

01190



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

027555

**"ESTRUCTURAS TURBULENTAS Y  
MECANISMOS DE TRANSPORTE DE  
SEDIMENTOS"**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE  
DOCTORA EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:**

**MARÍA JOSELINA ESPINOZA AYALA**

**DIRECTOR DE TESIS: DR. POLIOPTRO MARTÍNEZ AUSTRIA**



**CAMPUS MORELOS, MÉXICO**

**2001**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*“Todo conocimiento respecto a la realidad comienza con la experiencia y termina en ella; las conclusiones obtenidas por vías puramente racionales están, en relación con la realidad, enteramente vacías”*

A. Einstein, *On the method of theoretical physics*, Oxford, 1933

## RESUMEN

El objetivo del presente estudio fue investigar las estructuras turbulentas del flujo en relación con los mecanismos de transporte de sedimento. Esta investigación se realizó en tres series sistemáticas de experimentos: 1) flujo sobre fondo fijo liso, 2) flujo sobre formas de fondo triangulares y 3) fondo móvil. Las mediciones de velocidad instantánea y características turbulentas en dos direcciones; longitudinal y vertical, se obtuvieron con un anemómetro de película caliente. Las técnicas de visualización usadas fueron: inyección de tinta, generación de burbujas de hidrógeno y adición de partículas. La visualización se realizó simultáneamente en dos planos x-y (plano de mayor cortante) y x-z ( en planta). Para conocer la evolución de la estructura del flujo a través del tiempo y simultáneamente obtener la velocidad en varios puntos de la estructura, se usó la técnica de visualización con generación de burbujas de hidrógeno. Con una cámara de alta velocidad Kodak Ektapro se siguieron las trayectorias de las burbujas y con el software MAW( motion analysis work station) se estimaron los perfiles de velocidad instantánea en secuencia.

*Flujo sobre fondo fijo-liso:* Se identificaron y caracterizaron las estructuras coherentes típicas de la región cercana a la pared ( $y^+ = 50$ ) para  $Re = 12,000$ . La autocorrelación de velocidades instantáneas en la dirección principal del flujo definió el tiempo de duración de las estructuras,  $t = 1.7s$ . Con la velocidad de convección se determinó la longitud de dichas estructuras  $\lambda_x = 0.25$  m. Con la visualización en dos planos se logró conocer algunos aspectos de la tridimensionalidad de las estructuras en la región cercana a la pared. La comparación de los resultados obtenidos con los reportados por otros autores; Kovaznay (1992), Bogard (1986) y Nezu (1981) fue importante en la validación de las técnicas experimentales y del equipo de medición.

*Flujo sobre fondo triangular:* Se obtuvieron los perfiles de velocidad media en dos direcciones por medio de sensores cruzados a  $90^\circ$  para  $12,000 < Re < 28,400$ . Los perfiles de velocidad indicaron entre otras cosas la longitud de la zona de recirculación  $L \approx 5h$  (h es la altura de la forma). Las características turbulentas  $u'/u^*$  y  $v'/u^*$  fueron del orden de magnitud y estructura semejante a las reportada por Lyn (1993). Los perfiles de esfuerzos de Reynolds mostraron valores máximos a lo largo de la capa cortante de separación de flujo hasta el punto de reattachment. Se observaron y caracterizaron

## SUMMARY

The objective of this study was systematically investigate the flow structure and the sediment transport mechanics. Three series of experiments were carried out in a laboratory channel: flow over flat bed, flow over triangular bed forms and movable bed.

Flow visualization in two planes (plan and side views) was made by dye injection and seeding particles. Turbulence measurements with a hot film anemometer and instantaneous velocity profiles with bubble wire generation technique were conducted. These measurements will help to clarify the structure of the vortices.

*Flat bed.* Near the wall flow structures were identified and characterized for  $Re=12,000$ . The time scale of the vortical structures at  $y^+ = 50$  defined by the autocorrelations, was 1.7s. The streamwise length of the vortical structures,  $\lambda_x=25$  cm. Tridimensionality of the vortical structures was confirmed.

*Fixed bed forms.* Mean velocity profiles, turbulence intensities and Reynolds stresses were obtained with a hot film anemometer for  $12,000 < Re < 28,400$ . Flow structures were classified into five kinds, on the basis of their different generation mechanisms: Kelvin Helmholtz waves, boils, vertical vortices like little tornados, funnel vortices and recirculating flow or eye vortex. Instantaneous velocities were simultaneously measured at different points, with bubble wire generation technique to know the dynamic of coherent structures behind dunes. Through topological streamline patterns analysis was possible to find schematic model in four phases dealing with the changing dynamics of the flow separation zone. Mathematic equations were proposed to modeling the flow patterns in each phase.

*Movable bed.* The interaction between the flow structure, the bed forms and sediment transport was investigated for  $4.37 < Re. < 6.68$ . The sediment was volcanic sand with mean diameter of 0.19mm with geometric standard deviation of  $\sigma_g = 1.293$ . The bed forms observed were ripples for  $Re. = 4.37$  and dunes with superposed ripples for  $Re. = 6.38$ . Measurements of the sediment concentration was carried out to find evidence of the effect of the bed forms in the sediment transport processes. The Van Rijn concentration profiles formula predicted well the local values of concentration for low flow rate. In the case for  $Re. = 6.68$ , the equation only predicted the values corresponding to the present ones near the

## DEDICATORIAS

A mis padres: *Ramón Espinosa Mejía y Clementina Ayala Corona*

A mis hermanos: *Guadalupe, Luz María, Ramón, Francisco, Alejandro, Miguel, Juan Bosco, Carlos y Arturo*

En especial a mi esposo: *José Alfredo González*

A mis hijos: *Alfredo, Cristina y Lucía*

## AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer a mi director de tesis Dr. Polioptro Martínez Austria por su sólido apoyo en la realización de este trabajo de investigación.

Al Dr. Jorge Rojas por su valiosa participación en la investigación.

A los Doctores: Felipe Arreguín Cortés, Jaime Cervantes de Gortari, Alejandro Rodríguez Valdéz, Alvaro Muñoz Mendoza, Carlos Escalante Sandoval, quienes con sus observaciones y sugerencias contribuyeron al enriquecimiento de la tesis.

A los Ingenieros: Jesús Figueroa, Edgar Antunez, Suemmy Martínez, Ignacio Caldiño, y Salvador Vargas, por su dedicación y apoyo en los experimentos. En especial a David Marín quién construyó y adaptó algunos equipos usados en los experimentos. A Alejandro Cisneros por su apoyo en la obtención de las imágenes y grabación de videos.

A mis profesores de la UMSNH y de la DEPMI-UNAM

Al Dr. Enzo Levi por iniciarme en el estudio de las estructuras turbulentas.

Al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y al CONACyT.

## CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1.1
2. ESTRUCTURAS COHERENTES EN TURBULENCIA	2.1
2.1 <i>Capa límite</i> .....	2.1
2.2.1 <i>Regiones de la capa límite y sus distribuciones de velocidad asociadas</i> .....	2.2
2.2 <i>Estructuras coherentes</i> .....	2.5
2.2.1 <i>Estrías y burst</i> .....	2.6
2.3 <i>Estructuras turbulentas y su relación con la suspensión de sedimento</i> ....	2.9
2.4 <i>Características del flujo turbulento en canales</i> .....	2.14
2.4.1 <i>Ecuaciones del flujo medio</i> .....	2.14
2.4.2 <i>Ecuaciones de energía turbulenta</i> .....	2.15
2.5 <i>Subdivisión del flujo en canales y sus características</i> .....	2.18
2.4 <i>Antecedentes acerca de estructuras turbulentas, formas de fondo y su relación con el transporte de sedimentos</i> .....	2.20
3. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL Y EQUIPO	3.1
3.1 <i>Descripción de la instalación experimental</i> .....	3.1
3.2 <i>Equipo y técnicas experimentales</i> .....	3.3
3.2.1 <i>Medición de turbulencia en flujos de agua</i> .....	3.3
3.2.2 <i>Técnica de anemometría de película caliente</i> .....	3.4
3.2.3 <i>Técnicas de visualización de flujo</i> .....	3.6
3.3 <i>Programa de experimentos, procedimiento experimental y procesamiento de datos</i> .....	3.9
3.3.1 <i>Programa de experimentos</i> .....	3.9
3.3.2 <i>Procedimiento experimental</i> .....	3.11
3.3.3 <i>Procesamiento de datos</i> .....	3.11

4. ESTUDIO DE LA ESTRUCTURA DEL FLUJO SOBRE UN FONDO PLANO LISO (CASO CANÓNICO).....	4.1
<b>4.1 Antecedentes</b> .....	4.1
<b>4.2 Instalación experimental y experimento tipo</b> .....	4.9
<b>4.3 Resultados experimentales</b> .....	4.10
4.3.1 Visualización de flujo y caracterización de estructuras coherentes	4.10
4.3.1.1 Análisis de la visualización de las estructuras coherentes con registros simultáneos de velocidad instantánea.....	4.14
4.3.2 Distribuciones de velocidad medias puntuales en la dirección X, comparadas con otros autores.....	4.15
4.3.3 Correlaciones y escalas espacio temporales de las estructuras coherentes, comparación con otros autores.....	4.18
<b>4.4 Análisis de resultados</b> .....	4.20
5. ESTUDIO DE LA ESTRUCTURA DEL FLUJO SOBRE FORMAS DE FONDO FIJAS.....	5.1
<b>5.1 Antecedentes</b> .....	5.1
<b>5.2 Instalación experimental y procedimiento</b> .....	5.6
<b>5.3 Análisis clásico de resultados y comparación con otros autores</b> .....	5.9
5.3.1 Velocidad media.....	5.9
5.3.1.1 Perfiles de déficit de velocidad.....	5.18
5.3.2 Intensidad de turbulencia y esfuerzos de Reynolds.....	5.22
<b>5.4. Visualización de flujo y Clasificación de estructuras turbulentas</b> .....	5.32
5.4.1 Generación de burbujas de hidrógeno para la obtención de perfiles de velocidad instantáneos.....	5.39
<b>5.5 Visualización de trayectorias de partículas</b> .....	5.56
<b>5.6 Conclusiones</b> .....	5.64
6. TOPOLOGÍA DEL FLUJO SOBRE FORMAS DE FONDO FIJAS Y DINÁMICA DEL SISTEMA.....	6.1
<b>6.1 Introducción</b> .....	6.1

<b>6.2 Antecedentes</b> .....	6.2
6.2.1 Clasificación de puntos críticos.....	6.2
6.2.2 Estabilidad estructural.....	6.5
6.2.3 Topologías, casos típicos.....	6.7
6.2.4 Bifurcaciones, simetrías, rompimientos.....	6.9
6.2.5 Sistemas dinámicos.....	6.11
6.2.5.1 Elementos de la teoría de sistemas dinámicos.....	6.12
6.2.6 Puntos fijos y puntos periódicos.....	6.15
6.2.7 Secciones de Poincaré.....	6.16
6.2.8 Sistemas Hamiltonianos.....	6.18
<b>6.3 Topología del flujo detrás de un obstáculo</b> .....	6.20
6.3.1 Separación.....	6.21
6.3.2 Estructuras vorticosas detrás de un obstáculo.....	6.23
<b>6.4 Dinámica de los estados fase del flujo sobre formas de fondo, caso de estudio</b> .....	6.27
6.4.1 Topologías de los patrones de flujo sobre formas de fondo fijas.....	6.27
6.4.2 Modelación de los patrones de flujo sobre formas de fondo fijas.....	6.32
<b>6.5 Conclusiones</b> .....	6.36
<b>7. MECANISMOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS</b> .....	7.1
<b>7.1 Introducción</b> .....	7.1
<b>7.2 Estructuras coherentes observadas en el flujo sobre formas de fondo bidimensionales fijas Caso no canónico unifásico y mecanismos de transporte de partículas</b> .....	7.3
7.2.1 Separación de flujo y Ondas de Kelvin Helmholtz.....	7.4
7.2.1.1 Separación.....	7.4
7.2.2.2 Capa cortante.....	7.5
7.2.2 Vórtices verticales como pequeños tornados.....	7.7
7.2.3 Vórtices longitudinales tipo cono.....	7.8
7.2.4 Vórtice transversal al flujo (tipo ojo).....	7.10
7.2.5 Boils.....	7.11

7.2.5.1	Detección de eventos Boils.....	7.16
7.2.5.2	Características de los Boils observados.....	7.17
7.2.5.3	Comparación con otros estudios.....	7.24
7.3	<b><i>Experimentos en un flujo sobre fondo móvil, formas de fondo tridimensionales Caso no canónico bifásico y mecanismos de transporte de sedimentos.....</i></b>	<b>7.27</b>
7.3.1	Descripción de la instalación experimental y experimentos.....	7.27
7.3.2	Perfiles de fondo.....	7.28
7.3.3	Transporte en suspensión.....	7.32
7.3.4	Esfuerzos cortantes.....	7.34
7.4.5	Observaciones.....	7.36
7.3.6	Mecanismos de transporte de sedimentos en un flujo sobre formas de fondo tridimensionales reales.....	7.36
7.4	<b><i>Modelo Conceptual de la estructura del flujo sobre formas de fondo.....</i></b>	<b>7.42</b>
7.5	<b><i>Conclusiones.....</i></b>	<b>7.44</b>
8.	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>8.1</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
	<b>ANEXO 1</b>	

## LISTA DE TABLAS

		Pág.
Tabla 2.1.	Comparación de datos del movimiento de una partícula relacionados con el proceso bursting.....	2.12
Tabla 3.1.	Programa experimental.....	3.15
Tabla 4.1.	Parámetros hidráulicos para los experimentos típicos caso canónico.....	4.10
Tabla 5.1.	Resumen de las investigaciones acerca del flujo sobre formas de fondo fijas en canales de laboratorio.....	5.3
Tabla 5.2	Características de los experimentos para el caso no canónico.....	5.8
Tabla 7.1	Características del experimento tipo, boils.....	7.17
Tabla 7.2.	Parámetros característicos de los eventos <i>boils</i> analizados.....	7.18
Tabla 7.3	Características de los diferentes tipos de boils observados .....	7.23
Tabla 7.4.	Resumen de datos experimentales, fondo móvil.....	7.28
Tabla 7.5.	Datos y rango de variables de varios autores incluyendo los del presente estudio.....	7.30

