24. pp. 996 – 1006.
- Kwan, T. F. (1984) "Study of abutment scour." Report N° 328, School of Engineering. The University of Auckland, Auckland, New Zealand, 225 p.
- Kwan, T. F. (1988) "A study of abutment scour." Report N° 451, School of Engineering. The University of Auckland, Auckland, New Zealand, 461 p.
- Kwan, R. F. y Melville, B.W. (1994). "Local scour and flow measurements at bridge abutments". *J. Hydraulic Research*. 32(5), 661-673.
- Lagasse, P.; Zevenbergen, L.; Schall, J. y Clopper, P. (2001). "Bridge scour and stream instability countermeasures". Rep. FHWA NHI 01-003. HEC-23. Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- Laursen, E. M. (1958). "Scour at bridge crossings." Bulletin N° 8, Iowa Highway Research Board, Ames, Iowa, USA.
- Ledesma, R. (2008). "Introducción al Bootstrap. Desarrollo de un ejemplo acompañado de software de aplicación". *Tutorials in Quantitative Methods for Psychology* 2008, Vol. 4 (2), p. 51-60.
- Lemmin, U., y Lhermitte, R. (1999). "Discussion of 'ADV measurements of turbulence: Can we improve their interpretation?' by V. I. Nikora, y D. G. Goring." *J. Hydraul. Eng.*, 125 (9), 987–988.
- Lemos, F. (1975). General Report, Proceeding of the 16 th Congress, I.A.R.H., Sao Paulo, Brazil.
- Lim, S.Y. (1997). "Equilibrium clear-water scour around an abutment." *Journal of Hydraulic Engineering*, A.S.C.E., 123 (3), pp. 237-243.

- Lim, S.Y. y Cheng, N. S. (1998) “Prediction of live-bed scour at bridge abutments.” *Journal of Hydraulics Engineering, A.S.C.E.*, 124 (6), pp. 635-638.
- Liu, H.K.; Chang, F.M. y Skinner, M.M. (1961) “Effect of bridge constriction on scour and backwater.” Engineering Research Center, Colorado State University, CER 60 HKL22.
- Lohrmann, A., Cabrera, R., y Kraus, N. (1994). “Acoustic Doppler velocimeter (ADV) for laboratory use”. *Proceedings of the International Conference on Fundamentals and advancements in Hydraulic Measurements and Experimentation, ASCE*, 351–365.
- López, F., y Garcia, M. (2001). “Mean flow structure of openchannel flow through non-emergent vegetation”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127, 392–402.
- Maza Álvarez, J. A. (2001) “Erosión en ríos y obras de protección.” *Apuntes del curso “Algunos aspectos de Ingeniería de Ríos.”* Escuela T S de Ingenieros de caminos, Canales y Puertos. Universidad de Castilla La Mancha. Ciudad Real. España.
- Mc Lelland, S., y Nicholas, A. (2000). “A new method for evaluating errors in high-frequency ADV measurements”. *Hydrological Processes*, 14, 351–366.
- Melville, B.W. (1992) "Local Scour at bridge abutments." *Journal of Hydraulic Engineering, A.S.C.E.*, 118(4), pp. 615-630.
- Melville, B.W. (1995) “Bridge abutment scour in compound channels.” *Journal of Hydraulic Engineering, A.S.C.E.*, 121 (12). pp. 863 – 868.
- Melville, B.W. (1997) "Pier and abutment scour - An integrated approach." *Journal of Hydraulic Engineering, A.S.C.E.*, 123(2), pp. 125-136.
- Melville, B.W. y Coleman, S.E. (2000) "Bridge Scour." *Water Resources Publications, LLC*.
- Melville, B; Ballegooy, S; Coleman S. y Barkdoll, B. (2006a). “Countermeasure Toe Protection At Spill-Through Abutments”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(3), 235-245.
- Melville, B; Ballegooy, S; Coleman S. y Barkdoll, B. (2006b). “Scour Countermeasures for Wing-Wall Abutments”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(6), 563-574.
- Molinas, A. y Hafez, Y. (2000). “Finite element surface model for flow around vertical wall abutments”. *Journal of Fluids and Structures* (2000) 14, 711-733.

- Molinas, A.; Kheireldin, K. y Wu, B. (1998). “Shear stress around vertical wall abutments”. *J. Hydraul. Eng., Am. Soc. Civ. Eng.* 124: 822–830.
- Morales, R.; Ettema, R. y Barkdoll, B. (2008). “Large-Scale Flume Tests of Riprap-Apron Performance at a Bridge Abutment on Floodplain.” *J. Hydraul. Eng., Am. Soc. Civ.Eng.* Vol. 134. N° 6. ISSN 0733-9429/2008/6-800-809.
- Nezu, I. (1977). “Turbulent structures in open-channel flows.” PhD thesis, Kyoto Univ., Japan.
- Nezu, I. (2005). “Open-channel flow turbulence and its research prospect in the 21st century”. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE/ April 2005.*
- Nezu, I. y Rodi, W. (1986). “Open-channel flow measurements with a laser Doppler anemometer”. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 112, 335-355.
- Nikora, V. y Goring, D. (1998). ADV measurements of turbulence: Can we improve their interpretation? *Journal Hydraulic Engineering*, 124, 630–634.
- O’Connor, D.J. (1995). “Inner región of smooth pipes and open channels”. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 121, 555-560.
- Parsheh, M., Sotiropoulos F., Porte-Agel, F (2010). “Estimation of power spectra of acoustic-Doppler velocimetry data contaminated with intermittent spikes”. *Journal of Hydraulic Engineering* 2010;136:368–78.
- Patalano, A., Brevis, W., García, C. M., Bleninger, T., y Rodríguez, A. (2013). “PTVlab, una herramienta grafica para el procesamiento digital en Velocimetría por Seguimiento de Partículas.” Tercer Simposio de Métodos Experimentales en Hidráulica, Santa Fe, Argentina.
- Patalano, A., y García, C. M. (2016). “RIVeR - Towards affordable, practical and user-friendly toolbox for Large Scale PIV and PTV techniques”. *River Flow*, St. Louis, USA.
- Piguini, R.; Reynares, M.; Scacchi, G. (2014). “Optimización del diseño de protecciones colocadas Junto a estribos de puentes aliviadores”. *Aqua-LAC - V.6-N° 1* - pp. 33 – 37. ISSN 1688-2873.
- Pilarczyk, K. W. (1997). “Simplified unification of stability formulae for revetment”. Chapter 4, in “*River, Coastal and Shoreline Protection*”, edited by C.R. Thorne, S. R. Abt, F.B.J. Barends, S.T. Maynard y K.W. Pilarczyk, John Wiley & Sons, Inc. New York, U.S.A.

