

EVALUACIÓN DE ESCALAS CARACTERÍSTICAS, EVENTOS COHERENTES Y SIMILITUD DE PARED EN FLUJO SOBRE LECHO CON DUNITAS SUPERIMPUESTAS A DUNAS.

Mónica Mattar⁽¹⁾; Fabián López⁽²⁾

⁽¹⁾ Instituto de Recursos Hídricos-Universidad Nacional de Sgo. del Estero. ⁽²⁾ Investigador del INA-Profesor Titular. UNC.

⁽¹⁾ Avda. Belgrano (S) N°1912. Telef. N°0385-4-372354. Int.1906. Santiago del Estero.
e-mail: mmattar@unse.edu.ar

⁽²⁾ Dirección actual: DiPAS – Humberto Primo N° 607. Tel. N°0351-4-342000/1. Córdoba
e-mail: fabian.lopez@cba.gov.ar

RESÚMEN

En hidráulica fluvial clásica el flujo se caracteriza por poseer un lecho aluvial con material no cohesivo, de tal modo que al ser superada la tensión de corte crítica para la iniciación del movimiento, el lecho se torna inestable dando origen a diferentes formas de fondo conocidas como rizos, dunas y antidunas, según el tamaño del sedimento, el esfuerzo de corte actuante y la condición del flujo. La dinámica de fluido sobre formas de fondo es bastante compleja debido a la fuerte interacción que existe entre la propia forma de fondo y el flujo de agua y sedimento por lo que se torna difícil predecir las características del flujo aún cuando se conozca bien la forma del lecho, ya que ésta depende también de las características del flujo cerca de la misma. Concretamente existe una fuerte interrelación de dependencia entre las características del flujo, las características del lecho y el transporte de sedimentos. En el presente trabajo experimental se determinaron las componentes en las tres direcciones de la velocidad en un canal experimental con formas de fondo fijas, haciendo uso de un velocímetro acústico Doppler marca SonTek, y se realizó un estudio comparativo entre las características turbulentas existentes en flujo sobre dunas y sobre un lecho poco estudiado como es el formado por dunitas superimpuestas a dunas. Se determinó particularmente las longitudes de reenganche, las escalas espaciales características y los eventos coherentes y se evaluó también la hipótesis de similitud de pared para luego hacer un estudio comparativo de los resultados obtenidos en ambas condiciones de flujo.

ABSTRACT

In classic fluvial hydraulics the flow is characterized by an alluvial layer with no cohesive material, so that when the critical shear stress is exceeded for the beginning of motion, the layer turns unstable to produce different bedforms, such as ripples, dunes and antidunes that are functions of sediment size, shear stress and the flow conditions. The dynamics of the fluid motion on bedform is quite complex due to the strong interaction between bedforms and the sediment-laden flow, so the prediction of the flow characteristics is very difficult, even in the case that the bedforms are well defined. Furthermore, there is a strong interrelation of dependence between the flow characteristics, bed features and sediment transport.

In the present experimental work the components in the three directions of the velocity in an experimental channel with bed forms were determined, using an Acoustic Doppler Velocimeter, and a comparative study was carried out between the turbulent characteristics which exists in flow over dunes and over a layer not well known such as the one formed by small dunes superimposed over dunes. The reattachment lengths, the characteristic spatial scales and the coherent events were particularly determined, as well as the hypothesis of wall similarity, in order to perform a comparative study of the obtained results in both flow conditions.

INTRODUCCIÓN

Las formas de fondo de gran escala, dunas y rizos, originados en lechos erosionables, interactuando con el flujo turbulento, son características que se encuentran en canales aluviales naturales. Estas formas de fondo generan un flujo convergente en la proximidad de la cresta, una zona de recirculación aguas abajo de la misma en la cual se manifiesta una gran actividad turbulenta (gran producción y gran disipación de energía turbulenta) y la posterior existencia de un punto de reenganche del flujo.

Es decir que el escurrimiento sobre un fondo con formas de fondo (dunas) completamente desarrolladas (cara de aguas abajo con un ángulo próximo al del reposo del material), no es uniforme ni homogéneo. La separación de la corriente luego de la cresta de la duna, constituye una fuerte perturbación, similar a la producida por un escalón de fondo (Bradshaw y Wong, 1972).