## LISTA DE LÁMINAS

	Pág.
Lámina 2.1. Regiones de la capa límite.....	2.2
Lámina 2.2 Leyes de distribución de velocidades en cada región de la capa límite.....	2.5
Lámina 2.3 Estructuras coherentes típicas que ocurren en la capa límite turbulenta, sobre una pared plana.....	2.6
Lámina 2.4 Modelo conceptual de estructuras coherentes en un canal.....	2.7
Lámina 2.5. Cuadrantes de velocidades instantáneas en el plano uv.....	2.8
Lámina 2.6. Ciclo completo de la trayectoria de una partícula vista lateral.....	2.11
Lámina 2.7 Secuencia de imágenes que muestra la interacción de una partícula con una capa cortante.....	2.13
Lámina 2.8. Coordenadas y características del flujo en un canal (Nezu 1993).....	2.14
Lámina 2.9. Esquema del mecanismo de transporte de energía turbulenta, de generación a disipación.(Nezu 1993).....	2.18
Lámina 2.10 Sub-división del campo de flujo en un canal. (Nezu 1993)	2.19
Lámina 2.11. Macro remolinos sobre una forma del fondo, tomados con una cámara moviéndose a la velocidad del flujo Zanke (1986).....	2.23
Lámina 2.12 Representación esquemática de la distribución espacial de los eventos de cada cuadrante en porcentaje, usando un umbral $H=2$ . (Bennett y Best, 1995).....	2.24
Lámina 2.13. Modelo conceptual de la formación e inestabilidad de un tubo vorticoso detrás de una duna (Muller y Gyr, 1986).....	2.26
Lámina 2.14. Eventos Boils generados en el punto de reattachment de las formas de fondo en evolución.....	2.26
Lámina 2.15. Representación esquemática de la distribución espacial de los eventos de cada cuadrante en porcentaje, Bennett y Best 1995.....	2.27
Lámina 3.1 Instalación experimental.....	3.2
Lámina 3.2 Diagrama de las formas de fondo.....	3.3
Lámina 3.3. Instalación experimental con formas de fondo.....	3.3
Lámina 3.4. Sensores de película caliente, a) de un solo hilo, b) hilo doble en "X" a 90°.....	3.6
Lámina 3.5. Esquema general del sistema de medición y visualización	3.9

Lámina 4.1	Modelo de vórtices longitudinales que rotan en sentidos contrarios, estrías de baja velocidad. Blackwelder y Kaplan, 1976.....	4.4
Lámina 4.2,	Modelo de la estructura de la capa límite con vórtices primarios, secundarios, con estrías longitudinales de baja velocidad, Smith y Walker(1990).....	4.5
Lámina 4.3.	Modelo de estructuras vorticosas dentro de la capa límite, Robinson (1990a).....	4.6
Lámina 4.4.	Esquema conceptual de las estructuras de un flujo a superficie libre y el proceso del bursting, Rashidi (1997).....	4.8
Lámina 4.5.	Visualización de flujo en la región de la pared para una capa límite sobre una placa plana.....	4.11
Lámina 4.6.	Secuencia de imágenes, muestra la formación y rompimiento de estructuras vorticosas cerca de la pared para $Re=12,000$ . Intervalo entre fotografías de 0.16s.....	4.12
ámina 4.7.	Estructura del flujo y variación de la velocidad longitudinal $u$ para diferentes tiempos.....	4.15
Lámina 4.8.	Distribución de velocidades, $U^+ \equiv U/U_0$ vs $y^+$ .....	4.17
Lámina 4.9.	Correlaciones temporales $R_{uu}(\tau)$ para $y^+ = 47.5$ .....	4.20
Lámina 5.1.	Definición de las características del flujo en una forma de fondo, vista de perfil.....	5.2
Lámina 5.2.	Formas de fondo en el canal de pruebas.....	5.7
ámina 5.3.	Localización de las secciones de medición con anemometría de película caliente sobre una forma de fondo.....	5.8
Lámina 5.4	Perfiles de velocidad media $U$ y $V$ para $Re = 14,400$ .....	5.10
Lámina 5.5.	Perfiles de velocidad media $U$ y $V$ para $Re = 18,400$ .....	5.11
Lámina 5.6.	Perfiles de velocidad media adimensionales suavizados $U/U_0$ y $V/U_0$ vs $Y/H$ para $Re = 14,400$ .....	5.13
Lámina 5.7.	Perfiles de velocidad media adimensionales suavizados $U/U_0$ y $V/U_0$ vs $Y/H$ para $Re = 18,400$ .....	5.14
Lámina 5.8.	Características turbulentas en la cresta de un rizo artificial, McCorquodale y Giratalla(1973).....	5.16
Lámina 5.9.	Perfiles de velocidad media.....	5.17
Lámina 5.10.	Perfiles de déficit de velocidad semilogarítmica para el presente estudio $Re = 18,400$ .....	5.19
Lámina 5.11.	Perfiles de déficit de velocidad en escala semilogarítmica para los experimentos de Lyn(1993).....	5.21
Lámina 5.12.	Perfiles de déficit de velocidad en escala semilogarítmica para los experimentos de Delft (1988).....	5.22
Lámina 5.13.	Perfiles verticales de la raíz media cuadrada (rms) de las	

	fluctuaciones de velocidad $u'/u_*$ y $v'/u_*$ para $Re = 18,400$ .....	5.23
Lámina 5.14.	Intensidades de turbulencia adimensionales: a) $u'/u_*$ ( $\diamond =$ caso 2 de Lyn, 1993).....	5.25
Lámina 5.15.	Intensidades de turbulencia características de los experimentos de Delft.....	5.26
Lámina 5.16.	Intensidades de turbulencia máximas observadas a través de la capa cortante en función de la relación tirante/altura de la forma (H/h) por Best (1996).....	5.27
Lámina 5.17.	Esfuerzos cortantes de Reynolds $u'v'$ para $Re = 18,400$	5.29
Lámina 5.18	Esfuerzos de Reynolds. a) $\diamond$ Caso 2 de Lyn (1993); b) Experimentos de Delft (1988).....	5.31
Lámina 5.19.	Modelo esquemático de las estructuras turbulentas para rizados, transición y dunas, Best(1996).....	5.32
Lámina 5.20.	Ondas de Kelvin-Helmholz en la cresta de la duna para $Re = 18,400$ .....	5.35
Lámina 5.21.	Visualización con partículas; levantamiento de las partículas por los boils.....	5.36
Lámina 5.22.	Vórtices en forma de pequeños tornados que se originan en el punto más bajo detrás de la cresta de la duna.	5.37
Lámina 5.23.	Vórtices tipo cono, en un canal con fondo plano. Kaftori <i>et al</i> (1995).....	5.38
Lámina 5.24.	Vórtice transversal tipo ojo, visualización con burbujas de hidrógeno.....	5.38
Lámina 5.25.	Representación esquemática de los diferentes tipos de estructuras turbulentas generadas detrás de una forma de fondo en un canal de laboratorio.....	5.39
Lámina 5.26.	Secuencia de distribuciones de velocidad con burbujas de hidrógeno, en la sección $x/h = 0$ , para $H = 0.08m$ y $Re = 18,400$ . $\Delta t$ (entre campos) = 0.24s.....	5.42
Lámina 5.26	Perfiles de velocidad instantáneos con burbujas de b) hidrógeno en la sección $x/h = 0$ , para $H = 0.08m$ y $Re \approx 18,400$ . $\Delta t$ (entre campos) = 0.24s.....	5.43
Lámina 5.27.	Secuencia de distribuciones de velocidad con burbujas de hidrógeno, en la sección $x/h = 1.0$ , para $H = 0.08m$ y $Re = 18,400$ . $\Delta t$ (entre campos) = 0.24s.....	5.48
Lámina 5.27	Perfiles de velocidad instantáneos con burbujas de a) hidrógeno en la sección $x/h = 1$ . Se muestran las velocidades en la recirculación para $H = 0.08m$ y $Re = 18,400$ .....	5.49
Lámina 5.28.	Secuencia de distribuciones de velocidad con la técnica de burbujas de hidrógeno del presente estudio en la sección	

	$x/h=2.5$ , para $H=0.08\text{m}$ y $Re=18,400$ . $\Delta t$ (entre campos) = $0.24\text{s}$ .....	5.50
Lámina 5.29.	Secuencia de distribuciones de velocidad con la técnica de burbujas de hidrógeno en la sección $x/h=6.25$ , para $H=0.08\text{m}$ y $Re=18,400$ .....	5.51
Lámina 5.30.	Fotografía de un boil, formado fuera de la región de mezclado y que alcanza la superficie libre, Müller, (1986).	5.51
Lámina 5.31.	Desarrollo a través del tiempo de la línea marcada con tinta entre la región de recirculación de flujo y la corriente principal, Müller y Gyr, 1986.....	5.53
Lámina 5.32.	Estrías obtenidas con la técnica de burbujas de hidrógeno, para el flujo en un canal con fondo plano. Utami y Ueno (1987).....	5.54
Lámina 5.33.	Campos de velocidades obtenidos de los promedios temporales de velocidad instantánea, técnica de burbujas de hidrógeno, para $H=0.08\text{m}$ , $Re=18,400$ .....	5.58
Lámina 5.34.	Líneas de corriente vistas en planta para un rizo; a) Ikeda y Asaeda (1983), b) Asaeda <i>et al</i> (1989).....	5.58
Lámina 5.35.	Secuencia de fotografías de la región de recirculación en un estudio experimental con partículas de arena.....	5.59
Lámina 5.36.	Suspensión de arena fina por eventos turbulentos en la pendiente descendente de la forma de fondo, tomados cada $0.4\text{s}$ . Onslow <i>et al</i> (1993).....	5.60
Lámina 5.37.	Secuencia de fotografías que muestra el movimiento de las partículas.....	5.61
Lámina 5.38.	Secuencia de imágenes de burbujas de hidrógeno mostrando el desarrollo y rompimiento de la estructura detrás de la duna.....	5.62
Lámina 5.39.	Trayectorias de partículas observadas en video.....	5.63
Lámina 5.40.	Trayectorias de partículas que se desprenden de la pared hacia la superficie libre.....	5.63
Lámina 5.41.	Trayectorias de las partículas mostrando la zona de recirculación definida.....	5.64
Lámina 6.1.	Clasificación de puntos críticos. a) en un plano $p-q$ . b) Puntos críticos en los límites I,II,III y en el origen, IV. (Perry y Chong, 1987).....	6.6
Lámina 6.2.	Nodos adyacentes y punto silla, Lighthill (1963).....	6.8
Lámina 6.3.	Topologías de flujos típicos para el plano de mayor cortante, Nodos N, sillan S.(Antonia, 1988).....	6.8
Lámina 6.4.	Diagrama de la bifurcación, a) bifurcación supercrítica, b) bifurcación supercrítica. (Tobak y Peake, 1982).....	6.10
Lámina 6. 5.	Puntos fijos de un mapa y periódicos de un flujo.....	6.16
Lámina 6.6.	Sección de Poincaré.....	6.17

Lámina 6.7	Trayectoria periódica de período 2.....	6.18
Lámina 6.8.	Esquema general de un sistema Hamiltoniano integrable.....	6.20
Lámina 6.9	Separación y reattachment, características del flujo detrás de un escalón (Driver <i>et al.</i> , 1987).....	6.21
Lámina 6.10.	Separación bidimensional (Gyr, 1992).....	6.22
Lámina 6.11	Separación tridimensional (Gyr,1992).....	6.23
Lamina 6.12	Vista instantánea de líneas de corriente para el flujo detrás De una placa u obstáculo (Smits,1982).....	6.23
Lámina 6.13	Líneas de corriente medias y puntos singulares en el eje central de un obstáculo con simetría axial. a) flujo laminar. b) flujo turbulento. (Hunt <i>et al.</i> , 1978).....	6.25
Lámina 6.14.	Fase1 de la evolución de estructuras coherentes detrás de una duna; crecimiento de la capa límite (Müller,1996).....	6.25
Lámina 6.15.	Fase 2 de la evolución de estructuras coherentes detrás de una duna: a) separación y formación del primer vórtice; b) patrón topológico de líneas de corriente de la fase2. (Müller 1996).....	6.26
Lámina 6.16.	Estados-fase observados en la visualización del flujo sobre formas de fondo fijas bidimensionales del caso de estudio.....	6.28
Lámina 6.17.	Visualización con burbujas de hidrógeno, formación y rompimiento de la estructura del vórtice ojo.....	6.31
Lámina 6.18	Líneas de corriente correspondientes a la función de corriente de la ecuación 6.16, para $A=0.8$ . (La distancia entre vórtices es de $2\pi$ ; $\Delta\psi$ es constante entre líneas de corriente.(Ottino, 1997).....	6.33
Lámina 7.1.	Esquema descriptivo de las características de una duna.....	7.3
Lámina 7.2.	Modos de separación observados por Muller, 1992.....	7.4
Lámina 7.3	Diagrama esquemático de la inestabilidad inicial de la capa cortante, y el enrollamiento en vórtices discretos. ....	7.6
Lámina 7.4	Vórtices tipo cono.....	7.9
Lámina7.5.	Suspensión de partículas por el <i>vórtice ojo</i> transversal al flujo.....	7.11
Lámina 7.6.	Origen de los boils a partir de la pendiente aguas abajo de la duna. a) según Jackson (1976). b) desprendimiento de vórtices (Müller y Gyr 1986).....	7.13
Lámina 7.7	Mecanismo de producción de boils, Nezu <i>et al</i> 1997.....	7.16

Lámina 7.8.	Puntos de desprendimiento de partículas.....	7.18
Lámina 7.9.	Puntos de levantamiento de partículas observados en el presente estudio, relacionados con los boils.....	7.20
Lámina 7.10.	Características de los eventos boil tipo I.....	7.21
Lámina 7.11.	Característica de los eventos boils tipo II.....	7.21
Lámina 7.12.	Características de los eventos boils tipo III.....	7.22
Lámina 7.13..	Características de los eventos boils tipo IV.....	7.22
Lámina 7.14.	Características de los eventos boils tipo V.....	7.23
Lámina 7.15.	Período adimensional $UT/H$ contra $Re$ .....	7.25
Lámina 7.16.	Período del boil contra rugosidad relativa.....	7.26
Lámina 7.17.	Perfiles longitudinales al centro del canal.....	7.29
Lámina 7.18.	Formas de fondo en el canal del laboratorio Enzo Levi del IMTA, para $Re. = 5.61$ .....	7.29
Lámina 7.19.	Clasificación de las formas de fondo criterio de Ranga Raju.....	7.30
Lámina 7.20.	Histograma de frecuencias de las elevaciones del fondo.....	7.31
Lámina 7.21	Relación elevación media-número de Reynolds.....	7.32
Lámina 7.22.	Perfiles de concentración en el eje central del canal.....	7.33
Lámina 7.23.	Concentración media medida por diferentes investigadores.....	7.34
Lámina 7.24.	Perfiles de concentración medidos y calculados.....	7.35
Lámina 7.25.	Factor de fricción vs. $u_*$ .....	7.35
Lámina 7.26.	Mecanismos de transporte de sedimentos observados en el flujo sobre formas de fondo móvil.....	7.37
Lámina 7.27.	Migración de dunas en dos fases.....	7.39
Lámina 7.28.	Vórtices transversales y capa cortante entre el flujo hacia fuera y hacia la pared.....	7.41
Lámina 7.29.	Interacción de las diferentes estructuras.....	7.41
Lámina 7.30.	Modelo conceptual de la formación y rompimiento de estructuras.....	7.43