- Precht, E., Janssen, F., y Huettel, M. (2006). "Near-bottom performance of the acoustic Doppler velocimeter (ADV) – a comparative study". *Aquatic Ecology*, 40, 481–492.
- Radice, A., Ballio, F. y Porta, G. (2009). "Local scour at a trapezoidal abutment: sediment motion pattern", *Journal of Hydraulic Research*, 47:2, 250-262.
- Rajaratnam, N. y Nwachukwu, B. A. (1983) "Flow near goyne-like structures." *A.S.C.E. Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 109, No 3, pp. 463-480.
- Reynares, M.L. (2009). "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.
- Reynares, M.; Rocca Colell, M.; Scacchi, G. y Schreider, M. (2005). "Incidencia de las protecciones de estribo en el desarrollo de la erosión local". XX Congreso Nacional del Agua. Mendoza. Argentina.
- Reynares; M.; Schreider; M.; Scacchi, G. (2014) "Dimensiones en planta de una protección de estribo y erosiones resultantes". *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol.V, N° 6, pp. 83-101. ISSN 0187-8336.
- Reynares, M.; Schreider, M.; Scacchi, G. (2010). "Incidencia del diseño en planta de una protección de estribo sobre las erosiones resultantes". *Revista Ingeniería del Agua*. V17 - N° 2. - ISSN: 1134-2196.
- Rhoads, B. L. and Kenworthy, S.T. (1998). "Time-averaged flow structure in the central region of a stream confluence". *Earth Surface Processes And Landforms*, VOL 23, 171–191 (1998).
- Richardson, E.V. y Davis, S.R. (2001) "Evaluating scour at bridges" Report No FHW-IP-90-017, *Hydraulics Engineering Circular No 18 (HEC 18)*, Fourth Edition, Office of Technology Applications, HIA-22, Federal Highway Administration, U.S.
- Richardson, J.R. y Trivino, R. (1999). "Estimating clear water abutment scour". Report, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Missouri-Kansas City.
- Scacchi, G.; García, C.M. y Tarrab, L. (2009). "Caracterización del escurrimiento superficial en inmediaciones de un estribo de puente". I Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica. Carlos Paz, Córdoba, Junio de 2009.

- Scacchi, G.B. (2003) “Erosión en estribos de puentes ubicados en valles de inundación”. Tesis de Maestría en Ingeniería de los Recursos. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe. Argentina.
- Schlichting, H. (1979). *Boundary Layer Theory*, 7th Edition, McGraw-Hill, New York.
- Shen, H.; Schneider, V. y Karaki, S. (1966) “Mechanics of local scour.” U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, Institute of Applied Technology.
- Simons, D.B.; Richardson, E.V. y Nordin, C.F. Jr. (1964) “Sedimentary structures generated by flow in alluvial channels.” Report No CER64-DBS-EVR-CFN 15, Colorado State University, Fort Collins, American Association of Petroleum Geologist Special Publication No 12.
- Sturm, T.W. (1999). “Abutment scour studies for compound channels.” FHWA-RD-99-156, Federal Administration, U.S. Department of Transportation, McLean, Va.
- Témez, J. R. (1988). “Control de la erosión en puentes”. Ministerio de obras públicas y urbanismo (MOPU), Madrid, España.
- Teruzzi, A., Ballio, F. y Armenio, V. (2009). “Turbulent Stresses at the Bottom Surface near an Abutment: Laboratory-Scale Numerical Experiment”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(2), 106-117.
- Tey, C. B. (1984). “Local scour at bridge abutments.” Report N° 329, School of Engineering, The University of Auckland, Auckland, New Zealand, 111 p.
- Vanoni, V. A. (1975). “Sedimentation Engineering” . Chapter II.E- Sediment transportation mechanics – Initiation of motion. (Editor V. Vanoni), A.S.C.E.
- Voulgaris, G. y Trowbridge, J. (1998). “Evaluation of the acoustic Doppler velocimeter (ADV) for turbulence measurements”. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 15(2), 272–288.
- Wong, W. H. (1982). “Scour at bridge abutments.” Report N° 275, School of Engineering, The University of Auckland, Auckland, New Zealand, 109 p.
- Yalin, M. S. (1992) . *River mechanics*, Pergamon Press, New York.