A partir de las primeras investigaciones de Kline et al. (1967), y como consecuencia de múltiples trabajos posteriores, nuestra comprensión de la dinámica de estructuras coherentes turbulentas se encuentra bastante clarificada para el caso de capas límites con paredes o contornos lisos, Robinson (1991). Kline et al. (1967) y Kim et al. (1971) describieron el fenómeno de "bursting", denominándose así a las eyecciones, barridos, interacciones internas e interacciones externas de la producción turbulenta, determinando que, las eyecciones juegan un papel predominante en dicha producción. Las intensas contribuciones intermitentes a las tensiones de Reynolds y a la producción turbulenta (P), son asociadas con las eyecciones y los barridos. Actualmente se sabe que las eyecciones más intensas pueden ocurrir desde el principio de la capa de corte y no sólo desde la zona de reenganche, aunque el potencial para la suspensión de sedimento por estos eventos puede ser mayor en el reenganche, donde los vórtices impactan en el fondo facilitando la intrusión del sedimento al flujo. Así es importante la localización del punto de reenganche. Nelson J., McLean S. y Wolfe, S. (1993); Lyn, D., (1993) estudiaron el flujo en canales abiertos sobre lecho con dunas, determinando que la distancia entre la cresta de la duna y el punto de reenganche del flujo, es decir la longitud de la región de recirculación (x_r) varía aproximadamente entre 3 y 9 veces la altura de la cresta de la forma de fondo.

Otro parámetro significativo en el campo turbulento es el tamaño de los vórtices turbulentos. Las microescalas de Kolmogoroff (η) y Taylor (λ) son las escalas de los vórtices más pequeños y están en función de las variables internas ν (viscosidad cinemática) y ε (disipación de energía turbulenta). La macroescala espacial L_x es la escala de los vórtices más grandes. Así Iseya y Ikeda (1986) y Nezu y Nakagawa (1993), documentaron que fuertes "kolk-boils", eran originados cerca de la zona de reenganche, al resguardo del cuerpo de la duna. Luego, cuando el flujo se torna estable y las dunas están totalmente desarrolladas, cualquier "kolk-boil" que pueda formarse, es demasiado débil como para ser percibido desde el margen de un canal abierto. Los fuertes "kolk-boils", transportan sedimentos hacia la superficie libre. Estas características son como las observadas por Matthes (1947) en ríos, por lo que los "kolk-boils" generados detrás de las dunas, juegan un papel importante en el transporte y resuspensión de sedimentos en ríos (Nezu y Nakagawa, 1991a).

En estos tipos de flujo, según la hipótesis de similitud de pared, existe un importante flujo vertical que transporta energía cinética turbulenta hacia la superficie libre en un estado de equilibrio dinámico, con la existencia de un valor constante del flujo vertical de energía cinética turbulenta (F_{tke}) en la región intermedia ($0,15 < y/h_p < 0,70$). Para alto número de Reynolds el flujo de energía cinética adimensionalizado con la velocidad de corte al cubo, es un valor constante igual a 0,30 (López y García, 1999).

OBJETIVO

El objetivo perseguido en el presente trabajo consistió en caracterizar los eventos coherentes, la dimensión de la región de recirculación e identificar escalas características de longitud y la evaluación de la hipótesis de similitud de pared a lo largo de toda la longitud de onda y en toda la profundidad del flujo, para un lecho con un tren uniforme de dunas y otro con dunitas superimpuestas, comparando luego ambos resultados.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El trabajo se desarrolló en un canal vidriado experimental del laboratorio de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral (Figura N°1). Las dimensiones del canal son: 67 m de largo, 1,50 m de ancho y 1,00 m de alto, el cual está montado en la nave de la Facultad.

Un tramo del lecho del canal está conformado por 16 formas triangulares bidimensionales, periódicas, que abarcan todo el ancho del canal, simulando dunas que guardan semejanza geométrica con las observadas en la faja central del río Paraná, en su tramo medio, en el sector de Villa Urquiza (provincia de Entre Ríos, Argentina), en escala 1:30. De las 16 dunas, las primeras 7 (numeradas en forma ascendente en la dirección del escurrimiento) no poseen dunitas superimpuestas, mientras que sí lo hacen las 9 restantes.

Las mediciones de velocidad se efectuaron a una tasa de 25 Hz., en condiciones de flujo uniforme y permanente, con un caudal de 90 l/s y un tirante medio (h_p) de 0,275 m. Cada punto se midió durante 180 seg. ya que en un trabajo realizado anteriormente (*Mattar et al. 1999*) se determinó éste tiempo como el óptimo, puesto que a partir de allí, los estadísticos estimados (momento de primer y segundo orden) tendían a un valor constante, con un error menor al 2%.

Con el objeto de describir la configuración del flujo, las mediciones se realizaron en 16 perfiles verticales sobre el eje del canal, tomando 14 puntos en cada perfil obteniéndose una grilla de trabajo con 224 puntos.

El origen del sistema de referencia se tomó sobre la forma de fondo del canal coincidente con las progresivas de los perfiles fijando los ejes de coordenadas de la siguiente manera:

- eje **x**: eje longitudinal y positivo en la dirección del escurrimiento.
- eje **y**: eje vertical y positivo hacia arriba.
- eje **z**: eje transversal a la dirección del flujo.

Las mediciones se dividieron en dos partes: en **Med1** las mediciones se efectuaron sobre un tren uniforme de dunas; mientras que en **Med2** las mediciones se realizaron sobre dunas con "dunitas" superimpuestas.