## NOMENCLATURA

A	constante en la ecuación de van Driest ( $A=27$ )
B	ancho del canal
c	concentración media
d	tirante
D	diámetro del sedimento
f	Factor de fricción
$f$	frecuencia
Fr	número de Froude, $U/(gh)^{1/2}$
g	constante gravitacional
H	umbral método del cuadrante
H	tirante medio del flujo
$H$	Hamiltoniano
$h$	altura de la forma de fondo
k	Intensidad de vórtices puntuales
L	longitud de onda de la forma de fondo
Lr	longitud de la región de recirculación
n	número de datos
N	nodo
P	Punto fijo
p	variable en un sistema Hamiltoniano con componentes $p_i$
q	gasto unitario
q	variable en un sistema Hamiltoniano con componentes $q_i$
Q	gasto
$q_b$	transporte de fondo
R	número de Reynolds en función del tirante medio ( $UoH/\nu$ )
R	Radio hidráulico (cap 7)
R.	número de Reynolds en función de la velocidad cortante $u.$
$R_{uu}$	coeficiente de correlación entre velocidades $u$
S	pendiente media de energía
S	silla
St	número de Strouhal
T	tiempo total de medición
t	tiempo
$t^+$	unidades de tiempo adimensionales, $tU^2/\nu$
T	temperatura del agua
$T_B$	tiempo medio entre eventos
U	velocidad media en un punto en la dirección del flujo
$U_o$	velocidad media del flujo
U	velocidad media de la corriente
$U_*$	velocidad de fricción o velocidad cortante, $(\tau/\rho)^{1/2}$
$u'_{rms}$	raíz media cuadrada de las fluctuaciones de velocidad en dirección del flujo

$v'$	desviación estándar o rms de las fluctuaciones de velocidad en la dirección Y
$-u'v'$	esfuerzos cortantes de Reynolds
$u_*$	velocidad cortante $u_* \equiv \sqrt{gSH}$
$V$	velocidad media en un punto en la dirección vertical
$W_o$	coeficiente de estela en el perfil de déficit de velocidad
$x, y, z$	coordenadas espaciales en dirección de la corriente, vertical y en sentido transversal al flujo, respectivamente
$x$	coordenada en dirección de la corriente medida a partir de la cresta (cap 5)
$\mathbf{x}$	vector de posición (posición ocupada por una partícula $\mathbf{X}$ en el tiempo $t$ )
$\mathbf{X}$	partícula $\mathbf{X}$ , comúnmente designada por su posición en el tiempo $t$
$y$	elevación sobre el nivel medio (cap 5)
$x^+$	distancia adimensional en dirección del flujo, $U_*x/\nu$
$y^+$	distancia vertical adimensional, $U_*y/\nu$
$z^+$	distancia adimensional en el sentido transversal al flujo, $U_*z/\nu$
$\alpha$	ángulo de levantamiento de las estrías o vórtices longitudinales medido a partir de la pared.
$\Delta u$	$\equiv (u_{m\acute{a}x} - u)$ donde ; $u_{m\acute{a}x}$ velocidad máxima en dirección de la corriente alcanzada en una sección dada
$\varepsilon$	disipación turbulenta total
$\kappa$	constante de von Kármán
$\lambda$	espaciamiento medio entre estrías
$\lambda$	tamaño de los vórtices (cap. 7)
$\lambda^+$	espaciamiento medio adimensional entre estrías, $U_*\lambda/\nu$
$\mu$	viscosidad
$\nu$	viscosidad cinemática
$\rho$	densidad
$\sigma_g$	desviación estándar del sedimento
$\tau$	esfuerzo cortante en la frontera
$\tau_R$	esfuerzos de Reynolds
$\phi$	función potencial
$\Phi_t(\cdot)$	movimiento o flujo
$\psi$	función de corriente

## 1.INTRODUCCIÓN

El transporte de sedimentos por el flujo es un proceso continuo en la naturaleza, prueba de esto son los cambios morfológicos de los ríos, la formación y destrucción de depósitos sedimentarios incluyendo las islas en los ríos y lagos y los cambios de contorno en las playas y costas. Estos procesos naturales tienen su origen en la acción recíproca del flujo medio, el transporte de sedimentos y el desarrollo de la morfología del entorno (islas, bordos, formas de fondo en el cauce).

Hoy se sabe que el transporte de sedimentos se inicia como respuesta de éstos al movimiento del agua sobre el fondo de un río, originado por el desprendimiento de estructuras vorticosas que se levantan de la pared y que con ellas se produce un transporte del sedimento del fondo hacia el flujo medio. Conforme transcurre el tiempo estas estructuras llegan a modificar la topografía del fondo del cauce y, dependiendo del tipo de flujo que se tenga, se producirán diferentes tipos de formas de fondo, típicamente rizos o dunas. A su vez las formas de fondo constituyen un obstáculo para el flujo medio, generando estructuras vorticosas de mayor tamaño o comúnmente llamadas macro-estructuras turbulentas. Las estructuras turbulentas juegan un papel muy importante en los procesos interactivos flujo-transporte de sedimentos-formas de fondo. Estos procesos, evolucionan en una macro-escala de espacio y tiempo en la naturaleza, tienen su origen en la acción recíproca que se lleva a efecto entre el flujo medio y el movimiento local de las partículas que constituyen el sedimento. Estas últimas a su vez sufren procesos que tienen lugar en una micro-escala de espacio y tiempo, proporcional al tamaño de las arenas más finas y a las rápidas fluctuaciones de su desplazamiento. Al correr del tiempo, la interacción de ambos eventos configuran los lechos de los ríos, lagos y mares.

Una estructura del flujo originada en la capa límite turbulenta, en la cual cualquiera de las variables fundamentales del flujo (componentes de la velocidad, la densidad, la temperatura, etc.) exhiba una significativa correlación temporal consigo misma o

con otra variable, y que esta relación se dé en un tiempo significativamente más grande que la mayor de las escalas locales del flujo (período de oscilación en esfuerzos cortantes y presiones, tamaño de partícula, etc.) constituye lo que se conoce con el nombre de movimiento o estructura turbulenta coherente.

Los primeros estudios modernos acerca de la transferencia de energía en una capa límite turbulenta fueron realizados por Klebanoff en 1954, quién determinó que tales procesos se llevan a efecto, por lo menos en un cincuenta por ciento, en la región de la capa límite más cercana al fondo del canal. Debido a que el espesor de esta región es generalmente muy pequeño, para continuar avanzando en estos estudios fue necesario esperar a que se desarrollaran técnicas más eficientes de visualización de flujo y medición de velocidad que no afectaran las características del flujo y de la turbulencia misma.

A partir de 1967 Sutherland desencadenó una serie de estudios sobre suspensión de partículas. De éstos queda un gran acervo de conocimientos que consisten principalmente en correlaciones entre la suspensión de partículas y movimientos coherentes que se originan en la capa límite. De estos estudios resultaron una gran variedad de modelos conceptuales que describen en detalle los procesos físicos que conducen a movimientos coherentes. También existen fórmulas empíricas en donde el transporte de sedimento está relacionado con variables medias del flujo y características geométricas del cauce y propiedades físicas y geométricas del sedimento.

Los modelos conceptuales incluyen consistentemente uno o más de los siguientes fenómenos: formación de regiones de cortante en la capa límite, formación de vórtices, elongación y rompimiento de vórtices, eyección de conglomerados de partículas desde la capa límite turbulenta hasta el flujo medio y rompimiento de estos conglomerados, etc., Robinson 1990a.

Existe consenso en considerar que todos estos fenómenos se originan en las cercanías del fondo de la capa límite en regiones sujetas a esfuerzos cortantes entre estratos de la capa misma. De aquí la gran importancia que tiene el estudio sistemático y detallado del transporte de masa, energía y cantidad de movimiento entre los estratos de la capa límite y el flujo medio.

También existen modelos que alcanzan a predecir estadísticamente características y propiedades de la capa límite turbulenta. Puede decirse que éstos han sido ideados tomando como punto de partida una de las dos opciones siguientes: se consideran como componentes fundamentales algunos movimientos coherentes de la capa límite (Towsend) ó bien consideran alguna forma simplificada de las ecuaciones de movimiento con el objeto de modelar la dinámica del proceso de producción de turbulencia en regiones cercanas al fondo.

Los modelos que toman como punto de partida información sobre estructuras turbulentas son capaces de predecir ciertas propiedades de la capa límite turbulenta dependiendo del tipo de movimiento coherente que utilizan. Así, por ejemplo, el modelo modificado de Towsend (1970,1976) que utiliza una estructura de doble remolino en forma de cono predice los perfiles de intensidad de turbulencia con mucha exactitud; mientras que el modelo propuesto por Perry y Chong (1982) que consiste en suponer una capa límite compuesta por un numeroso conjunto de vórtices en forma de "V" invertida, reproducen un conjunto de propiedades tales como: perfil promedio de la capa límite, esfuerzos de Reynolds, esfuerzos de cortante, intensidad de turbulencia, etc., dando credibilidad al concepto de que los lazos vorticosos son las estructuras dinámicamente dominantes de la capa límite.

De aquellos modelos que utilizan versiones simplificadas de las ecuaciones de conservación como punto de partida para explicar la dinámica de la producción de turbulencia cerca del fondo de la capa límite, es digno de mención el propuesto por Landhal en 1990. Este modelo, aunque no describe el fenómeno de rompimiento "bursting", exhibe muchas de las otras características importantes descritas en los

reportes experimentales para movimiento de estrías tales como persistencia, ondulaciones irregulares y formación de estratos de cortante cerca del fondo. Berkooz *et al* (1990), mediante una estrategia de descomposición ortogonal, indentificó y modeló arreglos de vórtices a lo largo de la corriente libre del flujo asociado con esfuerzos de Reynolds y producción de energía cinética, el modelo dinámico resultante exhibe ciertas transiciones abruptas que remedan el fenómeno de rompimiento acompañado de eyecciones y barridos.

Cabe decir que el desarrollo de modelos tanto conceptuales como predictivos evolucionaron debido en gran medida al avance y variedad de técnicas experimentales, estadísticas y numéricas.

Dentro de las técnicas experimentales de uso más frecuente se encuentran: visualización de flujos (tinta, partículas trazadoras, etc.) anemometría laser y anemometría de hilo y película caliente.

Del mismo modo se han desarrollado numerosas técnicas de análisis estadístico, como son las técnicas de muestreo condicionado, usadas para tratar eventos turbulentos con ciertas características predeterminadas. Una de las más utilizadas es la conocida por las siglas VITA que proviene del inglés "variable-interval time average" (Blackwelder y Kaplan 1976). Las técnicas estadísticas se utilizan para detectar y caracterizar movimientos coherentes y cuantificar las contribuciones de estas microestructuras organizadas a los promedios estadísticos que representan las propiedades globales del flujo.

La mayoría de los flujos en la naturaleza son turbulentos, tridimensionales y dependientes del tiempo, y aún si se considera el flujo en un canal con agua únicamente, las ecuaciones que lo gobiernan son las ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales han demostrado ser de muy difícil solución, ya que estas son no lineales por lo que no existe una solución analítica. Las simulaciones numéricas han jugado un papel predominante durante los últimos 20 años, siendo dos las principales

estrategias numéricas que se han seguido: la conocida por las siglas LES del inglés "large eddy simulation" y aquellas conocidas como DNS del inglés "direct numerical simulation. LES se basa en la observación de que las escalas características al nivel de microestructura son universales; es decir independientes de las características del flujo medio, mientras que a una escala mayor el comportamiento turbulento es una función fuertemente dependiente de la geometría del flujo y de sus variables globales o promedio. De aquí que en el LES las escalas características más pequeñas sean las que se modelan, mientras que el resto de las variables se calculan directamente de las ecuaciones de Navier-Stokes para flujo no estacionario y en tres dimensiones. DNS se basa en hacer los cálculos utilizando una finísima malla numérica para resolver con suma precisión el movimiento turbulento a un nivel que incluye todas las escalas relevantes al problema. Esto, claro está, a expensas de un gran tiempo de máquina por lo que actualmente este procedimiento está restringido a flujos con bajos números de Reynolds, y que se llevan a efecto en geometrías muy sencillas. La modelación numérica provee la solución a un conjunto de ecuaciones simplificadas que ignoran o simplifican demasiado detalles importantes de un flujo. En particular, por sus limitaciones, los modelos numéricos no son capaces de resolver las características espacio temporales de los flujos reales.

Como ha hecho notar Triton (1995) en su obra ya clásica *Physical Fluid Dynamics* "No es de ninguna manera claro el modo en el cual los patrones de flujo observado se derivan de estas leyes (las de la mecánica). Para lograr esta conexión se requiere de una enorme estructura conceptual y teórica, construida, por una parte, sobre las leyes fundamentales y, por otra parte, sobre la observación experimental".

En la ciencia es normal que cuando un problema no se ha comprendido suficientemente, se propone la experimentación como herramienta para hacer una descripción de los fenómenos e iniciar a clarificar su comportamiento. En este sentido desde hace cerca de 25 años, con el desarrollo de las técnicas de

anemometría de película caliente que permite obtener velocidades instantáneas en un punto, complementada con la visualización de burbujas de hidrógeno, con esta técnica se obtienen perfiles de velocidad instantáneos. De esta manera, se han logrado avances importantes en el conocimiento de la estructura de los flujos turbulentos. Se ha puesto mucha confianza en la experimentación para obtener relaciones cuantitativas de algunas características del flujo como son por ejemplo; los esfuerzos cortantes de pared, el transporte de sedimentos en el fondo y la intensidad de turbulencia.

En los últimos diez años, debido a la importancia que tiene el conocimiento de la interacción entre flujo y sedimento, se han realizado un mayor número de investigaciones en diferentes disciplinas y se han logrado progresos significativos en el conocimiento de la estructura de la capa límite turbulenta y en los procesos de inicio de movimiento de partículas ver por ejemplo (Robinson (1990 a); Perry y Chong (1982); Falco (1991), Grass *et al* 1991;

También se han realizado numerosas investigaciones acerca de la generación de formas de fondo, y de la estructura del flujo sobre estas como son los de Lyn (1993), Bennet y Best(1996), Nelson(1993), Nelson y Smith (1989), Mc Lean *et al* (1994), entre otros. Y en particular sobre las estructuras del flujo generadas o relacionadas con las formas de fondo siendo las más típicas los eventos llamados Boils, los cuales se describen y caracterizan en los trabajos de Jackson (1976), Nezu *et al* (1997).

Más recientemente para resolver la trilogía flujo-transporte de sedimentos-formas de fondo Muller y Gyr (1995) realizaron investigaciones experimentales de las características turbulentas del flujo sobre formas de fondo y proponen un modelo esquemático de la evolución de vórtices que se desprenden de la cresta de la duna estos son inestables y forman boils. Best *et al* (1996) con base en el estudio de los

eventos: barridos, eyecciones e interacciones, propone un modelo esquemático de la estructura de la turbulencia en la transición rizo-dunas.

En otros estudios de la estructura del flujo turbulento se enfatiza la topología de las estructuras coherentes Blackwelder(1988). En un campo de referencia moviéndose con una velocidad de convección apropiada, se observan las estructuras coherentes como movimientos que se reconocen muy organizados. En particular, en este campo de referencia, las líneas de corriente, estrías y trayectorias de partículas exhiben puntos críticos, o puntos donde la velocidad es cero y la pendiente de la línea de corriente es indeterminada. Estos puntos críticos permiten una descripción más clara de las estructuras coherentes (Perry y Chong 1987) y facilitan la descripción física del campo de flujo. Estos estudios han revelado la importancia del estudio de las diferentes topologías del flujo sobre las formas de fondo en la descripción de la dinámica del flujo.