## **ANEXO 1**

### **Guía práctica para realizar mediciones de velocidad en flujos turbulentos con ADV. Versión 2016**

Carlos M. García, Graciela B. Scacchi, Horacio S. Herrero, José Manuel Díaz Lozada,  
Francisco Pedocchi, Yarko Niño, Marcelo H. García

## GUÍA PRÁCTICA PARA REALIZAR MEDICIONES DE VELOCIDAD EN FLUJOS TURBULENTOS CON ADV. Versión 2016

**Carlos Marcelo García<sup>1</sup>, Graciela Scacchi<sup>2</sup>, Horacio Sebastián Herrero<sup>1</sup>, José Manuel Díaz Lozada<sup>1</sup>, Francisco Pedocchi<sup>3</sup>, Yarko Niño<sup>4</sup>, Marcelo H. García<sup>5</sup>.**

<sup>1</sup>Centro de Estudios y Tecnología del Agua. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH), Universidad Nacional del Litoral, Argentina

<sup>3</sup>Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Prof. Ing. Oscar J. Maggiolo (IMFIA), Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay.

<sup>4</sup>Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile

<sup>5</sup>Civil and Environmental Engineering, Ven Te Chow Hydrosystems Laboratory, University of Illinois at Urbana–Champaign.

### 1. INTRODUCCIÓN

La caracterización de flujos turbulentos requiere mediciones de velocidad con altas resoluciones temporales y espaciales. Esta información es generalmente utilizada en estudios y proyectos en Recursos Hídricos relacionados con la determinación del campo de velocidades de flujo medio; del coeficiente de la transferencia de masa entre el líquido y las partículas suspendidas (sedimento, burbujas); índices de la aglomeración de sólidos suspendidos; cálculo de los índices de transferencia de masa entre los líquidos y las paredes (procesos erosivos); etc. Los parámetros de la turbulencia generalmente requeridos para esos estudios son: velocidades medias de flujo, energía cinética turbulenta (TKE), tensiones de Reynolds, velocidades convectivas de las estructuras turbulentas, tasa de disipación de TKE, y escalas de longitud representativas de los niveles de turbulencia del flujo tales como las escalas de los grandes vórtices y las escalas de Taylor y de Kolmogorov.

Técnicas de mediciones basadas en el principio Láser Doppler y en imágenes de partículas (conocidas como LDV y PIV respectivamente por sus siglas en inglés) se convirtieron en las técnicas más usadas para caracterizar flujos turbulentos en laboratorio. Sin embargo, la aplicabilidad de estas técnicas, al igual que los métodos que usan sensores de película caliente, disminuye a medida que se incrementa la escala de las instalaciones experimentales o en estudios donde se prevé la presencia de sedimentos en suspensión. En estos casos, el uso de velocímetros acústicos Doppler (conocidos como ADV por sus siglas en inglés) constituyen la técnica de elección por su robustez, calibración de fábrica invariante, bajo costo relativo y aceptables resoluciones temporales y espaciales obtenidas con estos instrumentos. Diversos artículos fueron publicados en los últimos 20 años en revistas científicas evaluando la capacidad de los ADV's para caracterizar flujos

turbulentos. Estos estudios están relacionados a la resolución espacial y temporal del instrumento como así también a los niveles de ruido Doppler y valores anómalos presentes en las señales registradas por el ADV. En este documento se presenta la guía práctica para realizar mediciones de velocidad de flujo con ADV que contempla los principales requisitos para lograr una buena caracterización de los procesos turbulentos presentes en el flujo. Los requisitos que se presentan están relacionados a actividades generalmente desarrolladas durante las etapas de preparación del experimento, de registro de información con ADV y de procesamiento y de análisis de esa información. Esta guía práctica contempla la información publicada en las revistas científicas y en los manuales del usuario de los distintos instrumentos y sintetiza la experiencia de los autores al respecto sobre la base de actividades experimentales realizadas en cuatro laboratorios de instituciones de tres países latinoamericanos (Argentina, Chile y Uruguay). Estas instituciones son el Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA) y el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina; Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) de la Universidad Nacional del Litoral, Argentina; el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, Uruguay; y el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile

## **2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL PARA CARACTERIZAR FLUJOS TURBULENTOS CON VELOCÍMETROS ACÚSTICOS DOPPLER**

En esta sección se detalla la metodología experimental recomendada por los autores para realizar mediciones de velocidad de flujo con Velocímetros Acústicos Doppler que permitan lograr una buena caracterización de los procesos turbulentos presentes en el flujo. A continuación se describen las actividades requeridas durante las etapas de preparación del experimento, configuración de registro del instrumental, registro de las señales de velocidad, y de procesamiento de los datos registrados.

### **2.1. ACTIVIDADES RECOMENDADAS DURANTE LA ETAPA DE PREPARACIÓN DEL EXPERIMENTO**

Paso I: Definir los objetivos del estudio. Es importante definir a priori los objetivos del estudio y los parámetros de la turbulencia a caracterizar (velocidades medias, esfuerzos de Reynolds, TKE, tasa de disipación de la TKE, escalas de longitud representativas de la turbulencia, etc). A partir de esta información se definirán luego los tiempos de medición (o longitud de las series), la configuración óptima del instrumento (altura de volumen de medición, frecuencia de registro, etc.), el procesamiento recomendado de las señales registradas, etc.