Las progresivas de cada uno de los perfiles medidos se detallan a continuación: Perfil1, prog. 0,0 m (cresta de la duna); Perfil 2, prog. 0,025 m; Perfil3, prog. 0,05 m; Perfil4, prog. 0,075 m; Perfil5, prog. 0,106 m (valle de la duna); Perfil6, prog. 0,16 m; Perfil7, prog. 0,24 m; Perfil8, prog. 0,32 m; Perfil9, prog. 0,40 m; Perfil10, prog. 0,50 m (cresta dunita1); Perfil11, prog. 0,62 m (cresta dunita 2); Perfil12, prog. 1,22 m (cresta dunita 7); Perfil13, prog. 1,58 m (cresta dunita 10); Perfil14, prog. 2,06 m (cresta dunita 14); Perfil15, prog. 2,18 m (cresta dunita 15); Perfil16, prog. 2,30 m (cresta de la próxima duna).

Puede observarse que los perfiles fueron densificados en la zona de recirculación, para obtener así una mejor descripción de la dinámica del flujo.

METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS EMPLEADA Y RESULTADOS OBTENIDOS

Estructuras coherentes

Para el procesamiento de los datos se empleó la técnica de Análisis de Cuadrantes (*Lu y Willmarth, 1973*). Según esta técnica, el aporte relativo de los eventos coherentes a las tensiones de Reynolds, y la fracción de tiempo de aporte, se evalúa de la siguiente forma:

$$Q_{i,H} = \frac{\langle u'v' \rangle_{i,H}}{\overline{u'v'}} \quad \text{y} \quad T_{i,H} = \overline{I_{i,H}(u',v')}$$

para distintos valores umbrales H .

Donde:

$\langle u'v' \rangle_{i,H}$ = contribución desde el cuadrante i , para un valor H

$\overline{u'v'}$ = Tensiones de Reynolds totales por unidad de densidad

$I_{i,H} = 1$, si (u',v') está dentro del cuadrante i y $|u'v'| \geq H|u'v'|$

$I_{i,H} = 0$, en otro caso

Se evaluó la diferencia entre el aporte fraccional desde el cuarto y segundo cuadrante como: $\Delta Q_H = Q_{4,H} - Q_{2,H}$, comprobándose una vez mas cerca del lecho la predominancia de los eventos de barrido sobre los eventos coherentes de eyección para distintos valores umbrales H , como puede observarse en la Figura N°1 para las dos condiciones del lecho en toda la longitud de la onda λ_d .

Para analizar la estructura temporal de las eyecciones y barridos se utilizó la técnica del Muestreo Condicional (Nezu y Nakagawa, 1981). En la Figura N°2 y 3 se comparan los promedios condicionales $\langle u'v' \rangle_e$ encontrados durante la detección de los procesos de eyección y $\langle u'v' \rangle_b$ durante los procesos de barrido para los Perfiles N°5, 8 y 13 a la altura de la capa de corte ($y/h_p = 0,182$) cubriendo así el valle, zona de recirculación y zona de reenganche para las dos condiciones de lecho.

Localización del punto de reenganche

El punto de reenganche se define “**como aquel punto en el cual la velocidad sobre el lecho es cero**” (Kadota y Nezu, 1999). Para la exacta localización del mismo se determinaron aquellos puntos en los cuales la probabilidad de ocurrencia de velocidades negativas era igual a 0,50 (Kadota y Nezu, 1999). Es decir:

$$P_{0,50} = \frac{\sum_{i=1}^n j}{n} \quad \text{con } j=1 \text{ si } u_i < 0 \text{ y } j=0 \text{ en otro caso}$$

Así se obtuvieron las siguientes longitudes de recirculación para las dos condiciones del lecho:

Med1: $x_r \approx 4,11h$

Med2: $x_r \approx 4,87h$

Donde:

x_r = es la distancia desde la cresta hasta el punto de reenganche

h = altura de la cresta de la duna

En la Figura N°4 se incluyeron los puntos encontrados en el presente trabajo. Se puede ver claramente que para flujo subcrítico ($Fr < 1$) a medida que el número de Reynolds crece, x_r/h tiende a un valor constante cercano a 5 y que dicha longitud en el caso de un lecho con tren de dunas es más pequeña que en flujo sobre lecho en escalón debido a la influencia de las dunas entre si y la aceleración del flujo.

ESCALAS DE VÓRTICES

Macroescala L_x

Esta macroescala se determinó como el producto entre la macroescala temporal (Lt) y la velocidad media (U).

$$Lx = Lt \cdot U$$

$$Lt = \text{macroescala temporal} = \int_{-\infty}^{\infty} Ru(\Delta t) \cdot dt$$

$$Ru(\Delta t) = \text{función de autocorrelación de } u(t): \quad Ru(\Delta t) = \frac{\sum_{t=1}^n u'(t) \cdot u'(t + \Delta t)}{\sigma_{u'}^2}$$

En la Tabla N°1 se muestran los valores encontrados de Lx en tres perfiles característicos para las dos condiciones del lecho.