Tanto los modelos (conceptuales o descriptivos), las tabulaciones de datos, así como también las técnicas (experimentales, estadísticas y numéricas) de las cuales se han tratado hasta aquí, han sido obtenidas de y/o aplicadas en su mayor parte a la forma más sencilla posible de capa límite turbulenta a la cual se le conoce con el nombre de caso "canónico" (Robinson 1991). El caso *canónico* describe un flujo medio bidimensional sobre una placa plana-lisa en donde no hay otro campo de fuerzas excepto el de la gravedad; no existen gradientes de presión a lo largo del flujo medio; no existen grandes fluctuaciones en la corriente libre; no hay efectos de compresibilidad; y no hay transferencia de calor a través del fondo del canal.

En este trabajo de investigación doctoral se propuso llevar a cabo la ejecución sistemática de una serie de experimentos, tanto en el caso canónico como fuera de él, que permitan obtener mediante la atenta observación, medición y análisis de eventos un conocimiento profundo de las estructuras turbulentas; de la dinámica inherente al nacimiento y la evolución de los movimientos coherentes y de como

sus propiedades se reflejan en el transporte convectivo de sedimento, teniéndose, como fin último mejorar la comprensión actual de la relación entre estructuras coherentes, flujo medio y transporte de sedimento, e incluyendo los efectos causados por la forma *no canónica* del fondo.

El estudio de las estructuras coherentes y su relación con los procesos de transporte de sedimentos es un campo de investigación incipiente, se requiere inicialmente proponer modelos descriptivos que destaquen y agrupen las principales características de los fenómenos relacionados con la interacción flujo-formas de fondo y transporte que permita realizar un análisis más profundo, y que en última instancia llegue a una generalización. En el método científico un medio eficaz para probar o contrastar una hipótesis es el método experimental, con el que se logra una buena provisión de resultados fidedignos. Por este motivo se propuso realizar una investigación experimental con los objetivos siguientes:

- En una primera etapa realizar una caracterización del campo de flujo de acuerdo con los parámetros clásicos como son campos de velocidad media y parámetros de turbulencia.
- Con el uso de las técnicas de visualización de flujo: inyección de tinta, generación de burbujas de hidrógeno y seguimiento de partículas, investigar las macro-estructuras turbulentas generadas por las formas de fondo. realizar una clasificación de las estructuras turbulentas coherentes para dos tipos de flujo, *canónico* y *no canónico*. En esta clasificación, determinar las escalas espacio temporales de las estructuras vorticosas y su relación con los procesos de transporte.
- -Obtener imágenes en dos planos de las estructuras turbulentas y lograr una concepción casi tridimensional de las estructuras turbulentas y los procesos de transporte y mezclado en un flujo sobre formas de fondo fijas.

- Con la técnica de generación de burbujas de hidrógeno, seguir la evolución de la estructura del flujo y obtener simultáneamente los perfiles de velocidad instantáneos detrás de las formas de fondo.
  
- Con base en el comportamiento de las estructuras y la teoría de la mecánica de fluidos proponer modelos que expliquen el origen y la mecánica de cada tipo de estructuras
  
- Utilizar herramientas matemáticas como los conceptos de topología del flujo, las cuales se aplicarán en el plano de mayor cortante de flujo detrás de formas de fondo, para explicar la dinámica de las estructuras del flujo.
  
- Como objetivo final elaborar un modelo fenomenológico que describa las macroestructuras turbulentas, su dinámica y como estos procesos están en continua interacción con el desarrollo de las formas de fondo y a su vez retroalimentando el transporte de sedimentos.

Los resultados de esta investigación doctoral se presentan en el siguiente orden. En el capítulo 1 Antecedentes, en el capítulo 2 se presentan los conceptos fundamentales para el estudio de la estructura del flujo turbulento en canales. En el capítulo 3 se presenta la descripción de la instalación experimental, equipo utilizado y metodología de los experimentos. En el capítulo 4 se presenta el estudio de las estructuras del flujo sobre un fondo plano liso, *caso canónico*, mostrando los resultados experimentales, en el capítulo 5 se presenta el estudio de la estructura del flujo sobre formas de fondo fijas, *caso no canónico*, en él se incluye el estudio de las principales estructuras turbulentas observadas y los modelos apropiados para la descripción de estas; en el capítulo 6 se presenta un estudio de la topología de flujo detrás de formas de fondo fijas y su relación con la dinámica de los procesos de transporte y mezclado, y en el capítulo 7 se presenta un modelo descriptivo en el

que se sintetizan los resultados de las investigaciones realizadas, incluyendo los experimentos realizados en un canal con fondo móvil. En este modelo se presenta un punto de vista diferente que considera la dinámica de las estructuras y sus implicaciones en el transporte de sedimentos. El modelo se consideran los resultados de investigaciones anteriores y los de esta investigación, produciendo un modelo que integra diferentes aspectos de la interacción estructuras coherentes-transporte de sedimentos-formas de fondo.

## 2. ESTRUCTURAS COHERENTES EN TURBULENCIA

### 2.1 Capa límite

Considérese un fluido en movimiento en contacto con una frontera sólida. El esfuerzo tangencial en la pared retarda al fluido, estableciéndose una zona de alto gradiente de velocidad llamada capa límite. El flujo en la capa límite es inicialmente laminar (capa límite laminar), no obstante, si el número de Reynolds excede un cierto valor crítico el flujo se torna inestable y puede hacerse turbulento aguas abajo. Conforme se incrementa la distancia hacia aguas abajo, la acción retardadora de la frontera se extiende en el sentido vertical, cada vez más lejos hacia afuera de la pared aumentando el espesor de la capa límite. La turbulencia se propaga hacia la capa límite laminar original, e invade la corriente libre mezclando más fluido y formando una capa límite más gruesa. Al mismo tiempo aumenta la velocidad media inmediata a la frontera, resultando un perfil de velocidad más uniforme que el producido en una capa límite laminar, como se puede observar en la lámina 2.1. La mayor parte de la turbulencia en el flujo, es generada en la capa límite.

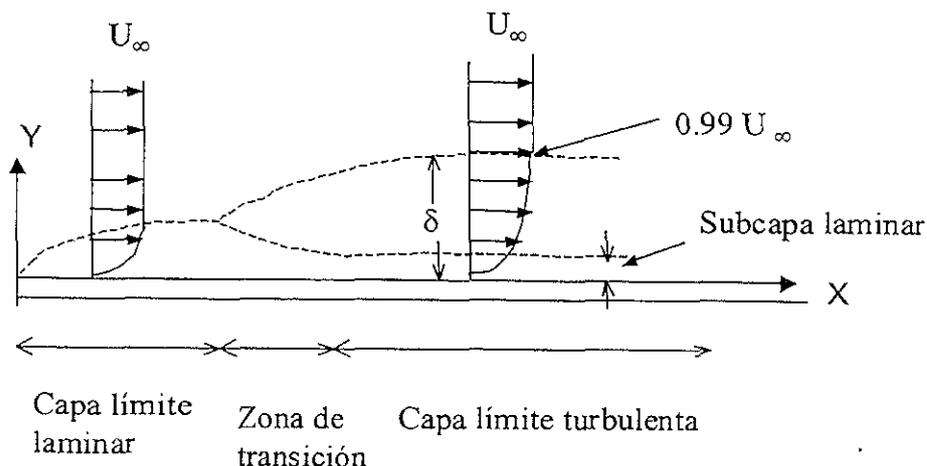


Lámina 2.1. Regiones de la capa límite.

### 2.1.1 Regiones de la Capa Límite y su distribución de velocidades asociadas

El espesor de la capa límite  $\delta$ , convencionalmente se define como la distancia en la que la velocidad alcanza un valor de 99% de la velocidad de la corriente libre  $U_\infty$ . En la capa límite turbulenta se pueden distinguir dos regiones principalmente; una región adyacente a la pared, en la que el flujo está afectado directamente por la condición de frontera. Esta región está dominada por el esfuerzo cortante en la pared, en el caso de una pared lisa, o por la rugosidad de la pared si esta es bastante pronunciada. A esta región se le denomina como "región de la pared" o región interna de la capa límite. Más allá de la pared existe otra región afectada sólo indirectamente por los esfuerzos cortantes de la pared. Esta segunda región es denominada región externa, aunque en el caso de tubos o canales se acostumbra referirse a ella como región del núcleo.

La variación de la velocidad media en la región de la pared puede determinarse por medio del análisis dimensional de la manera siguiente.

La velocidad  $u$  depende de la distancia  $y$  a la pared, del esfuerzo cortante promedio en la pared  $\tau$ , de la densidad del fluido  $\rho$ , y de la viscosidad  $\mu$ :

$$u = f(y, \tau, \rho, \mu) \quad (2.1)$$

aplicando el teorema de Buckingham, se infiere que esta ecuación tiene que ser equivalente a una relación entre dos variables adimensionales.

Si se introduce la velocidad de fricción:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (2.2)$$

una relación adimensional apropiada será:

$$\frac{u}{u_*} = f\left(\frac{yu_*}{\nu}\right) \quad (2.3)$$

comúnmente expresada como

$$u^+ = f(y^+) \quad (2.4)$$

Esta ecuación es conocida como "Ley de la pared".

En donde

$$u^+ = \frac{u}{u_*}; \quad y^+ = \frac{yu_*}{\nu} \quad (2.5)$$

Muy cerca de la pared existe una capa, bastante delgada, donde el flujo es predominantemente viscoso, por lo que se le llama subcapa viscosa. En esta capa los esfuerzos de mezclado turbulento se anulan y la velocidad es  $\bar{u} \equiv u$  y el gradiente de velocidad  $du/dy$  es casi constante, por lo que se supone que el esfuerzo cortante es constante, expresado como:

$$\tau = \mu \frac{d\bar{u}}{dy} \quad (2.6)$$

lo que puede escribirse como:

$$u_+ = y^+ \quad (2.7)$$

El rango de transición o "buffer layer" es la capa que se encuentra entre la subcapa viscosa y la turbulencia completamente desarrollada; en esta región son de importancia tanto los efectos viscosos como los inerciales, lo que hace difícil

encontrar teóricamente una expresión simple para que la represente. La subcapa viscosa y la capa de transición son muy delgadas comparadas con el espesor local de la capa límite. El conjunto de estas dos subcapas usualmente conocidas como región de la pared alcanza aproximadamente un 15% del espesor de la capa límite. En la región externa los efectos viscosos dejan de tener importancia. La distribución de velocidades sigue una ley logarítmica derivada de la ecuación:

$$\tau = \rho \ell^2 \frac{d\bar{u}}{dy} \left| \frac{d\bar{u}}{dy} \right| \quad (2.8)$$

la cual depende del modelo de longitud de mezcla de Prandtl, en donde  $\ell = \kappa y$  y  $\tau$  es el esfuerzo cortante en la pared, constante. La ecuación anterior se integra, resultando:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + C \quad (2.9)$$

en la que generalmente  $\kappa$  tiene un valor de 0.4 y  $C = 5.5$

En la lámina 2.2, se presentan las diferentes leyes de distribución de velocidades para cada región de la capa límite.

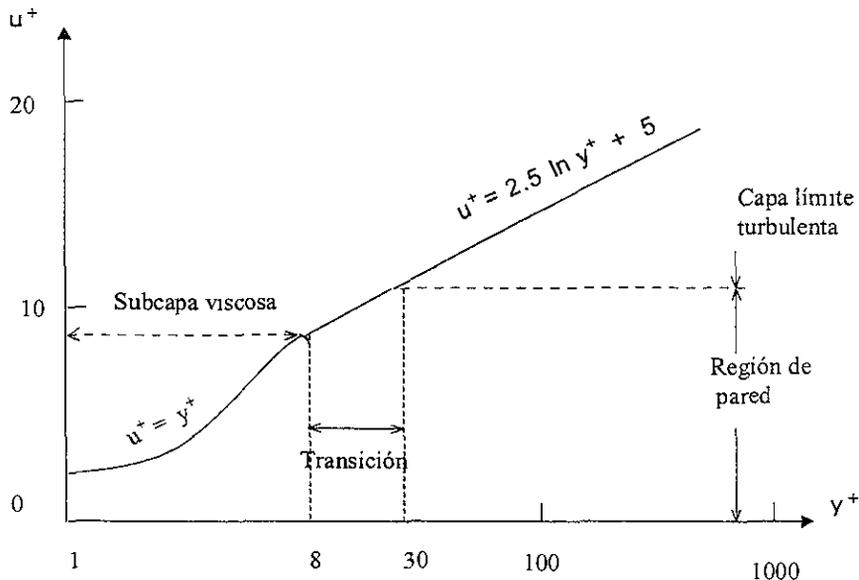


Lámina 2.2. Leyes de distribución de velocidades en cada región de la capa límite.

## 2.2 Estructuras Coherentes

Algunas de las definiciones clásicas de estructuras coherentes se presentan a continuación:

El término estructura coherente es sinónimo de otros términos por ejemplo, movimiento organizado o vórtices grandes, estructuras de gran escala, que tienen en común la noción de una correlación significativa en una región del espacio. Más específicamente, todos ellos describen regiones confinadas del espacio y tiempo en las que existen relaciones definidas de fase entre las variables del flujo (Coles 1982). El uso de la palabra grande implica que la escala de movimiento es comparable con la escala de la capa cortante.

Una estructura originada en una capa límite turbulenta, en donde cualquiera de las variables fundamentales del flujo (componentes de la velocidad, la densidad, la temperatura, etc.) exhiba una correlación significativa consigo misma o con otra variable y que esta correlación se de en un tiempo significativamente más grande que la mayor de las escalas del flujo (período de oscilación en esfuerzos cortantes y presiones, tamaño de partícula, etc.) constituye lo que se conoce con el nombre de movimiento o estructura turbulenta coherente (Robinson, 1991). El concepto de

estructuras coherentes implica movimiento colectivo del fluido. Estas estructuras tienen una cierta extensión espacial y tiempo de duración o vida y son caracterizadas por un esqueleto vorticoso, por ejemplo; conceptualmente una concentración de vorticidad en tubos vorticosos. Estos tienen una repetición casi periódica en el tiempo (Muller y Gyr 1996)

Se denomina estructura coherente a todo patrón o forma característica, que aparezca en el flujo al usar burbujas de hidrógeno o colorante, y que pueda describirse por algún movimiento común del fluido. Generalmente se asocia a vórtices o remolinos. En la lámina 2.3 se presenta una estructura coherente típica.

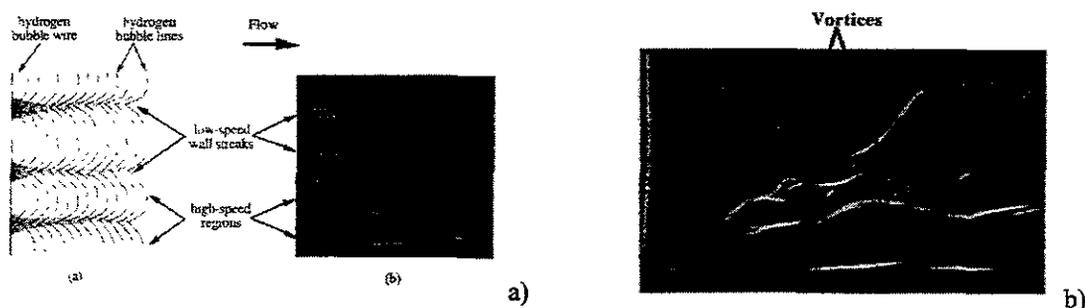


Lámina 2.3. Estructuras coherentes típicas que ocurren en la capa límite turbulenta, sobre una pared plana. a) Vista en planta esquemáticamente y con burbujas de hidrógeno para  $Re_\theta = 4,300$ , b) Vista lateral de las estructuras de la capa límite, Smith (1996).