Paso 2: Definir las zonas de flujo que se desea caracterizar. En relación a los objetivos propuestos en el punto anterior se seleccionará un área de interés donde se llevarán a cabo las mediciones de velocidad (zona cercana a la superficie libre, zona cercana al fondo, etc). En lo que se refiere a la región del flujo cercana a la superficie libre, no es posible caracterizar esta región utilizando el posicionamiento habitual en los velocímetros acústicos Doppler (volumen de medición localizado verticalmente debajo del emisor), ya que la sonda tiene que estar totalmente sumergida. La distancia sin caracterizar es igual a la

distancia que separa la sonda y el volumen de medición. Esta distancia varía de acuerdo al modelo de velocímetros acústicos Doppler utilizado, de todas maneras es siempre mayor o igual a 5 cm. El posicionamiento lateral del instrumento i.e. volumen de medición ubicado en forma lateral al emisor, reduce la distancia sin caracterizar a un valor mínimo aproximado a 3cm. A las distancias mencionadas anteriormente, que no dependen de las condiciones del flujo (sino que dependen de la geometría del ADV), se les debe agregar otra longitud característica que depende de la velocidad del flujo. Para flujos de alta velocidad (con velocidades del orden de 1 m/s), el efecto estela de la sonda genera incorporación de aire y los receptores y/o el transmisor quedan totalmente o parcialmente cubiertos de aire lo cual produce muy baja calidad de la señal registrada. En referencia a la zona cercana al fondo, de acuerdo a lo propuesto por Pretch et al. (2006), se recomienda evitar mediciones de velocidad a una distancia al fondo menor que 2.5 veces el diámetro nominal del volumen de medición. Las velocidades medias de flujo medidas dentro de esa región son sustancialmente menores que las reales, debido al efecto del fondo sobre la señal acústica recibida por la sonda. Además, el tamaño de las estructuras turbulentas de mayor escala ( $L$ ) presentes en una determinada región del flujo es del orden de la distancia a la frontera que limita ese flujo. Nezu y Nakawaga (1993) observaron esta evolución lineal de  $L$  con la distancia al fondo para un flujo turbulento en un canal abierto a régimen uniforme. Esta evolución observada de  $L$  tiene implicancias directas en el requerimiento establecido por García et al. (2005) para la frecuencia adimensional  $F_{st} > 5$  (donde  $F_{st} = z / L_{ADV}$ ) la cual no es habitualmente satisfecha en esta región cuando se realizan mediciones con los instrumentos velocímetros acústicos Doppler. El hecho de tener valores de  $F_{st} < 5$  genera (debido a los efectos de filtros temporales y espaciales implementados en la técnica de velocimetría acústica Doppler) un sesgo en los valores de los parámetros de la turbulencia estimados en base a mediciones registradas en esa región. Por ejemplo, la energía turbulenta es sesgada hacia valores menores en la región cercana a la frontera (menores valores de  $F$  y mayor sesgo) lo cual no es representativo de la física del problema. Este sesgo en los valores de energía turbulenta no es usualmente observado porque en esa región los niveles de ruido Doppler son significativamente más altos (McLelland y Nicholas 2000), lo que hace que la energía total de la señal registrada (energía turbulenta + energía del ruido) crezca aun teniendo en cuenta el sesgo introducido por tener  $F < 20$ . Además se recomienda relevar experimentalmente (evaluando los parámetros de calidad de la señal registrada: correlación y relación señal – ruido) las localizaciones conflictivas por interferencia acústica (debido a contaminación del pulso acústico reflejado en las partículas por pulsos reflejados en las fronteras solidas) cuando se evalúan perfiles verticales (definidos como “weak spots” en inglés) utilizando sondas con configuración vertical mirando hacia abajo. Este relevamiento experimental permitirá verificar, para las condiciones de flujo y de fronteras presentes, las distancias donde ocurren estas localizaciones conflictivas que se proponen a priori en la Tabla 3.

Paso III: Verificar el adecuado posicionamiento del instrumento. El incorrecto posicionamiento genera que las velocidades del flujo registradas no sean representativas de los procesos turbulentos presentes. El primer inconveniente está relacionado a la referencia incorrecta de las coordenadas cartesianas del instrumento respecto a las direcciones longitudinales, transversales y verticales del flujo en los casos que el velocímetro acústico Doppler no disponga de un compás interno. En los casos en que exista una dirección preferencial del flujo los errores por una incorrecta alineación son muy importantes al caracterizar las otras componentes de velocidad. Los efectos de esta referencia incorrecta

en el plano definido por las coordenadas longitudinal (x) y transversal (y) se detallan a continuación para un flujo que presenta velocidades medias  $V_x = 50$  cm/s y  $V_y = 1$  cm/s en las direcciones longitudinales y transversales de flujo. Un error de  $1^\circ$  en la referencia de las direcciones del flujo con los ejes cartesianos genera que las velocidades medias registrada en la dirección transversal sean  $V_x' = 49,99$  cm/s y  $V_y' = 1,87$  cm/s lo que implica que la referencia correcta del instrumento es muy importante para caracterizar las velocidades de flujo en las direcciones transversales al flujo principal. Otro inconveniente relacionado al incorrecto posicionamiento del instrumento fue analizado por Rusello et al. (2006), quien observó que la falta de perpendicularidad con la dirección principal del flujo genera importantes efectos de estela del instrumento perturbando el flujo sobre el volumen de medición afectando, en gran medida, la incertidumbre de las mediciones de las velocidades de flujo. Las compañías fabricantes de velocímetros acústicos Doppler mejoraron el diseño de los instrumentos de última generación para minimizar el efecto intrusivo sobre el flujo, pero los efectos están aún presentes aunque las magnitudes son menores. Finalmente, la falta de rigidez en el dispositivo adoptado para sostener el velocímetro acústico Doppler genera vibraciones debido a la interacción con el flujo durante el proceso de medición. Estas vibraciones, que generan fluctuaciones adicionales en la señal de velocidad registrada, se pueden visualizar claramente mediante la presencia de un pico máximo en el espectro de energía coincidente con la frecuencia de oscilación propia del dispositivo de sujeción. Es conveniente evitar este problema durante el registro de la señal ya que un procesamiento posterior de la señal (filtrado) para remover esos efectos removerá también energía turbulenta real correspondiente a las frecuencias incluidas en ese ancho de banda.