Microescala De Taylor λ

En flujo turbulento isotrópico ($U=V=W$), la microescala de Taylor λ (Nezu y Nakagawa, 1993) se define como:

$$\lambda = \left(\frac{15\nu\sigma_{u'}^2}{\varepsilon} \right)^{0.5}$$

En la Tabla N°2 se muestran los valores encontrados de λ en los tres perfiles característicos para las dos condiciones del lecho.

Microescala de Kolmogorov η

Esta microescala está definida en función de las variables internas ν (viscosidad cinemática) y ε (disipación) como (Friedlander y Topper, 1962):

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{0.25}$$

En la Tabla N°3 se muestran los valores encontrados de η para los tres perfiles característicos de las dos condiciones del lecho.

Similitud de Pared

Con los datos obtenidos experimentalmente se evaluó el flujo vertical de energía cinética turbulenta en ambas condiciones de lecho:

$$Ftke = \frac{1}{2} \overline{(u'^2 + v'^2)} \cdot v' \quad (\text{Antonia y Luxton, 1971})$$

Se pudo observar que dicho valor adimensionalizado con la velocidad de corte ($Ftke/U_*^3$) no es un valor constante e igual a 0,30. En la figura N°6 se graficaron las curvas de nivel para los valores de $Ftke/U_*^3 = 0,20, 0,30$ y $0,40$ para ambas condiciones experimentales.

CONCLUSIONES

➤ A la altura de la capa de corte ($y/h_p=0,182$) existe una marcada predominancia de los eventos de eyección sobre los eventos coherentes de barrido. Por debajo de la misma se desarrolla una estela formada por los eventos de barridos que en las dos condiciones del lecho tiene un espesor similar desde la zona de recirculación hasta la progresiva 120. A partir de ésta, el espesor aumenta gradualmente para el tren de dunas (Med1) hasta alcanzar la próxima cresta independientemente del valor umbral H . La predominancia de

los eventos de barridos por sobre los de eyección en las proximidades del lecho y consecuentemente el aumento del esfuerzo de corte total, podría influenciar en los elementos de resuspensión y transporte de sedimentos en dicha zona.

- La longitud de recirculación encontrada en las dos condiciones del lecho: *Med1*: $x_r \approx 4,11h$ y *Med2*: $x_r \approx 4,87h$ esta dentro del rango encontrado por *Kadota y Nezu (1999)*; *Nakagawa y Nezu (1989)* y otros investigadores como se ve en la Figura N°4. En el presente trabajo en *Med2* la longitud es un 16% mayor que en *Med1*.
- La macroescala L_x es aproximadamente un 10% mayor en *Med2*.
- En la microescala de Taylor se observa una fluctuación entre los valores encontrados en *Med1* y *Med 2* en el orden de un 2% y 3%.
- En la microescala de Kolmogorov se observa una fluctuación entre los valores encontrados en *Med1* y *Med 2* en el orden de un 3% y 4%.
- No se cumple la hipótesis de similitud de pared para el tipo de flujo estudiado.

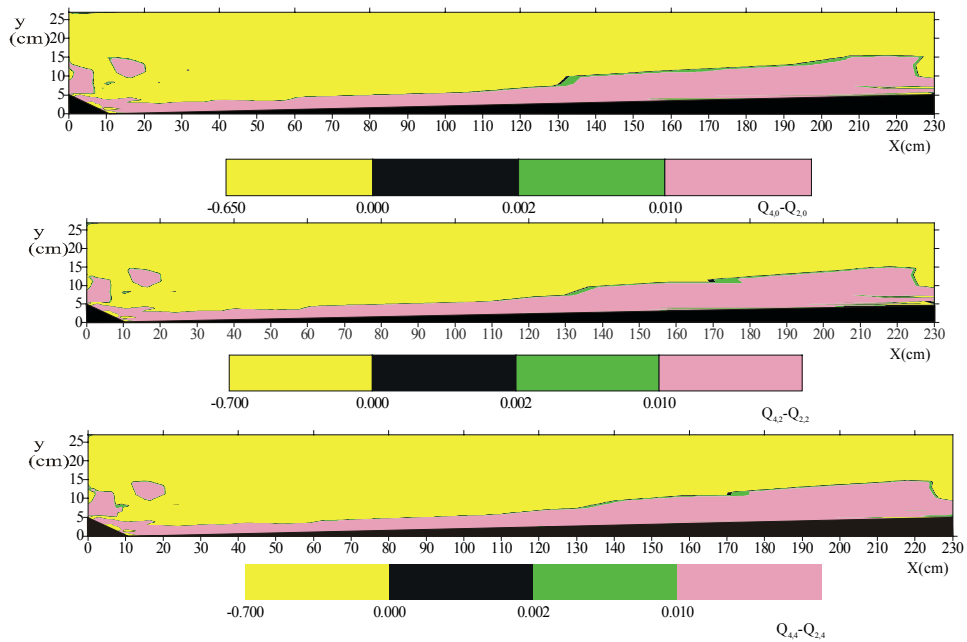


Figura N°1. Mapa de la variación de ΔQ_H en toda la longitud de onda en **Med 1**