### 2.2.1 Estrías y burst

El campo de velocidades longitudinales en las cercanías de la pared, se organiza en una serie de bandas denominadas estrías correspondientes a zonas de alta y baja velocidad, persistentes en el espacio y tiempo. Estas estrías dan lugar a los eventos cuasi-periódicos denominados burst (Kim 1971). Estos eventos consisten en eyecciones de fluido de baja velocidad que parte de regiones cercanas a la pared hacia zonas externas, y de intrusiones de fluido de alta velocidad procedente del flujo medio

hacia la pared, ver lámina 2.4. Se ha observado que en este fenómeno existe una cuasi periodicidad que se da en el tiempo y en el espacio, de manera que el burst tiende a repetirse a intervalos de tiempo relativamente regulares, con lo que resulta posible definir un período medio en el tiempo y una longitud de onda promedio.

A la secuencia de eventos durante el tiempo de vida de la estría es decir, la formación de las estrías en la pared, su desarrollo, levantamiento de la pared y rompimiento, es a lo que comúnmente se le denomina bursting. Pero también en muchas publicaciones se le da el nombre de burst a las eyecciones de flujo producidas por el levantamiento y rompimiento de las estrías. Las estructuras coherentes tales como el fenómeno bursting cerca de la pared y las estelas de vórtices en un chorro no se descubrieron usando mediciones, sino visualización de flujo. Las técnicas estadísticas convencionales no revelan la existencia de estructuras coherentes las cuales varían en un amplio rango de tamaños y orientación.

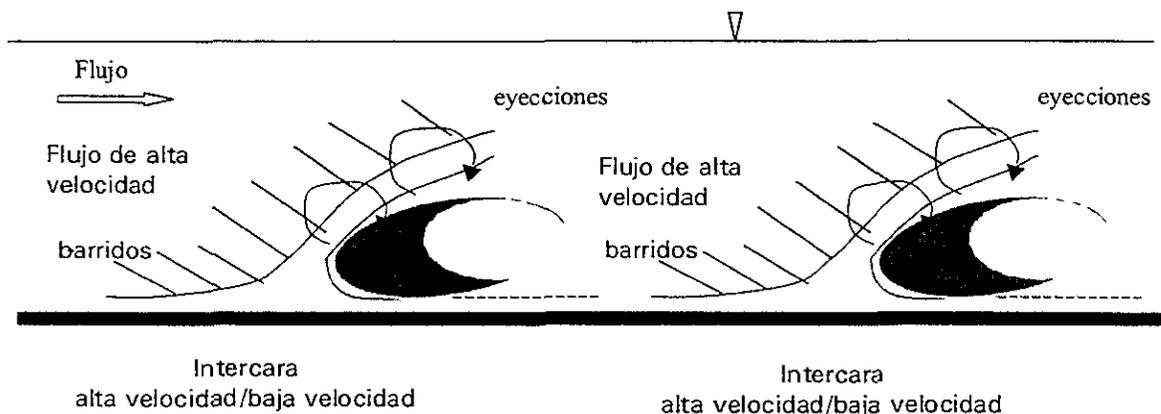


Lámina 2.4. Modelo conceptual de estructura coherentes en un canal, indicando las zonas de alta velocidad relacionadas con los barridos, alternadas por zonas de menor velocidad asociadas con las eyecciones de flujo.

Wallace y Brodkey (1972 y 1974) hicieron estudios experimentales de las contribuciones a los esfuerzos de Reynolds de los cuatro tipos de movimientos detectados en la región de la pared en un flujo turbulento. Así, por ejemplo, en un barrido se tendría flujo de alta velocidad moviéndose hacia la pared, esto es ( $u > 0$ ,  $v < 0$ ) y de manera similar para los diferentes tipos de movimiento por lo que, si se

considera un plano  $u,v$ ,. cada movimiento se identifica con un cuadrante. A esta forma de analizar las fluctuaciones de velocidad se le denomina método del cuadrante. Con el método del cuadrante el proceso de bursting se dividió en cuatro eventos caracterizados de acuerdo con el signo de la fluctuación de velocidad  $u'$  y  $v'$  y sus combinaciones se asociaron a los esfuerzos de Reynolds como se muestra en la lámina 2.5:

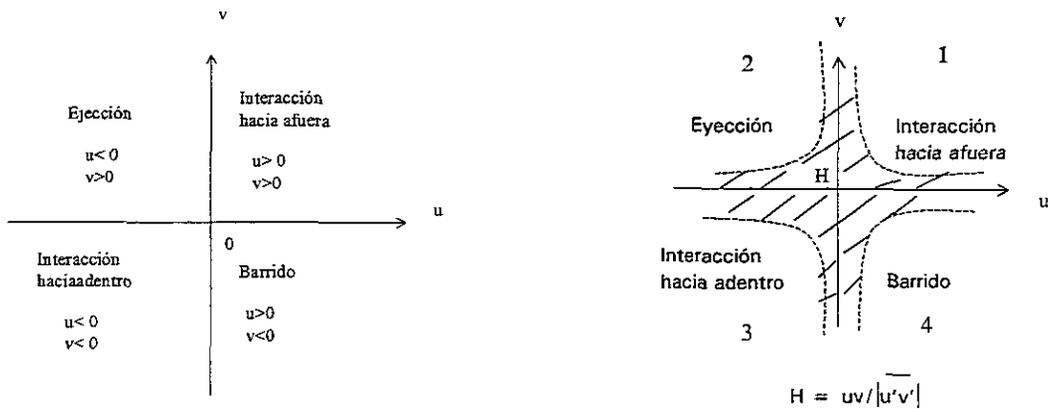


Lámina 2.5. Cuadrantes de velocidades instantáneas en el plano  $uv$ .

El nivel del umbral  $H$ , marcado como la región dentro de las líneas punteadas, se determina comparando el producto de velocidades instantáneas  $uv$  con el producto de  $u$  y  $v$  rms. Los cuadrantes 2 y 4 denotan eyecciones y barridos en estudios de capa límite, mientras que los cuadrantes 1 y 3 denotan interacciones hacia fuera y hacia adentro de la pared.

CUADRANTE	SIGNO DE $u'$	SIGNO DE $v'$	ESFUERZOS DE REYNOLDS	TIPO DE MOVIMIENTO
Cuadrante I	-	+	+	Eyección o burst
Cuadrante II	+	-	+	Barrido o sweep
Cuadrante III	-	-	-	Interacción hacia la pared
Cuadrante IV	+	+	-	Interacción hacia afuera de la pared

### ***2.3 Estructuras turbulentas y su relación con la suspensión de sedimento***

Se han efectuado diversos intentos para relacionar el proceso de suspensión de sedimento con los burst. En 1967 Sutherland, fue el primero en explicar la suspensión de partículas por el flujo turbulento haciendo uso de observaciones cerca de la pared, consideró el inicio de movimiento y la suspensión de partículas por el flujo. Grass(1974) filmó el proceso de suspensión de partículas de arena en una capa límite turbulenta sobre una placa. Esto reveló los detalles de la estructura del flujo y estableció que existe una relación entre suspensión de partículas y el proceso de bursting. Sumer y Deigaard (1979 y 1981) realizaron investigaciones experimentales del proceso de suspensión de partículas y su relación con los eventos de la pared. Uno de los experimentos fue en un canal con fondo móvil (arena) y otro en un canal con fondo fijo y agregando partículas. En el primer caso les fue difícil distinguir las trayectorias de cada partícula y estudiar su comportamiento. En el segundo caso podían medir los desplazamientos de cada partícula pero los datos que obtenían eran pocos para poder obtener características estadísticas. Las preguntas que surgieron fueron: ¿Cuál es la fuerza que actúa sobre las partículas para que entren en suspensión? ¿Cuál es el mecanismo que sostiene las partículas en suspensión? ¿Cuándo termina la suspensión? ¿Cuánto material se deposita?. En particular ellos se enfocaron al estudio del proceso de suspensión de las partículas, investigaron el movimiento de las partículas muy cerca del fondo en un canal con flujo turbulento. Grabaron la trayectoria de partículas suspendidas en tres dimensiones y en el tiempo. Midió las características cinemáticas del movimiento de las partículas y observaron que se podían relacionar con la información disponible del proceso de bursting. En la lámina 2.6, se ilustran dos trayectorias tipo grabadas por Sumer y Deigaard (1981) vistas lateralmente. La trayectoria muestra una alternación entre levantamientos y descensos de la partícula que viaja cerca de la pared. En ambas figuras se muestran los desplazamientos cada 0.086s además se indica cual sería el desplazamiento  $W$  que tendría una partícula que viajara con la velocidad final de caída. En la lámina 2.6a, se observa que en muchas ocasiones los desplazamientos de las partículas, hacia la

pared y hacia afuera, son mayores que los desplazamientos debidos a la velocidad de caída de la partícula lo que evidenció la ocurrencia del fenómeno del bursting. Donde  $t$  es el tiempo inicial,  $T$  es el tiempo de duración del burst,  $T_1$  es el periodo del burst,  $w$  es la distancia vertical que puede viajar una partícula con velocidad de caída para un intervalo de tiempo de  $0.086s$ ,  $u_\infty$  es la velocidad de la corriente libre,  $h$  es el espesor de la capa límite. *Descripción de movimiento de una partícula por un bursting.* Una partícula que se mueve hacia la pared en un ambiente de alta velocidad es barrida hacia una zona de baja velocidad formada temporalmente. El fluido de baja velocidad es sujeto a un rápido levantamiento por el cual la partícula es llevada en el flujo medio. Si la partícula es suficientemente ligera se mantendrá subiendo con el fluido de baja velocidad hasta que la estructura se rompa. Si la partícula es suficientemente pesada, esta eventualmente caerá antes que la estructura se rompa y retornará hacia la pared donde la partícula será nuevamente barrida a una zona de baja velocidad. Este proceso se repite continuamente en el espacio y en el tiempo.

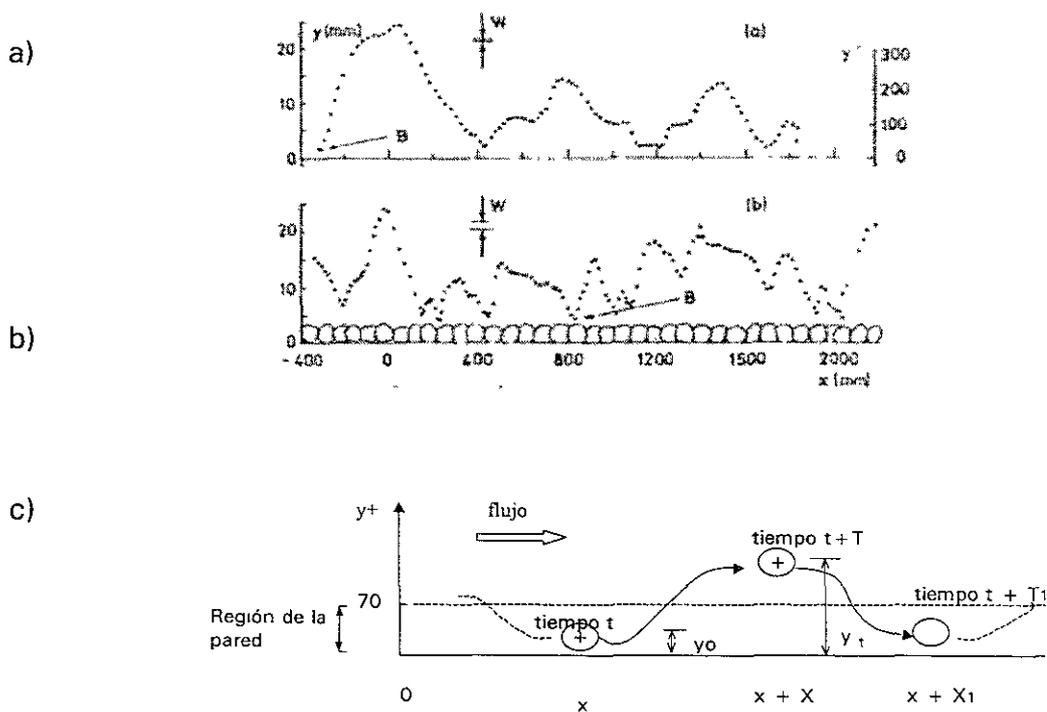


Lámina 2.6. Trayectoria típica de una partícula vista de perfil. El sentido del flujo es de izquierda a derecha. a) fondo liso;  $du./\nu = 44$ ;  $w/ku^* = 1.05$ . b) fondo rugoso;  $du./\nu = 67$ ;  $w/ku_* = 1.6$ . El número de Reynolds (con base en la rugosidad  $k$ ) para fondo rugoso  $ku_*/\nu = 81$ . Los puntos muestran la posición de la partícula cada 0.086 s. B representa la partícula en contacto con el fondo. Sumer y Deigaard, 1981. c) representación esquemática de la trayectoria de una partícula vista lateral.  $t$  = tiempo,  $T$  = duración del burst,  $T_1$  periodicidad, Sumer 1985.

En la tabla 2.1 se muestra una comparación de los resultados encontrados por Sumer de las propiedades medias del movimiento de las partículas en la región cercana a la pared con los datos reportados por diferentes investigadores de las características de los burst.

Yarko N. y F. López (1994) presentaron resultados correspondientes a tres aspectos distintos, aunque relacionados entre sí de la interacción entre partículas y turbulencia en las cercanías del lecho en flujos en canales. El primero corresponde al movimiento de partículas a lo largo de las estrías de pared, el segundo al mecanismo responsable de la puesta en suspensión de las partículas y el tercero a la caracterización del

movimiento de las partículas durante el proceso de eyección de las mismas desde el lecho.

Tabla 2.1. Comparación de datos del movimiento de una partícula relacionados con el proceso bursting.