Paso IV: Verificar que se cuenta con un nivel aceptable de partículas presentes en el agua (sedimentos, organismos pequeños, burbujas), que reflejarán los pulsos acústicos y que se asumen que se desplazan a la misma velocidad del agua y tienen una inercia muy pequeña. La verificación se realiza monitoreando, en una medición preliminar con el velocímetro acústico Doppler, el parámetro que relaciona la amplitud de la señal acústica recibida y el ruido ambiente (SNR). Valores de SNR bajos (menores a 15db) indicarían poca presencia de partículas que reflejan la señal acústica lo que demanda agregar partículas extras al flujo (por ejemplo talco industrial). Nuevas técnicas de velocimetría acústica Doppler que añaden un cuarto receptor (ver Nortek Vectrinos de laboratorio y de campo) requieren un nivel suficientemente alto de dispersión acústica del fluido, y por ello requieren un nivel alto de partículas que reflejen el pulso acústico.

## 2.2.ACTIVIDADES RECOMENDADAS DURANTE LA ETAPA DE CONFIGURACIÓN DE REGISTRO DE LOS ADV

Paso V: Para determinar la configuración de registro óptima se deben estimar a priori los valores de la velocidad convectiva  $U_c$  y de la mayor escala de longitudes  $L$  del proceso turbulento en cada zona de flujo a analizar. La relación de estos dos parámetros ( $L/U_c$ ) provee un estimador del valor de la escala de tiempo integral del proceso turbulento  $T$ . Para estimar los valores de estos parámetros hidráulicos se recomienda realizar una medición preliminar de velocidad de larga duración (por ejemplo media hora).

Paso VI: Determinar la longitud de registro  $T_m$  óptima para cada zona de flujo de interés. La longitud de registro  $T_m$  que se adopte dependerá de los objetivos planteados en el Paso 1 (y los parámetros turbulentos requeridos). Los tiempos de medición óptimos se

determinan analizando la incertidumbre esperada en la estimación de los parámetros turbulentos, sobre la base de series de velocidad de larga duración registradas en diversas localizaciones, las que a su vez serán sub-muestreadas con distintas duraciones. Para cada una de las sub-series conformadas se aplica la técnica de remuestreo MBB para estimar la incertidumbre de los siguientes parámetros: a) a la media de cada componente de velocidad  $u$ ,  $v$ ,  $w$  en las direcciones longitudinal, transversal y vertical ( $x$ ,  $y$   $z$ ) respectivamente; b) a las varianzas de las señales de las componentes de velocidad  $u'^2$ ,  $v'^2$ ,  $w'^2$ ; c) a la energía cinética turbulenta, TKE; y d) a las tensiones de Reynolds  $\langle u' w' \rangle$ ;  $\langle u' v' \rangle$ ;  $\langle v' w' \rangle$ . En cada caso la técnica MBB se aplica con 1000 replicaciones. Sobre la base de los resultados proporcionados se calcularon los correspondientes coeficientes de variación, CV, definidos como la relación entre el error desvío estándar y el valor medio de cada parámetro.

Paso VII: Determinar la frecuencia de registro óptima y el tamaño del volumen de medición. Gil Montero et al. (2014) demostraron que los parámetros turbulentos (a excepción de las velocidades medias) calculados sobre la base de mediciones de velocidad realizadas con ADV tienden a estar sesgados negativamente como consecuencia de los promedios espaciales y temporales llevados a cabo por el instrumento durante las mediciones. Se pudo comprobar que este efecto disminuye en la medida que la distancia adimensional  $F_{st}$  aumenta; donde

$$F_{st} = \frac{z}{L_{ADV}}$$

$z$ : distancia desde el centro del volumen de medición al fondo

$L_{ADV}$ : escala de longitud característica de la medición con ADV. Refiere a la estructura más pequeña que puede ser muestreada por el instrumento,  $L_{ADV} = \text{Máximo}[L, \phi, h_v]$

$L$ : escala de longitud advectiva,  $L = \frac{U_c}{f_R}$  siendo  $U_c$ : velocidad de convección de las estructuras presentes y  $f_R$ : frecuencia de registro de datos;  $\phi$ : diámetro del volumen de medición,  $\phi=6 \text{ mm}$ ; y  $h_v$ : altura del volumen de medición.

En dicho trabajo se concluyó que los resultados pueden considerarse satisfactorios cuando el valor de  $F_{st}$  supera al valor de 5. Este valor, para el caso de mediciones a realizarse con ADV Vectrino, pueden utilizarse para definir, tanto la altura del volumen de medición,  $h_v$ , como la frecuencia de adquisición de datos,  $f_r$  óptimos. En principio se podría plantear operar el instrumento con una mínima altura de volumen y un valor alto de  $f_R$ , de modo tal de lograr valores de  $F_{st}$  tan grandes como sean posibles. Sin embargo no debe desconocerse que volúmenes de medición pequeños y frecuencias de registro elevadas se traducen en niveles significativos de ruido Doppler, por lo que al establecer  $h_v$  y  $f_R$  debe tratarse de optimizar  $F_{st}$ , tratando de mantener los niveles de ruidos Doppler tan bajos como sean posibles. Por otra parte, como  $L_{ADV}$  se define como el máximo valor entre  $[L; \phi; h_v]$  disminuir  $h_v$  o incrementar  $f_R$  de modo tal que  $L$  y  $h_v$  sean menores que 6 mm no tiene sentido, ya que de ser así estaría dominando la promediación espacial impuesta por  $\phi$ .