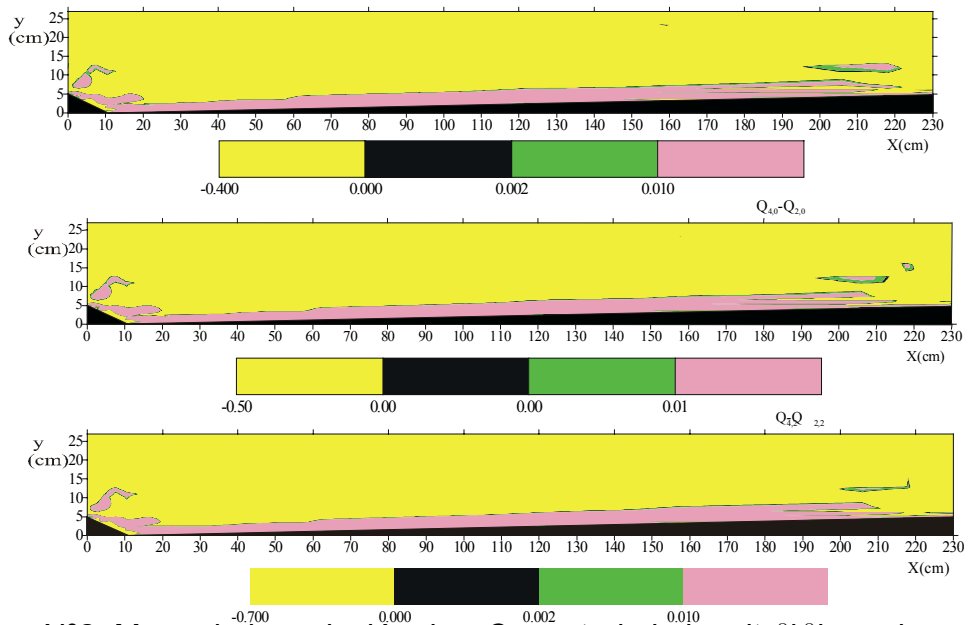


Figura N°2. Mapa de la variación de ΔQ_H en toda la longitud de onda en **Med 2**

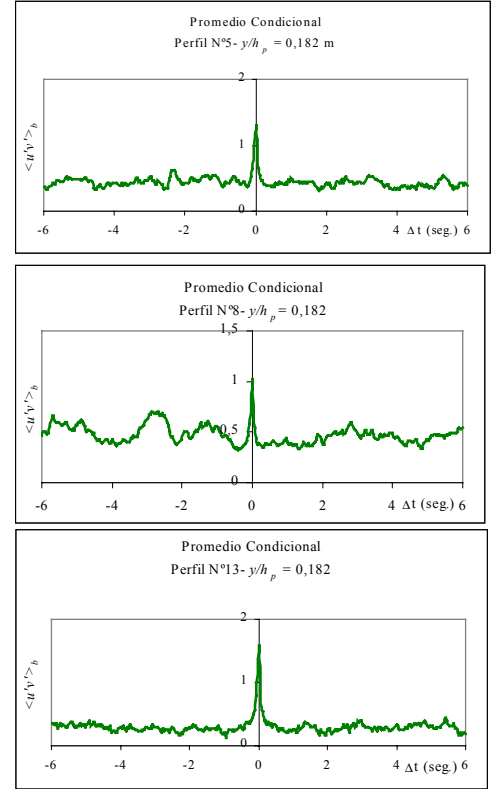
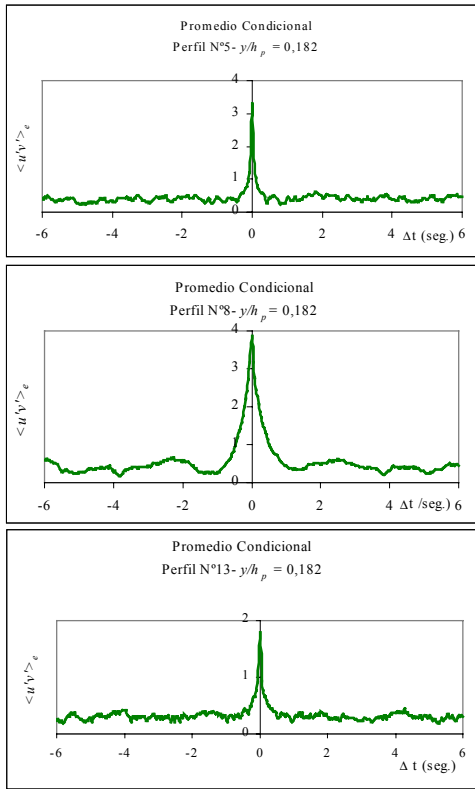