	Características de las partículas <sup>a)</sup>		Características de los burst
	A <sup>b)</sup>	B <sup>c)</sup>	
$\frac{y_0 u^*}{v}$ 1 media	40	38	Las eyecciones se originan en $5 < yu/v < 50$ <sup>d)</sup>
$\frac{y_i u^*}{v}$ 2 media	125	103	Los elementos de fluido alcanzan elevaciones de $yu/v = 100$ <sup>e)</sup>
Tiempo medio de levantamiento $\frac{T u_\infty}{h}$ 3	3	2.4	Duración de un burst $T u_\infty/h = 2.3$ <sup>f)</sup>
Periodicidad media $\frac{T_i u_\infty}{h}$ 4	5.3	4.4	Periodicidad media del burst $T_i u_\infty/h = 5$ <sup>g)</sup>
Longitud de onda media $\frac{X_i}{h}$ 5	3.5	2.8	Longitud de onda característica del bursting $x_i/h = 4$ <sup>g)</sup>

a) Fondo liso

b)  $du/v = 44$ ,  $w/ku = 1.05$

c)  $du/v = 46$ ,  $w/ku = 2.20$

d) Nichas, Hershey y Brodkey (1973)

e) Praturi & Brodkey (1978)

f) Jackson (1976)

g) Hinze (1975)

En las cercanías de la pared las partículas inmersas en la subcapa viscosa tienden a moverse en líneas paralelas orientadas en la dirección del flujo, correspondientes a las bandas de baja velocidad. El espaciamiento transversal medio estimado entre estrías es de 100 unidades de pared ( $y^+ = 100$ ) correspondiente al valor característico para capas límite. Sus observaciones indicaron que las partículas son levantadas en suspensión desde las bandas de baja velocidad y son depositadas a lo largo de las bandas de alta velocidad por eventos de barrido (sweeps) para ser desplazadas rápidamente hacia las bandas de baja velocidad por flujos transversales que se podrían

relacionar con vorticidad longitudinal. Las mediciones instantáneas de partículas en las bandas de alta velocidad mostraron valores superiores a cuatro veces la velocidad media del flujo a una altura correspondiente al radio de las partículas. Finalmente mediante imágenes instantáneas obtenidas con una cámara de alta velocidad mostraron la interacción entre las estructuras inclinadas correspondientes a las superficies de corte y las partículas levantadas, ver lámina 2.7. Una observación importante es que las eyecciones de partículas totalmente inmersas en la subcapa viscosa se produjeron por medio de eventos turbulentos hasta el límite de la región de pared, algunas partículas alcanzaron alturas máximas de hasta 30 unidades de

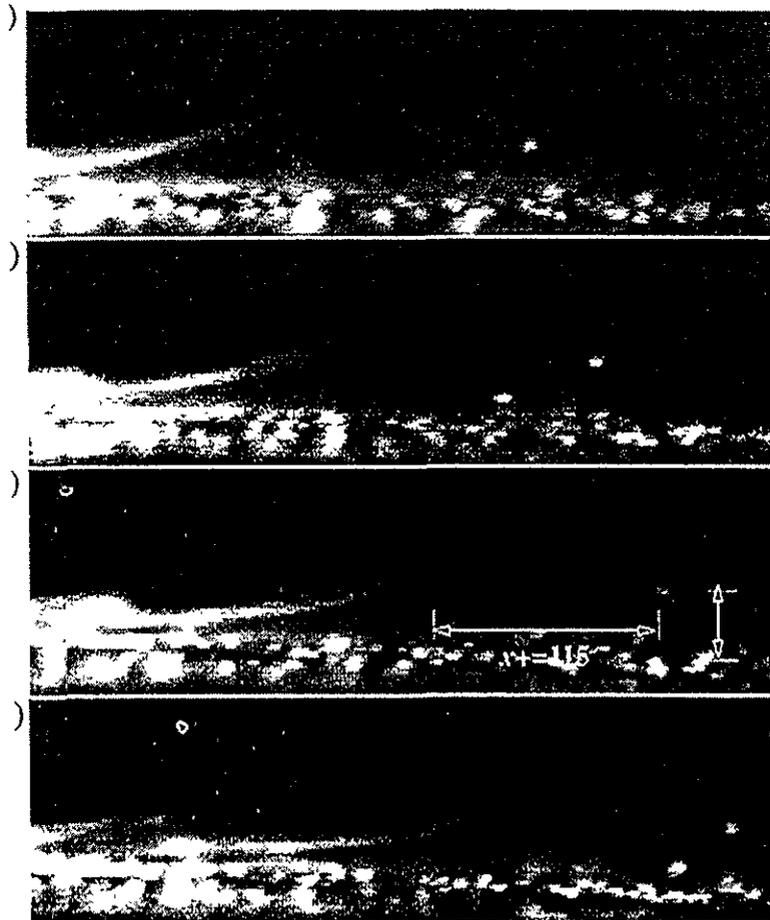


Lámina 2.7. Secuencia de imágenes que muestra la interacción de una partícula con una capa cortante.  $Re = 15\ 000$ ,  $d_p = 224\ \mu m$ , el intervalo entre imágenes es de  $0.008s$ . Yarko N. y F. López (1994).

pared esto es, ( $y' = 30$ ) y cayeron nuevamente en el lecho, otras fueron levantadas hacia regiones cercanas al límite de la región de la pared ( $y' = 100$ ), con ángulos de

eyección de  $12^\circ$  similares a los de las estructuras coherentes relacionadas con eyecciones del flujo. La altura de dichas estructuras es del orden del espesor de la zona de la pared. Aparentemente, aquellas partículas que si alcanzan las regiones externas de la capa de pared son atrapadas por estructuras vorticosas del flujo externo las cuales podrían mantenerlas en suspensión.

## 2.4 Características del flujo turbulento en canales

### 2.4.1 Ecuaciones del flujo medio

Como se muestra en la lámina 2.8,  $U, V$  y  $W$  denotan las componentes de velocidad media;  $u, v$  y  $w$  denotan las fluctuaciones de velocidad, y  $u', v'$  y  $w'$  denotan los valores de las rms (del inglés root-mean-square, raíz media cuadrada) de la fluctuación alrededor de la media, por ejemplo, intensidades de turbulencia en la dirección  $x$  (en dirección de la corriente) y  $y$  (vertical a la corriente y  $z$  ( en sentido transversal).

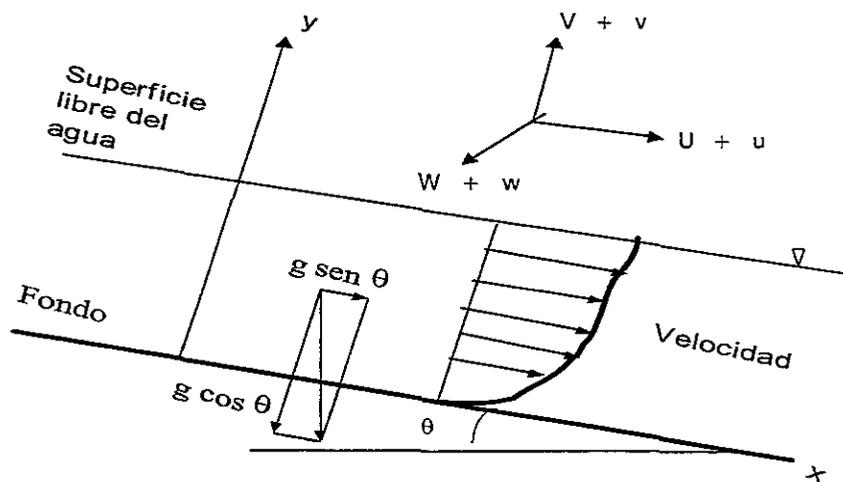


Lámina 2.8. Coordenadas y características del flujo en un canal

La ecuación de continuidad y las ecuaciones de Reynolds derivadas de las ecuaciones de Navier-Stokes, para flujo en canales 2-D son:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (2.10)$$

$$U \frac{\partial}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{P}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (-\overline{u^2}) + \frac{\partial}{\partial y} (-\overline{uv}) + \nu \nabla^2 U \quad (2.11)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \cos \theta - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{P}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (-\overline{uv}) + \frac{\partial}{\partial y} (-\overline{v^2}) + \nu \nabla^2 V \quad (2.12)$$

(Donde P es la presión media,  $\rho$  la densidad del fluido, g la aceleración de gravedad,  $\nu$  la viscosidad cinemática, y  $\theta$  el ángulo de la pendiente del canal con respecto al eje horizontal. El símbolo  $\nabla^2$  denota el operador Laplaciano. En un canal con flujo uniforme, donde  $V=0$  y  $\partial/\partial x = 0$ , la ecuación (2.12) integrada en la dirección y, resulta

$$\frac{P}{\rho} = (h-y)g \cos \theta + (\overline{v'^2} - \nu'^2) \quad (2.13)$$

#### 2.4.2 Ecuaciones de energía turbulenta

Las ecuaciones básicas de esfuerzos turbulentos normales en un canal con flujo completamente desarrollado bidimensional, 2-D, son las mismas que para flujos en la capa límite.

Ecuación en  $u$

$$-\overline{uv} \left( \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\overline{p}}{\rho} \frac{\partial u}{\partial x} = \varepsilon_1 + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial y} \left( \overline{u^2 v} - \nu \frac{\partial \overline{u^2}}{\partial y} \right) \quad (2.14)$$

ecuación en  $v$

$$\frac{\overline{p}}{\rho} \frac{\partial v}{\partial y} = \varepsilon_2 + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial y} \left( \overline{v^2 v} + 2 \frac{\overline{pv}}{\rho} - \nu \frac{\partial \overline{v^2}}{\partial y} \right) \quad (2.15)$$

ecuación en w

$$\frac{\overline{p}}{\rho} \frac{\partial \overline{w}}{\partial z} = \varepsilon_3 + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial y} \left( \overline{w^2 v} - v \frac{\partial \overline{w^2}}{\partial y} \right) \quad (2.16)$$

donde,

$$\varepsilon_i \equiv \nu \left\{ \left( \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial z} \right)^2 \right\} > 0 \quad (i = 1,2,3) \quad (2.17)$$

$$u_1 = u, u_2 = v, u_3 = w$$

Aquí, p es la fluctuación de presión,  $\varepsilon_i$  es el porcentaje de disipación turbulenta asociada con cada componente de velocidad. Para capas cortantes en 2-D, como en el flujo en canales. La producción turbulenta (o generación),  $G = -uv(\partial U/\partial y)$ , aparece solamente en la ecuación de la componente U. Este hecho puede usarse para explicar una relación importante entre las intensidades de turbulencia, de acuerdo con  $u' > v'$  y  $u' > w'$ . El término  $(p/\rho) (\partial u_i/\partial x_i)$  representa las correlaciones presión deformación por las cuales la energía turbulenta es redistribuida de  $u'$  a  $v'$  y  $w'$ . La importancia de las fluctuaciones de presión p es inducir una tendencia hacia un comportamiento isotrópico. Debido a que estas correlaciones presión-deformación juegan un papel importante en la redistribución de la energía turbulenta entre las tres componentes de velocidad, su inclusión en modelos refinados de turbulencia es necesaria para predecir las distribuciones de  $u'$ ,  $v'$  y  $w'$ .

Afortunadamente, estas correlaciones de presión-esfuerzo (deformación) desaparecen en las ecuaciones que gobiernan el balance de energía cinética K,

definida como  $K \equiv (u'^2 + v'^2 + w'^2)/2$ , debido a las restricciones de continuidad. Por lo que, la suma de la ecuación (2.14), (2.15) y (2.16), la ecuación de energía turbulenta es:

$$G = \varepsilon + (T_D + P_D) + V_D \quad (2.18)$$

$$\varepsilon \equiv \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (2.19)$$

$$T_D \equiv \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{2} (u^2 + v^2 + w^2) \right) \nu \quad (2.20)$$

El último término de (2.18),  $V_D$  es la difusión viscosa, la cual para números de

$$P_D \equiv \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{P}{\rho} \nu \right) \quad (2.21)$$

$$V_D \equiv - \frac{\partial^2}{\partial y^2} k \quad (2.22)$$

Reynolds altos es despreciable a una cierta distancia de la pared. Sin embargo, es muy importante en la subcapa viscosa, en la que, no puede despreciarse aún con altos números de Reynolds. El tercer y cuarto término de la ecuación 2.18, entre paréntesis,  $\varepsilon$  describen la difusión turbulenta, que consiste de la difusión de energía turbulenta  $T_D$  y la difusión de energía de presión  $P_D$ . El término  $\varepsilon$  en (2.18) es la disipación turbulenta total.

La energía turbulenta es transferida de remolinos grandes a pequeños en un proceso de cascada, y eventualmente se disipa en calor. Este modelo de cascada de turbulencia se muestra en la lámina 2.9. Debido a que los remolinos más pequeños tienden a un comportamiento isotrópico, la aproximación isotrópica puede ser válida en flujos que alcanzan esta condición. El mecanismo de transporte turbulento de energía puede describirse con el modelo físico de Nezu y Nakagawa (1993) mostrado en la lámina 2.9.

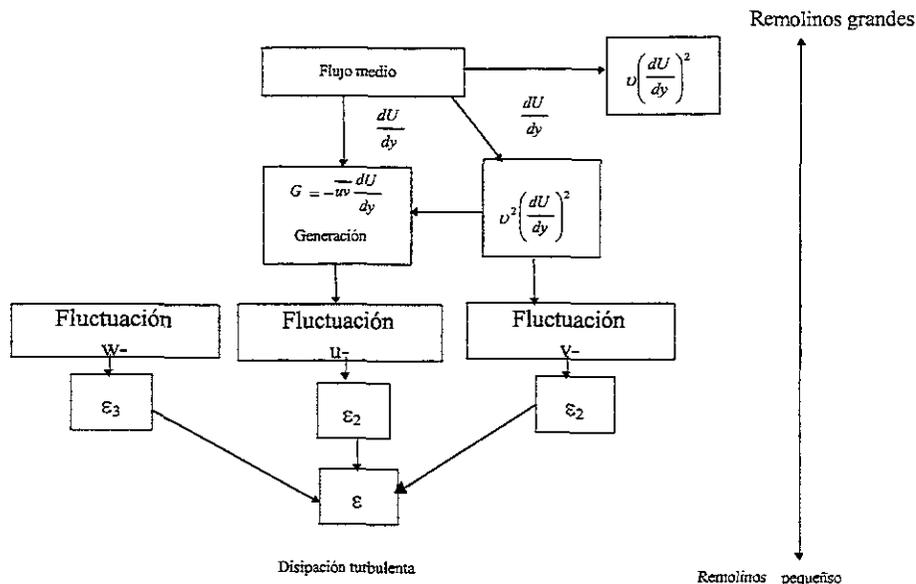


Lámina 2.9. Esquema del mecanismo de transporte de energía turbulenta, de generación a disipación. (Nezu 1993)

## 2.5 Subdivisión del flujo en canales y sus características

Para describir la naturaleza del flujo turbulento en canales se usan algunas de sus características fenomenológicas. Para este propósito el flujo en un canal se divide en ciertas regiones en donde se seleccionan escalas de velocidad y longitud típicas; las cuales sirven para normalizar características de turbulencia. Estos conceptos ayudan a formular las aproximaciones necesarias para cerrar esquemas que permitan soluciones teóricas de las ecuaciones que gobiernan el flujo en canales.

Las regiones del espectro de energía que se relacionan con las diferentes regiones del flujo en un canal son 1) región de producción, 2) inercial, y 3) viscosa. La energía turbulenta se extrae del flujo medio en el subrango inercial, y luego se disipa en calor en los subrangos viscosos. En analogía con este proceso de cascada la transferencia de energía se puede explicar dividiendo el flujo de un canal en diferentes, regiones de acuerdo con la forma de transferencia de energía, la cual está a su vez relacionada con el tipo de procesos que se llevan a cabo en cada región, estas regiones se pueden caracterizar con escalas en las que se consideren las variables de más peso como se muestra en la lámina 2.10.