Paso VIII: Definir el rango de velocidades, define la velocidad de flujo máxima que se puede medir con el instrumento. El usuario debe seleccionar el rango de velocidades más bajo que incluya la velocidad máxima instantánea esperada en un experimento dado, ya que el ruido presente en las señales de velocidad registradas con velocímetros acústicos Doppler es proporcional al rango de velocidad; así las series registradas con los rangos de velocidad más altos tienen niveles de ruidos más altos.

Paso IX. Verificar la selección de los parámetros de configuración a través de un análisis de sensibilidad en cada región maximizando SNR y correlación. En los casos que sea necesario (y que sea posible) se evaluará la alternativa de agregar partículas trazadoras en suspensión al flujo.

Paso X: Determinar experimentalmente los parámetros físicos del fluido a medir. El monitoreo continuo de los parámetros físicos del fluido a medir (temperatura, salinidad) durante el proceso de medición es necesario para determinar la velocidad del sonido en el medio. Como se explicó anteriormente, los velocímetros acústicos Doppler que emplean la metodología de Pulso Coherente utilizan la velocidad del sonido en el medio para calcular la velocidad de flujo a partir del corrimiento de fase observado en las señales acústicas, y además para determinar la distancia de la sonda a la frontera. Esto implica que la incorrecta determinación del valor de los parámetros (lo que genera un valor incorrecto de la velocidad de sonido en el medio) genera dos efectos inmediatos en los perfiles de velocidad de flujo observados utilizando velocímetros acústicos Doppler: el valor de velocidad del flujo no es el correcto y la distancia a la frontera reportada por el instrumento es distinta a la real. SI bien es posible efectuar correcciones por ambos efectos al procesar la señal, en todos los casos es necesario conocer los valores reales durante la medición de los parámetros físicos del fluido (Sontek, 1997). Los velocímetros acústicos Doppler de última generación incluyen sondas para medir temperatura y no requieren a priori que la temperatura sea definida por el usuario. Aun en estos casos, los autores de este capítulo recomiendan monitorear experimentalmente estas variables para validación y/o corrección en caso de que la sonda del instrumento no funcione correctamente.

### 2.3. ACTIVIDADES REQUERIDAS RECOMENDADAS DURANTE LA ETAPA DE REGISTRO DE SEÑALES DE VELOCIDAD CON ADV

Paso XI: se deben verificar a cada instante las condiciones experimentales presentes, verificando que no haya variaciones en los caudales que se transformen en incrementos de la profundidad del flujo, cambios en los parámetros físicos del fluido que modifiquen la velocidad del sonido en el medio, etc. Entonces habría que aclarar que esta metodología y todo lo desarrollado se refiere a flujos estacionario

Paso XII: Verificar presencia de problemas de comunicación durante la medición.

Paso XIII: Verificar presencia de valores anómalos durante la medición.

Paso XIV: Verificar que los niveles de partículas trazadoras sean suficientes

### 2.4. ACTIVIDADES REQUERIDAS RECOMENDADAS DURANTE LA ETAPA DE PROCESAMIENTO

Paso XV: XV. Exportar los datos registrados con ADV (inicialmente registrados en formato binario) en formato de texto.

Paso XVI: El procesamiento de las señales de velocidad registradas con velocímetros acústicos Doppler requiere las actividades de detección y eliminación de los datos anómalos. Las señales de velocidad del flujo pueden presentar en algunos casos, valores extremos anómalos (denominados “spikes” en inglés), originados por distintas razones como por ejemplo la presencia de velocidades de flujo que exceden al rango de velocidad

seleccionado en la configuración del instrumento, por contaminación de pulsos previos reflejados desde contornos de geometrías complejas, por falta de partículas trazadoras en el agua, cuando los niveles de turbulencia son muy elevados, etc. Estos valores anómalos presentes en la señal generan errores (sesgo) en la determinación de los parámetros de la turbulencia que se estiman sobre la base de estas series. Existen diversos métodos en la actualidad que permiten detectar y remover los valores anómalos, los que deben usarse en conjunto con alguna estrategia de reemplazo del dato removido. El reemplazo del valor anómalo detectado no es requerido para el cálculo de los momentos estadísticos pero es esencial para los cálculos de todos los parámetros de la turbulencia derivados a partir del espectro de energía y de las funciones de autocorrelación. Entre las técnicas de reemplazo de valores anómalos más utilizados se pueden mencionar al reemplazo con el último valor correcto registrado previamente, al reemplazo con el valor interpolado a partir del ajuste a un polinomio de tercer grado utilizando 12 puntos válidos a cada lado del dato anómalo (24 datos en total, Goring and Nikora 2002) y el reemplazo por una simple interpolación lineal entre los datos válidos registrados antes y después del valor anómalo. Las distintas técnicas de filtrado y reemplazo de valores anómalos han sido evaluadas por Jesson et al. (2013), quienes desarrollaron una aplicación Java para análisis de datos experimentales, la cual se puede bajar libremente de [www.mikejesson.com](http://www.mikejesson.com). Otras técnicas se encuentran implementadas en el software ExploreV, recomendado por Nortek para procesar los datos de velocidad obtenidos con ADV Vectrino.