Figura N°3. Correlaciones para los eventos de eyección y barrido a una distancia $y=0,05$ m desde el lecho. **Med1**

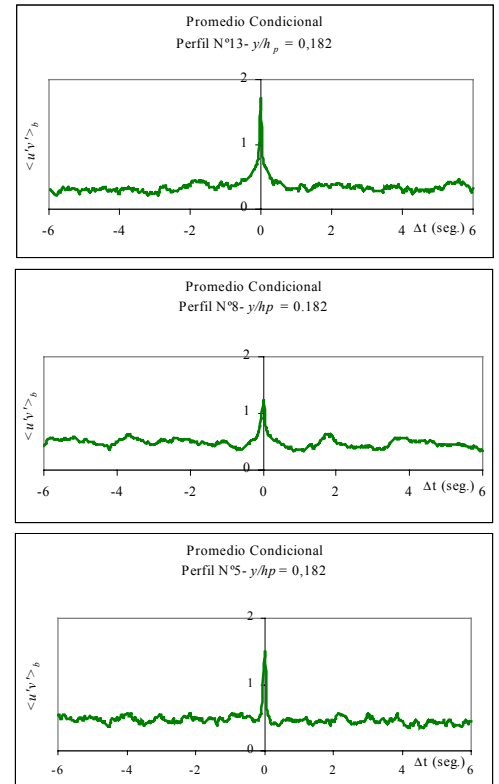
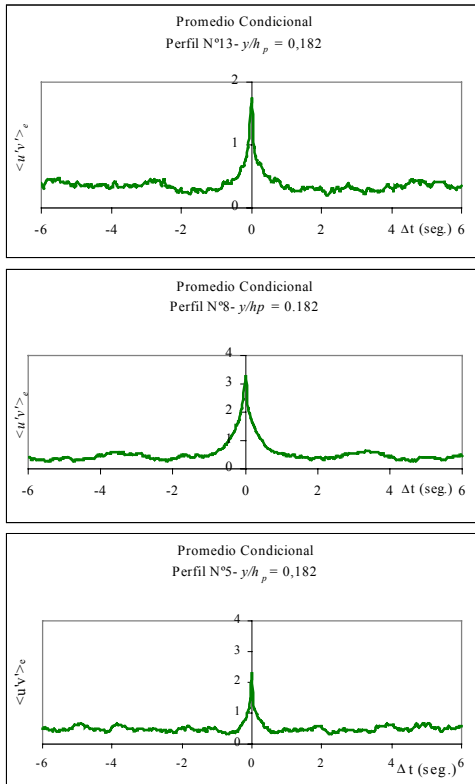


Figura N°4. Correlaciones para los eventos de eyección y barrido a una distancia $y = 0,05$ m desde el lecho. **Med2**

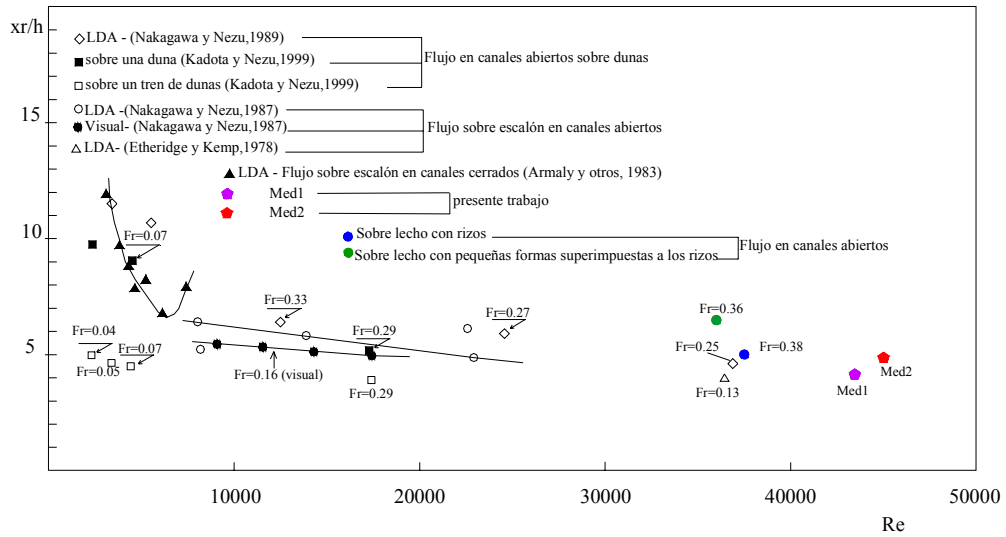


Figura N°5. Variación de la longitud de reenganche en función del Re para diferentes Fr .