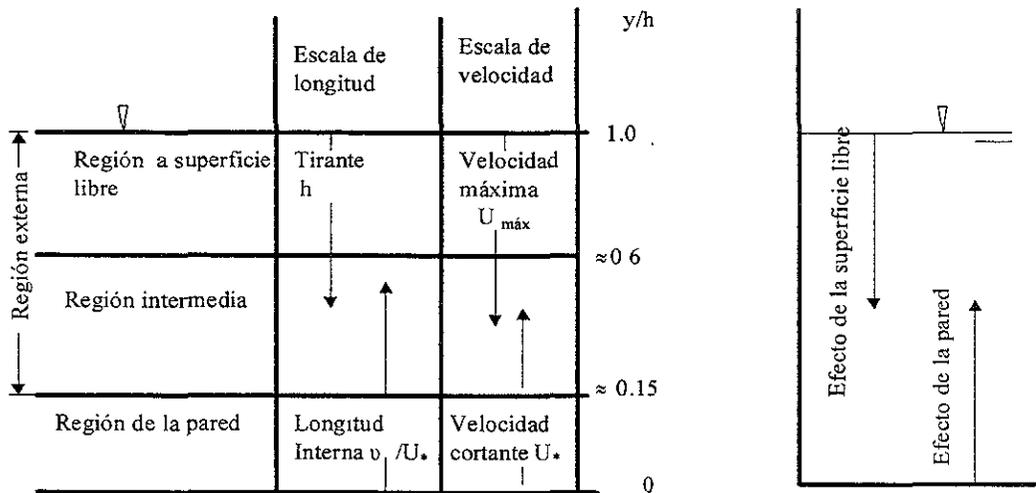


Lámina 2.10. Sub-división del campo de flujo en un canal. (Nezu 1993)

1. Región de la pared [ $y/h < (0.15-0.2)$ ]. Esta región corresponde a la región interna de la capa límite; las escalas de longitud y velocidad son  $\nu/U_*$  y  $U_*$ , respectivamente. La estructura turbulenta está controlada por las variables internas si se cumple la ley de la pared. Los bustos ocurren más violentamente cerca de la pared, p. Ej. En el rango  $y^+ \equiv yU_*/\nu < 50$ . La generación de energía turbulenta consecuentemente excede el porcentaje de disipación,  $G > \varepsilon$ , en la región  $y^+ \equiv yU_*/\nu \leq 50$ .
2. Región cercana a la superficie libre [ $0.6 < y/h \leq 1.0$ ]. En esta región, las variables externas controlan la estructura turbulenta, las escalas de longitud y velocidad se especifican con el tirante del flujo  $h$  y la velocidad máxima de la corriente  $U_{\text{máx}}$ , respectivamente como se indica en la lámina 2.7. En esta región se puede aplicar la ley logarítmica de velocidad en términos de una ley de estela como se verá en el capítulo 5. La disipación  $\varepsilon$  es mayor que la generación  $G$ ; consecuentemente, la energía turbulenta fluye de la región de la pared a la región externa a través de difusión turbulenta. En esta región la superficie libre afecta fuertemente las características de la turbulencia, en contraste con el flujo en conductos cerrados a presión.

3. Región intermedia  $[(0.15-0.2) \leq y/h \leq 0.6]$ . Esta región no es influenciada predominantemente por las propiedades de la pared o por las propiedades de la superficie libre; esta corresponde al subrango inercial de una distribución espectral. Las escalas longitudinales y de velocidades son  $y$  y  $\sqrt{\tau/\rho}$ , respectivamente. En esta región se mantiene un cierto equilibrio de energía,  $G \approx \epsilon$ , este incluye una porción de la región de la pared en la que  $y^+ > 50$ . La región intermedia y la región a superficie libre, juntas forman la llamada región externa, en esta región los efectos viscosos son despreciables.

### ***2.6 Antecedentes acerca de estructuras turbulentas, formas de fondo y su relación con el transporte de sedimentos***

El fondo de un cauce natural puede ser plano o tener ondulaciones. El fondo plano existe cuando no hay arrastre de partículas, o cuando aún con arrastre, no se producen ondulaciones. Cuando el cauce es arenoso y existe transporte de partículas se forman ondulaciones. El interés por conocer las características de las formas de fondo y su evolución se debe a que estas afectan la rugosidad del cauce y un cambio de configuración del fondo da por resultado variaciones en su resistencia al flujo. Existe una interrelación que se desconoce con exactitud, entre la forma y el tamaño de las ondulaciones del fondo con las características del flujo (velocidad, tirante), del sedimento, y el transporte.

Las posibles formas de fondo se clasifican usualmente en: rizos, dunas, ondas estacionarias y antidunas. Partiendo de un fondo plano y para gasto creciente la evolución de las formas de fondo para flujos subcríticos  $F < 1$  sería: rizos, dunas y ondas estacionarias. Para flujos supercríticos  $F > 1$  la forma de fondo es: fondo liso con arrastre y antidunas. Existen otras clasificaciones más detalladas y con base en diferentes parámetros considerados por cada investigador ver Van Rijn (1992).

Los criterios de clasificación de las formas de fondo se han dado considerando las diferencias de escalas de longitud y altura de las formas. Los rizos se definen como formas de fondo con una longitud menor que el tirante. Las dunas se definen como formas asimétricas con una longitud de alrededor de 7 veces el tirante de agua. Se puede decir con base en la literatura que los rizos y las dunas son las formas de fondo predominantes en la naturaleza y en canales de laboratorio, para casos de pendientes suaves. Los rizos, aunque son muy similares a las dunas, son formas más pequeñas que se considera están afectadas por características de la región más cercana a la pared. No existe una explicación física para los cambios en las formas de fondo, las transiciones de un tipo de forma a otro se relacionan con inestabilidades de la intercara agua- fondo

Los estudios clásicos del flujo sobre formas de fondo en los que se consideran las características del flujo turbulento por medio de la medición de intensidades de turbulencia y esfuerzos de Reynolds son los de Raudkivi (1966), Müller y Gyr (1982,1986), Lyn (1993); Nelson *et al.* (1993); Bennett y Best (1995). Estos investigadores observaron que la intensidad de turbulencia y esfuerzos de Reynolds alcanzaron sus valores máximos a lo largo de la zona de separación de flujo. Como puede verse, todos los estudios son muy recientes, lo cual explica que esta sea una de las líneas de investigación de frontera en mecánica de ríos.

Previo a estos investigadores, los estudios de generación y estabilidad de dunas se desarrollaron a través del análisis de estabilidad lineal Kennedy (1963, 1969), Hayashi (1970), Smith (1970), Richards (1980), Engelund y Fredshoe (1982). En este análisis, las ecuaciones de movimiento del fluido y del sedimento se linealizan y se investiga el flujo sobre una pequeña perturbación del fondo para determinar la respuesta de la perturbación al flujo, prediciendo formas estables o inestables.

Las formas de fondo determinan la condición de frontera del flujo. A su vez, por medio del transporte de sedimento, las formas de fondo evolucionan, las características del flujo afectan a las formas del fondo y consecuentemente a las distribuciones de

sedimento transportado. Sin embargo aún no queda claro como se desarrollan las interacciones de la estructura del flujo-formas de fondo- transporte de sedimentos.

En contraste con las teorías de estabilidad lineal, se desarrollaron recientemente teorías estructurales que explican el proceso de formación y desarrollo de las formas de fondo tratando de describir el fenómeno con base en las características de las estructuras turbulentas que se desarrollan en la región de la pared.

Estudios experimentales y de campo (Coleman,1969; Jackson,1976; Itakura y Kishi, 1980; Nezu *et al.* 1980) proponen que la macroturbulencia asociada con las formas de fondo es importante en la suspensión de sedimento y en controlar la formación y estabilidad hidráulica de las dunas. Sin embargo en la mayoría de las fórmulas de transporte no se considera el efecto de la forma de fondo. De acuerdo con observaciones experimentales (Zanke,1986) ha observado, que la cantidad de material en suspensión cerca de la pared y el intercambio turbulento que se efectúa dependen de la forma del fondo. Las mediciones de Zanke(1986), indicaron que existió hasta 10 veces más concentración de sedimento en suspensión, en un flujo con formas de fondo comparando con una situación similar y fondo liso. En la lámina 2.11 se muestran los macroremolinos formados por la macrorugosidad del fondo. El tamaño-de estos remolinos se relacionó con el tamaño de las dunas, los más grandes fueron de un orden de magnitud semejante al tirante. Una parte de la energía del flujo se pierde en la generación de vórtices por las dunas, y estos parecen proporcionar una mayor concentración de carga de sedimento en suspensión.

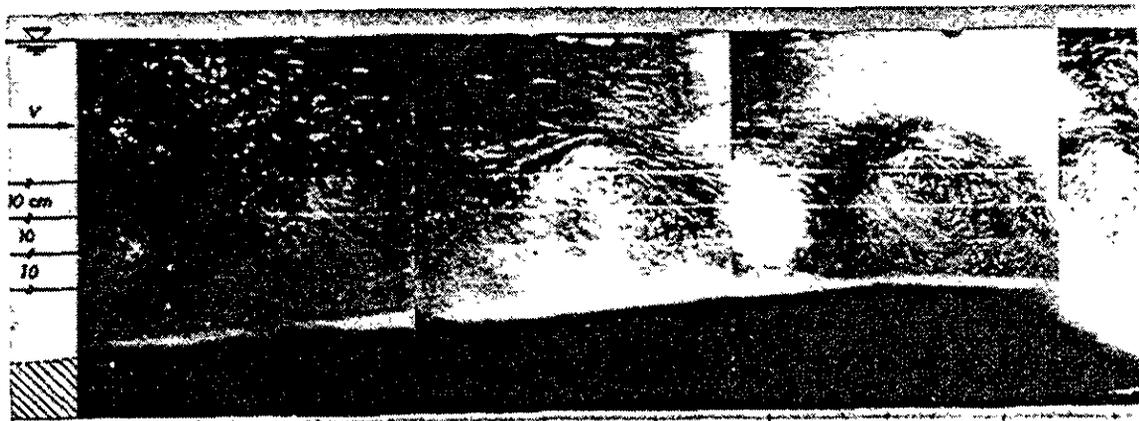


Lámina 2.11. Macroremolinos formados por la macrorugosidad del fondo, tomados con una cámara moviéndose a la velocidad del flujo. Zanke(1986)

Mulder, Kohsiek y Vander Kolk (1986) realizaron mediciones de turbulencia y concentración de arena en el estuario de Eastern Sheldt analizando los resultados con relación a estructuras coherentes y los procesos de bursting. Con base en el método del cuadrante de Willmart y Lu para clasificar los esfuerzos en un plano  $u'-w'$ , detectaron los períodos de eyecciones y barridos. Además obtuvieron las contribuciones de estos eventos a los esfuerzos de Reynolds. La correlación entre concentraciones de sedimento en suspensión y los esfuerzos pesados de Reynolds, obtenidos considerando la intensidad y duración de barridos y eyecciones, fue notablemente buena como se muestra en la lámina 2.12. De acuerdo con lo anterior se puede decir que los eventos relacionados con los burst o rompimientos de estructuras coherentes tiene un papel importante en el transporte de sedimento. Para mejorar los modelos de transporte de sedimento en suspensión es necesario concentrarse no sólo en la predicción de los esfuerzos de Reynolds sino especialmente en el estudio de los fenómenos de las estructuras turbulentas en la región de la pared.

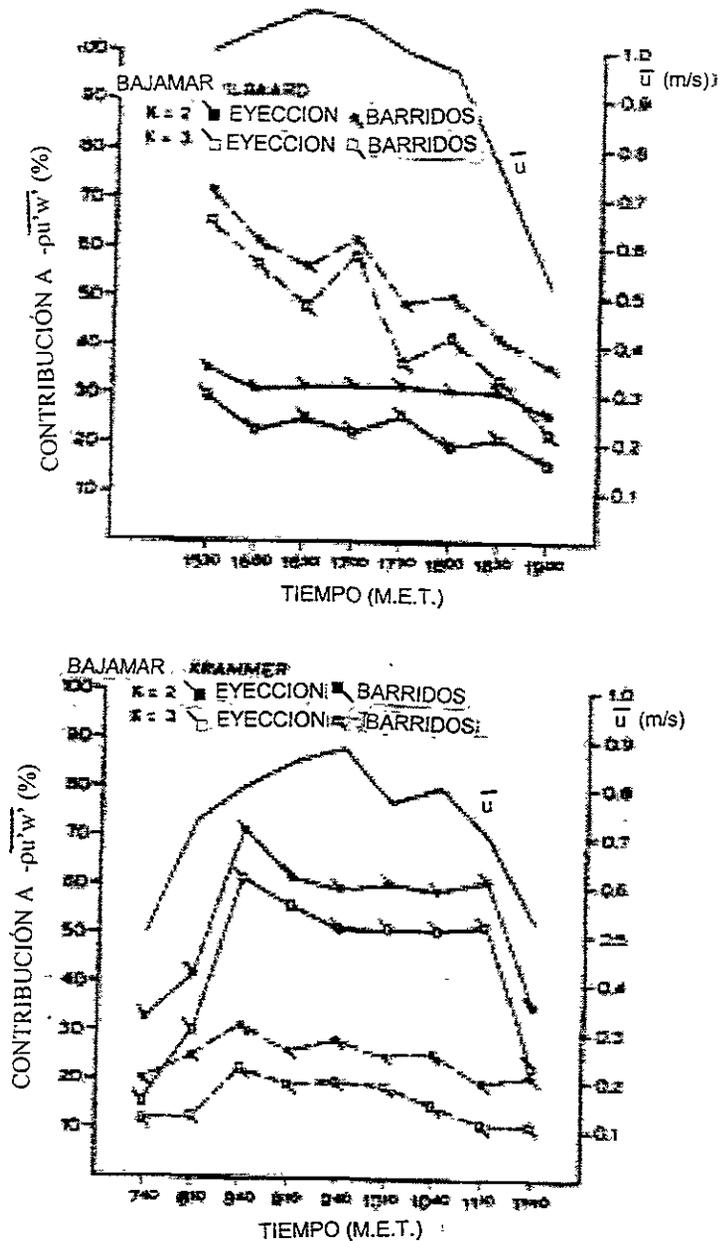


Lámina 2.12. Concentración-esfuerzos pesados de Reynolds para los eventos barridos (ls) y eyecciones (le) en pleamar y bajamar en la boca del estuario de Eastern Sheld. Mulder *et al* (1986).

En algunos estudios se cuantificaron concentraciones de sedimentos bastante altas debido a estos eventos (Lapointe (1992), Kostaschuk y Chuck (1993)). Se supuso que los boils son manifestaciones de vórtices verticales cuyo origen se encuentra cercano al fondo. En otros trabajos, se presenta la hipótesis de que la

macroturbulencia está asociada con inestabilidades del tipo Kelvin-Helmholz desprendidas por la separación del flujo y la formación de la capa cortante (Müller & Gyr,(1982), Lane(1944), Korchkha,(1968). Levi (1983 y 1991) propone que la macroturbulencia se debe al desprendimiento de vórtices detrás de las dunas. Sin embargo, no se ha obtenido información detallada para poder relacionar estructuras coherentes, mecanismos de transporte y estabilidad de dunas.