Paso XVII: Evaluar el nivel de energía del ruido de la señal. La presencia de ruido en las señales registradas por el instrumento puede afectar en gran medida el valor calculado de todos los parámetros de la turbulencia. La presencia de ruido en las señales de velocidad puede afectar la estimación de ciertos parámetros de la turbulencia. Nikora and Goring (1998) señalaron que la principal fuente de ruido en las mediciones que se realizan con velocímetros acústico doppler es el ruido Doppler. García et al. (2005) analizaron la importancia relativa de la energía del ruido Doppler con respecto al total de la energía turbulenta capturada con los ADV, señalando que cuando el impacto del ruido es alto se requieren correcciones a los parámetros de la turbulencia que se estimen. El ruido Doppler tiene las características del ruido blanco (Nikora and Goring 1998; Lemming and Lhermitte 1999; Mc Lelland and Nicholas 2000) con una distribución de probabilidad Gaussiana, esto es media cero y varianza finita (Nikora and Goring 1998), así como también un espectro de potencia plano (Anderson and Lohrmann 1995), es decir afecta de igual modo a todas las componentes de frecuencias de la señal (espectro de potencia constante sobre el rango de frecuencias muestreadas) lo cual indica la presencia de ruido sin correlación. La presencia de ruido blanco en las señales de velocidad medidas con ADV no afecta el cálculo de los valores medios (Nikora and Goring, 1998; Voulgaris and Trowbridge 1998) ni el de las Tensiones de Reynolds (McLelland and Nicholas, 2000), mientras que las estimaciones de la energía cinética turbulenta se encuentra sesgada hacia valores más altos (Nikora and Goring 1998). Puesto que el ruido blanco produce falta de correlación en la señal la función de autocorrelación reduce su valor a cero más rápido que cuando se verifica presencia de ruido, al tiempo que el espectro de potencia resulta sesgado a valores altos (Lohrmann et al. 1994; Nikora and Goring 1998).

Para algunas condiciones de medición el ruido blanco se puede identificar como un aplanamiento del espectro próximo a la frecuencia de Nyquist ( $f_p/2$ ) (García 2015). En esos casos Nikora and Goring (1998) sugieren que el espectro de dicho ruido se puede representar por una línea horizontal recta cuyas ordenadas son igual al promedio de las

ordenadas espectrales del ruido. Esta técnica fue llamada “Análisis espectral” por Voulgaris and Trowbridge (1998), quienes proponen calcular la energía asociada al ruido a partir del nivel de energía detectado en la cola del espectro, en un rango de frecuencias tal que garantice 10 estimaciones para el cálculo del promedio estadístico., por ej 11.5-12.5 Hz para una frecuencia de registro de 25 Hz (García 2015).

Paso XVIII: Calcular los parámetros de la turbulencia requeridos en el estudio y/o proyecto corrigiendo los efectos del ruido Doppler en base a los niveles de ruido Doppler detectados en el punto anterior (García et al 2006a). El espectro de energía turbulenta de cada componente de velocidad se puede corregir simplemente restando el nivel del ruido al espectro calculado a partir de los datos medidos. Las varianzas de cada componente de velocidad, y por lo tanto la energía cinética turbulenta, se pueden calcular a partir de la integración del espectro de potencia corregido. A partir de la transformada inversa de Fourier puede estimarse la función de autocorrelación corregida por la presencia de ruido en la señal.

Paso XIX: Determinar los intervalos de confianza de los parámetros. Es común que se presenten resultados de mediciones sin estimaciones de errores involucrados en esta etapa. Estos errores se definen como la diferencia entre el valor real del parámetro y el valor medido, pero la magnitud de este error es difícil de cuantificar debido a que el valor real es incierto. Las causas de errores en el proceso de medición pueden ser debido a: errores en la configuración del experimento, limitaciones físicas para la técnica de medición, errores estadísticos debido a que la muestra señal aleatoria, y errores debido a la metodología utilizada para calcular los diferentes parámetros. García et al. (2006) propone aplicar la técnica remuestreo utilizando bloques móviles (Moving Block Bootstrap, MBB), que estima con buena precisión los intervalos de confianza para los parámetros turbulentos, calculando las desviaciones debido a los errores estadísticos de la turbulencia cuando se generan mediciones repetidas de los parámetros, con una misma configuración experimental, con el mismo instrumento y aplicando la misma metodología.

### **3. SINTESIS: GUIA PRÁCTICA**

A continuación se sintetizan los principales requisitos anteriormente mencionados y analizados que se deben satisfacer para realizar mediciones de velocidad en flujos turbulentos con VELOCÍMETROS ACÚSTICOS DOPPLER.

#### **Etapa 1: Preparación del Experimento**

- I. *Definir los objetivos del estudio experimental. A partir de ellos se definirían los parámetros turbulentos requeridos (Valores medios, Energía cinética turbulenta, Esfuerzos de Reynolds, Escalas de longitud de las estructuras turbulentas, etc.).*
- II. *Definir las zonas de flujo que se desea caracterizar. Se debe tener en cuenta las zonas conflictivas para registrar señales de velocidad con ADV (zonas cercana a la superficie, fondo y zonas de interferencia acústica).*

- III. *Posicionar el instrumental verificando su orientación, verticalidad y robustez para evitar vibraciones. Verificar además la adecuada comunicación del instrumental.*
- IV. *Con la instalación experimental en funcionamiento agregar partículas trazadoras en suspensión. Se recomienda utilizar el material proporcionado por los fabricantes, talco industrial o sedimentos muy finos.*

## **Etapa 2: Configuración de Registro de los ADV**

- V. *Estimar a priori los parámetros hidráulicos (en particular la velocidad convectiva de los vortices,  $U_c$ ) en cada zona de flujo a analizar. Estimar la escala de tiempo  $T$  del proceso turbulento analizado ( $T = L/U_c$ ). Para ello se recomienda registrar señales de velocidad de larga duración.*
- VI. *Determinar longitud de registro  $T_m$  óptima para cada parámetro turbulento requerido y la zona de flujo de interés estimando las incertidumbres asociadas a la estimación de cada parámetro usando MBB sobre señales de velocidad de distinta longitud. Para estudios que incluyan la definición de distintos parámetros, se debe adoptar la mayor longitud de registro estimada.*
- VII. *Determinar la frecuencia de registro y el tamaño del volumen de medición óptimos en cada región de flujo a analizar para caracterizar los parámetros de la turbulencia.*
- VIII. *Definir el rango de velocidades de velocidades óptimo.*
- IX. *Verificar la selección de los parámetros de configuración a través de un análisis de sensibilidad en cada región maximizando SNR y correlación. En los casos que sea necesario (y que sea posible) se evaluará la alternativa de agregar partículas trazadoras en suspensión al flujo.*
- X. *Determinar los parámetros físicos del fluido a medir (temperatura, salinidad) necesarios para determinar la velocidad del sonido en el medio. Se debe evaluar la variación de estos parámetros durante el proceso de medición.*