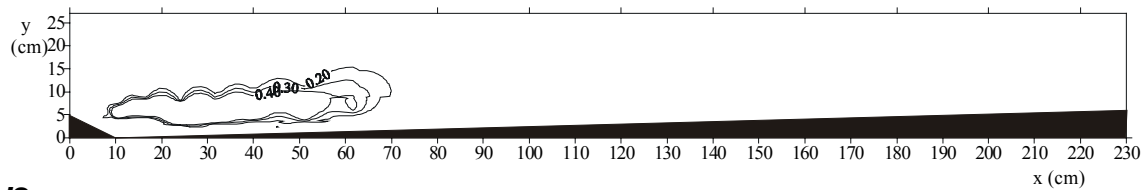
y/h_p	Med 1								
	L_x (m)			λ (m)			η (m)		
	Perfil N°5	Perfil N°8	Perfil N°13	Perfil N°5	Perfil N°8	Perfil N°13	Perfil N°5	Perfil N°8	Perfil N°13
0,0073	0,0118	0,0249	0,0785	0,0048	0,0055	0,0120	0,00022	0,00020	0,00032
0,0145	0,0200	0,0269	0,0851	0,0059	0,0057	0,0125	0,00025	0,00020	0,00033
0,0218	0,0222	0,0319	0,0968	0,0061	0,0057	0,0128	0,00025	0,00019	0,00034
0,0291	0,0210	0,0327	0,0892	0,0057	0,0059	0,0128	0,00024	0,00019	0,00034
0,0364	0,0181	0,0299	0,0897	0,0051	0,0058	0,0128	0,00022	0,00019	0,00034
0,0545	0,0139	0,0380	0,0909	0,0048	0,0062	0,0124	0,00021	0,00019	0,00032
0,0727	0,0064	0,0420	0,0834	0,0030	0,0062	0,0132	0,00016	0,00019	0,00035
0,1091	0,0126	0,0679	0,0954	0,0037	0,0072	0,0135	0,00015	0,00020	0,00036
0,1818	0,0871	0,0995	0,1037	0,0100	0,0092	0,0132	0,00025	0,00023	0,00034
0,2909	0,1144	0,0544	0,1201	0,0146	0,0119	0,0137	0,00039	0,00030	0,00035
0,4000	0,1180	0,1194	0,0938	0,0154	0,0145	0,0139	0,00040	0,00039	0,00034
0,5455	0,0576	0,0730	0,1370	0,0135	0,0131	0,0151	0,00033	0,00032	0,00038
0,7273	0,1352	0,1213	0,1152	0,0159	0,0164	0,0170	0,00041	0,00043	0,00043
0,8000	0,0975	0,1083	0,1076	0,0184	0,0178	0,0171	0,00049	0,00048	0,00044

Tabla N°1. Valores de escalas de vórtices en **Med1**

y/h_p	Med 2								
	L_x (m)			λ (m)			η (m)		
	Perfil N°5	Perfil N°8	Perfil N°13	Perfil N°5	Perfil N°8	Perfil N°13	Perfil N°5	Perfil N°8	Perfil N°13
0,0073	0,0083	0,0246	0,0898	0,0048	0,0048	0,0118	0,00024	0,00018	0,00032
0,0145	0,0109	0,0279	0,0969	0,0054	0,0054	0,0116	0,00025	0,00019	0,00031
0,0218	0,0130	0,0330	0,0895	0,0057	0,0054	0,0121	0,00025	0,00018	0,00032
0,0291	0,0076	0,0392	0,1063	0,0043	0,0056	0,0124	0,00022	0,00018	0,00032
0,0364	0,0143	0,0358	0,1023	0,0059	0,0056	0,0125	0,00025	0,00018	0,00033
0,0545	0,0029	0,0428	0,0989	0,0026	0,0061	0,0128	0,00016	0,00019	0,00034
0,0727	0,0080	0,0524	0,1039	0,0039	0,0065	0,0128	0,00019	0,00019	0,00033
0,1091	0,0158	0,0741	0,1113	0,0054	0,0072	0,0129	0,00021	0,00019	0,00034
0,1818	0,0726	0,1056	0,1223	0,0083	0,0094	0,0132	0,00021	0,00023	0,00034
0,2909	0,1216	0,0559	0,0912	0,0143	0,0176	0,0133	0,00037	0,00031	0,00033
0,4000	0,1359	0,1343	0,0951	0,0148	0,0141	0,0133	0,00037	0,00036	0,00032
0,5455	0,1461	0,1007	0,1324	0,0157	0,0162	0,0144	0,00040	0,00037	0,00035
0,7273	0,1466	0,1374	0,1215	0,0158	0,0158	0,0165	0,00040	0,00040	0,00042
0,8000	0,1145	0,1088	0,1333	0,0179	0,0166	0,0167	0,00046	0,00042	0,00043

Tabla N°2. Valores de escalas de vórtices en **Med2**.