## **Etapa 3: Registro de señales de velocidad con ADV**

- XI. *Verificar la estacionariedad de las condiciones hidráulicas e flujo*
- XII. *Verificar presencia de problemas de comunicación durante la medición.*
- XIII. *Verificar presencia de valores anómalos durante la medición.*
- XIV. *Verificar los niveles de partículas trazadoras sean suficientes*

## **Etapa 4: Procesamiento y de análisis de la información registrada**

- XV. *Exportar los datos registrados con ADV (inicialmente registrados en formato binario) en formato de texto.*
- XVI. *Procesamiento de la señal para remover valores anómalos y reemplazarlos en caso que el objeto del estudio requiera analizar la correlación temporal de la señal.*
- XVII. *Procesamiento de la señal para definir los niveles de ruido Doppler en la señal.*
- XVIII. *Calcular los parámetros de la turbulencia requeridos en el estudio y/o proyecto corrigiendo los efectos del ruido Doppler en base a los niveles de ruido Doppler detectados en el punto anterior (Garcia et al 2006a).*

- XIX. *Determinar los intervalos de confianza de cada uno de los parámetros de la turbulencia estimados usando la metodología detallada en Garcia et al (2006b).*

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Anderson S., and Lohrmann A. (1995). "Open water test of the Sontek acoustic Doppler velocimeter". Proc. IEEE Fifth Working Conf. on Current Measurements, St.Petersburg. FL. IEEE Oceanic Engineering Society . 188-192.
- Bendat, J. and Piersol, A. (1993). *Engineering applications of correlation and spectral analysis*. Second edition. Wiley. New York.
- García C., Cantero M., Niño Y., and García M. (2005). "Turbulence measurements with Acoustic Doppler Velocimeters". *J.Hydr. Engrg. ASCE*. 131, 1062-1073.
- García C., and García M. (2006a). "Characterization of flow turbulence in large-scale bubble-plume experiments". *Experiment in Fluids*. DOI: 10.1007/s00348-006-0161-6.
- García C., Jackson P., and García M. (2006b). "Confidence intervals in the determination of turbulence parameters". *Experiment in Fluids*. 40: 514 – 522.
- Goring D., Nikora, V. (2002). "Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data". *J. Hydr. Engrg. ASCE*, Volume 128, (1), 117-126.
- Lemmin U., and Lhermitte R. (1999). "Discussion of 'ADV measurements of turbulence: Can we improve their interpretation?' by Nikora,V., and Goring, D." *J.Hydr. Engrg. ASCE*. 125, 987-988.
- Lenschow, D., Mann, J., and Kristensen, L. (1994). "How long is long enough when measuring fluxes and other turbulence statistics?". *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 11(3), 661-673.
- McLelland S. and Nicholas A. (2000). "A new method for evaluating errors in high-frequency ADV measurements". *Hydrological Processes*. 14, 351-366.
- Nikora V., and Goring D. (1998). "ADV measurements of turbulence: Can we improve their interpretation?" *J.Hydr. Engrg. ASCE*. 124, 630-634.
- Nezu I, Nakagawa H. 1993. *Turbulence in open-channel flows*. IAHR Monograph, Balkema, Rotterdam
- Pope S. (2000). *Turbulent flows*. Cambridge. United Kingdom.
- Precht, Elimar; Janssen, Felix; and Huettel, Markus (2006). *Near-bottom performance of the Acoustic Doppler velocimeter (ADV) – a comparative study*. *Aquatic Ecology*, 40: 481-492.

Rusello, Peter; Lohrmann, Atle; Siegel Eric y Maddux, Tim. (2006). Improvements in Acoustic Doppler Velocimetry. 7<sup>th</sup> International Conference on Hydrosience and Engineering (ICHE-2006), Sep 10 – Sep 13, Philadelphia, USA.

SonTek (1997). Pulse coherent Doppler processing and the ADV Correlation. SonTek Technical notes.

Sreenivasan, K; Chambers, A., and Antonia, R. (1978). “Accuracy of moments of velocity and scalars fluctuations in the atmospheric surface layer”. *Boundary –layer meteorology*. 14, 341 – 359. Soulsby, R. (1980). “Selecting Record Length and Digitization Rate for Near-Bed Turbulence Measurements”. *Journal of Physical Oceanography*. 10(2), 208–219.

Tennekes, H. and Lumley, J (1972). *A First Course in Turbulence*. Cambridge, MA, USA: MIT Press

Voulgaris G., and Trowbridge J. (1998). "Evaluation of the acoustic Doppler velocimeter (ADV) for turbulence measurements". *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 15, 272-288.

**Doctorado en Ingeniería**  
**Mención recursos hídricos**

Título de la obra:

**Interacción entre el flujo turbulento y los procesos de erosión junto a estribos de puentes protegidos. Estudio experimental**

Autor: Graciela Beatriz Scacchi

Lugar: Santa Fe, Argentina

Palabras Claves:

estribos de puentes, flujo turbulento, erosión,  
protección del lecho, manta flexible, campo bidimensional del flujo,  
campo tridimensional del flujo