Med1



Med2

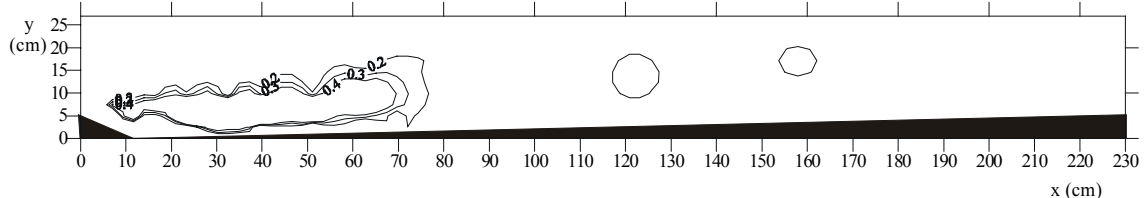


Figura N°6. Curvas de nivel para $Ftke/U_*^3 = 0,20; 0,30$ y $0,40$ para las dos condiciones de lecho.

Referencias Bibliográficas

- BRADSHAW**, P y F.Y.F. Wong 1972. "The reattachment and relaxation of a turbulent shear layer". J.Fluid Mech. 52(1), 113-135.
- FRIEDLANDER**, F y **TOPPER**, L., 1962. "Turbulence: Classical papers on statistical theory. Interscience, New York.
- ISEYA**, F. y H. Ikeda 1986. "Effect of dune development on sediment suspension under unsteady flow conditions". Proc. Of 30 th Japanese Conference on Hydraulics, JSCE, 505-510.
- KADOTA**, A.y I. Nezu 1999. "Three-dimensional structure of space-time correlation on coherent vortices generated behind dune crest". J. Hydraulic Research. Vol. 37, 59-81.
- KIM**, H.T., S.J. Kline y W.C. Reynolds 1971. "The production of turbulence near a smooth wall in a Turbulent Boundary Layer. J. Fluid Mech.,50:133-160.
- KLINE**, S.J., W.C. Reynolds, F.A. Schraub y P.W. Runstadler 1967. "The structure of turbulent boundary layers. J. Fluid Mech., 30: 741-773.
- LOPEZ**, F., M.H. García 1999. " Wall Similarity in Turbulent Open-Channel Flow". J. of Engineering Mech.789-796.
- MATTAR**, M.T., A. Tevez, H. Toniolo, R. Fernández y F. López 1999. "Mean flow and turbulence structure over dunes with superimposed smaller bedforms". Anales del 28th Congreso Internacional de la IAHR, Gaz, Austria.
- MATTHES**, G.H. 1947. "Macroturbulence in natural stream flow". Trans., Amer. Geophy. Union, 28:255-265.
- NELSON**, J.M., S.R. McLean y S.R. Wolfe 1993. "Mean flow and turbulence fields over two dimensional bed forms". Water Resources Res., 29:3935-3953.
- LYN**, D.A. 1993. "Turbulence measurements in open-channel flows over artificial bedforms". J. Hydraulic. Engrg., ASCE 119(1) 306-326.
- NEZU**, I y H. Nakagawa 1981. "Detection criterion of coherent structures in turbulent open-channel flow. Proc. Of 25 th Japanese Conference on Hydraulics, pp. 439-445.
- NEZU**, I y H. Nakagawa 1991a. "Turbulent structures over dunes and its role on suspended sediments in steady and unsteady open-channel flows". Int. Symp. on Transport of Suspended Sediments and its Mathematical Modeling, IAHR, Florence, Italy, 165-190.
- NEZU**,I y H. Nakagawa 1993. "Turbulence in open-channel flows". Monograph Series . IAHR.

Lista de Símbolos

u_i, v_i = velocidades instantáneas medidas en el dirección principal y vertical, respectivamente.

u', v' = fluctuación temporal respecto de la velocidad media de las correspondientes componentes de velocidad.

$\langle u' \rangle_e, \langle v' \rangle_e, y \langle u'v' \rangle_e$ = promedios condicionales durante la detección de los procesos de eyección.

$\langle u' \rangle_b, \langle v' \rangle_b, y \langle u'v' \rangle_b$ = promedios condicionales durante la detección de los procesos de barridos.

n = número total de velocidades instantáneas medidas en el punto, durante 180 segundos.

h_p = profundidad media del flujo (27,5 cm).

h = altura de cresta de la duna (5,0 cm).

λ_d = longitud total de onda (230 cm).

y = altura del punto de medición medido a partir del perfil de la duna.

x_r = distancia desde la cresta hasta el punto de reenganche.

Re = número de Reynolds del flujo.

Fr = número de Froude.

H = valor umbral.

$Q_{i,H}$ = fracción de aporte a la tensión de corte total, por parte de los eventos del cuadrante i a un valor umbral H .

$T_{i,H}$ = fracción de tiempo de aporte, a la tensión de corte total.

Lx, Lt = macroescala espacial y temporal respectivamente.

λ = microescala de Taylor.

η = microescala de Kolmogorof