Müller y Gyr (1986) también realizaron experimentos de visualización de estructuras coherentes generadas aguas debajo de la cresta de la duna, ellos propusieron un modelo conceptual de la formación de vórtices como se muestra en la lámina 2.13. En analogía con los vórtices pares en capas de mezclado, proponen que a partir de la cresta de la duna se separan tubos vorticosos que se convierten en vórtices tipo horquilla debido a inestabilidades laterales, la parte superior de estos vórtices se asocian con fluido de baja velocidad, que se translada hacia la superficie libre apareciendo como boil.

Otro experimento notable es el de Iseya & Ikeda (1986) en un canal de laboratorio de 4 m de ancho y 160 m de largo. En éste, los investigadores mostraron cómo se generaron fuertes eventos turbulentos a partir del punto de reattachment durante el tiempo en el que el gasto del canal se incrementó, Cuando el flujo se hizo estable, las dunas se desarrollaron completamente, los boils se amortiguaron y no se observaron. Estos eventos levantaron mucho sedimento hacia la superficie libre del agua, de manera semejante con lo que se ha observado en los ríos.

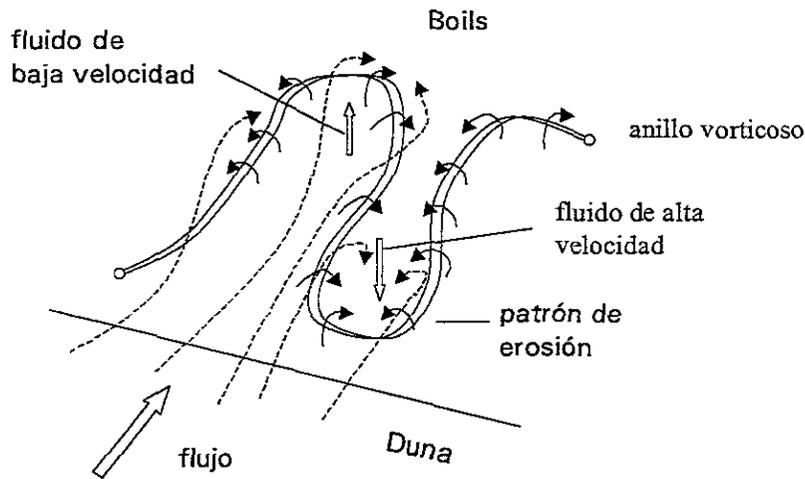


Lámina 2.13. Modelo conceptual de la formación e inestabilidad de un tubo vorticoso detrás de una duna (Muller y Gyr, 1986)

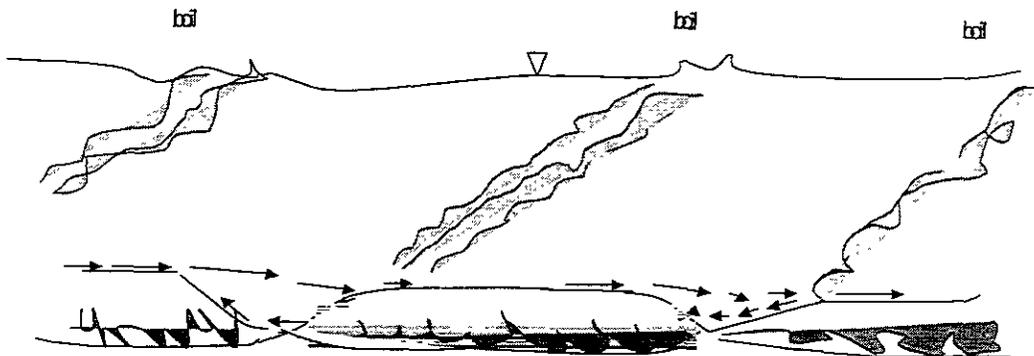


Lámina 2.14. Eventos Boils generados en el punto de reattachment de las formas de fondo en evolución.

Las mediciones y estudios visuales llevaron a los experimentadores a proponer mecanismos de la formación de vórtices tipo boils. Nakagawa y Nezu (1993) propusieron que inmediatamente aguas debajo de la cresta de la duna se debido a inestabilidades tipo Kelvin-Helmholz. Una de las investigaciones más recientes relacionadas con este tema es la de Bennett y Best (1995). Realizó un estudio experimental sobre un total de siete formas de fondo de 0.63 m de longitud, una altura de 0.04m y ángulo de 30. Con la superficie cubierta con esferas de vidrio de 0.22 mm de diámetro. En condiciones de flujo similares a las observadas en fondo móvil para una condición de flujo permanente. Bennett y Best (1995) usaron el

método del cuadrante para evaluar las contribuciones de cada tipo de eventos sobre las formas de fondo. En forma resumida presentaron la localización de eventos turbulentos de gran magnitud para un umbral de ( $H = 2$ ) con respecto a la posición, los cuales se presentan en la lámina 2.15. En este trabajo los eventos tipo 2 *eyecciones* dominaron las dos terceras partes inferiores del flujo, a lo largo de la capa cortante, por las inestabilidades de tipo Kelvin-Helmholz, y cerca de la región del reattachment. Ellos propusieron que estos eventos proveen un mecanismo para el levantamiento de partículas. Esto lo sustentan con el hecho de que se han observado grandes concentraciones de sedimento relacionadas con los eventos boils (Jackson 1976; Kostaschuck y Chuck 1993). Los eventos tipo 4 *barridos* dominaron en el flujo dentro de la zona de separación, en el reattachment y en la cresta de la duna. Explicado por el movimiento del fluido hacia la pared a lo largo de la capa cortante, el impacto de los vórtices en la forma siguiente y la convergencia del flujo sobre la cresta. Estos eventos son capaces de levantar sedimento. Los eventos del cuadrante 1 pueden jugar un papel importante en la suspensión de sedimento en la región de reattachment y ayudan al flujo de sedimento aguas abajo.

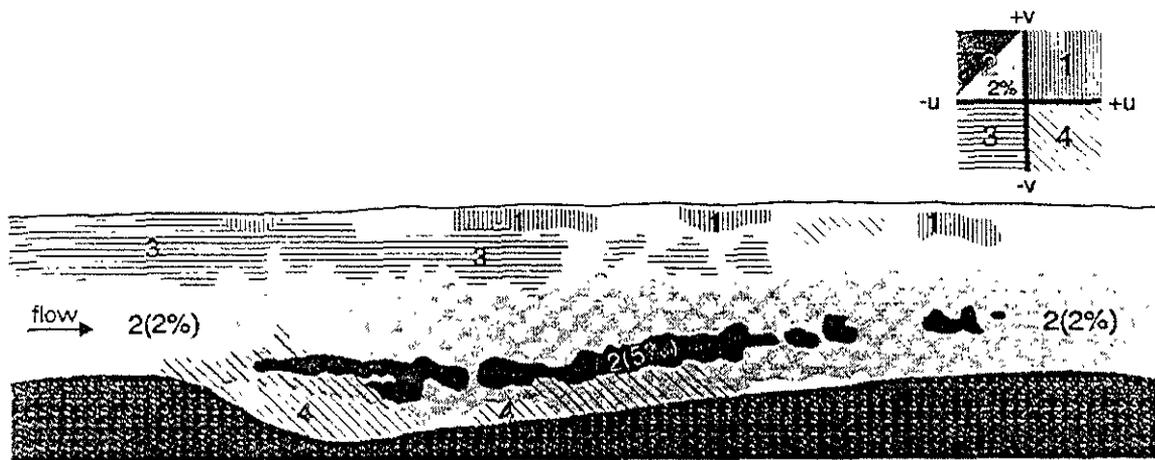


Lámina 2.15. Representación esquemática de la distribución espacial de los eventos de cada cuadrante en porcentaje, usando un umbral  $H = 2$ . (Bennett y Best 1995)

Una de las principales conclusiones del trabajo de Bennett y Best es que las eyecciones debidas a las inestabilidades tipo Kelvin-Helmholz, dominan en la capa

cortante en la zona de separación. Tales inestabilidades controlaron el flujo local, la estructura de la turbulencia, los modos de levantamiento de partículas y la cantidad de transporte.

No obstante que recientemente se han realizado varios estudios del flujo sobre las dunas hay poca integración de esta información en teorías de estabilidad de formas de fondo y de la mecánica del transporte de sedimento. Se ignora por ejemplo la interacción entre el transporte de sedimento y la topografía del fondo con el campo de flujo turbulento, especialmente los efectos de la separación de flujo, el desarrollo de la capa cortante y la macroturbulencia que se desprende de la morfología de las formas de fondo y que esta relacionada con la posición de su origen.

*Asimismo, como se aprecia de este sucinto resumen bibliográfico existe una gran cantidad de artículos e información acerca de estructuras turbulentas pero no así de la interrelación existente entre estas con el transporte de sedimentos y con las formas de fondo.*

La información existente no ha sido suficiente para lograr la descripción precisa de la interacción entre la estructura de la turbulencia y el movimiento de partículas en la zona de la pared. Una de las razones principales que ha impedido determinar dicha interacción es la falta de datos experimentales con la resolución espacio-temporal requerida para poder caracterizar las estructuras turbulentas y a su vez seguir las trayectorias de las partículas movidas por estas.

En las investigaciones relacionadas con este tema por un lado se ha trabajado con técnicas de visualización que dan información de la forma y evolución de las estructuras y su interacción con las partículas, en forma cualitativa, y por otro con las técnicas de anemometría láser o de película caliente se han logrado obtener mediciones de velocidad instantánea muy puntuales, a partir de estas se han obtenido características de la turbulencia como intensidades de turbulencia y esfuerzos de Reynolds y con las técnicas de generación de burbujas de hidrógeno se han obtenido

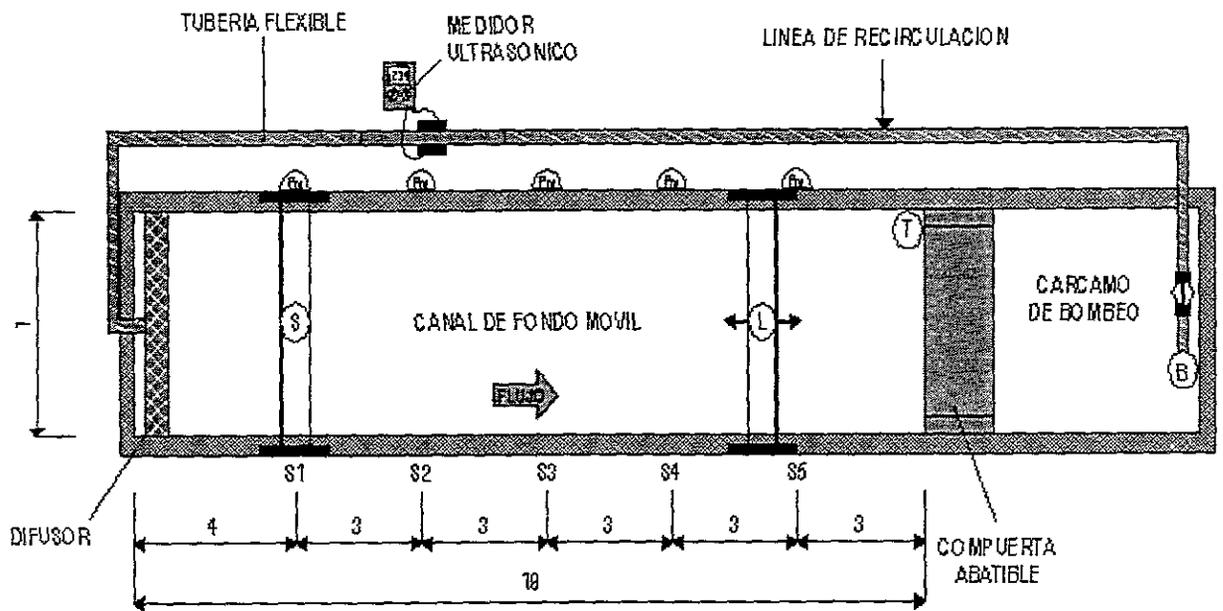
perfiles de velocidad instantáneos con marcadas inflexiones que se han relacionado con los eventos turbulentos de la región de la pared y con el transporte de sedimento de una u otra manera.

No obstante la gran cantidad de publicaciones en relación con estos temas aún no queda clara una explicación de los fenómenos que se desarrollan en la proximidad del fondo para poder conocer los mecanismos del transporte y establecer modelos en donde se considere la interacción del flujo, y el fondo con las formas asociadas y el transporte.

### **3. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL, EQUIPO Y PROGRAMA DE EXPERIMENTOS**

#### ***3.1 Descripción de la instalación experimental***

La instalación experimental utilizada fue un canal de 20 m de largo, 1 m de ancho y 0.54 m de alto. Para proporcionar ya sea agua simple o mezclas de agua con partículas, se usó un sistema de recirculación que consistió de una tubería de PVC de 6" de diámetro conectada a un sistema de dos bombas sumergibles de 2 caballos de potencia a 1800 rpm, con una capacidad máxima de 15 l/s cada una. La alimentación del canal se realizó por medio de un difusor en todo el ancho del canal. Al final del canal se colocó una compuerta abatible para controlar los tirantes. Para amortiguar la turbulencia en la entrada y uniformizar más el flujo en la sección transversal del canal se colocó un pedraplén, una rejilla y popotes en una sección a 1.25 m de la entrada. La zona de pruebas se localizó a 15.0 m aguas abajo de la entrada, con ventanas laterales y fondo de vidrio, para tener acceso visual tanto en el plano horizontal como en el vertical. La uniformidad del flujo se verificó en experimentos preliminares, para lo cual se midieron perfiles transversales de velocidad en diferentes secciones del canal. Los tirantes se midieron con un limnómetro colocado al centro del canal y se verificaron continuamente hasta lograr el estado permanente, y después en el transcurso del experimento para verificar su permanencia. Las mediciones del gasto  $Q$ , se hicieron con un medidor ultrasónico instalado en la tubería de recirculación de flujo. La velocidad media se obtuvo colocando un micromolinete electrónico en la sección de pruebas. En la lámina 3.1 se muestra la instalación experimental.



**VISTA DE PLANTA**

**SIMBOLOGÍA**

(L)	Limnómetro	(T)	Termómetro
(B)	Bomba sumergible	(Pn)	Piezómetro
(S)	Dispositivo para toma de muestras	(V)	Válvula de control
S1 a S6	Secciones de medición		

**NOTAS**

Dimensiones: m

Lámina 3.1 Instalación experimental

Todos los experimentos se efectuaron en la misma instalación que se adaptó de acuerdo con los requerimientos de cada tipo de experimento. En el caso de los experimentos sobre formas de fondo fijas, se adaptaron formas de fondo bidimensionales en un arreglo periódico de 68 elementos triangulares de acrílico. Este arreglo cubrió una longitud de 10.20m, lo que represento aproximadamente el 50 % de la longitud del canal. La zona de pruebas se localizó en la parte central del arreglo. En la figura 3.2 se muestra un esquema general de la geometría de las formas. En la lámina 3.3 se muestra la instalación experimental con las formas de fondo en la sección de pruebas. Para el caso de fondo móvil, se cubrió el fondo del canal con una capa de arena volcánica de 15 cm de espesor. El canal funcionó recirculando el flujo agua sedimento. Para evitar depositación de partículas en el cárcamo de bombeo se colocó un mezclador. Se colocó un flotador y un suministro de agua en el cárcamo de bombeo para mantener la carga constante.

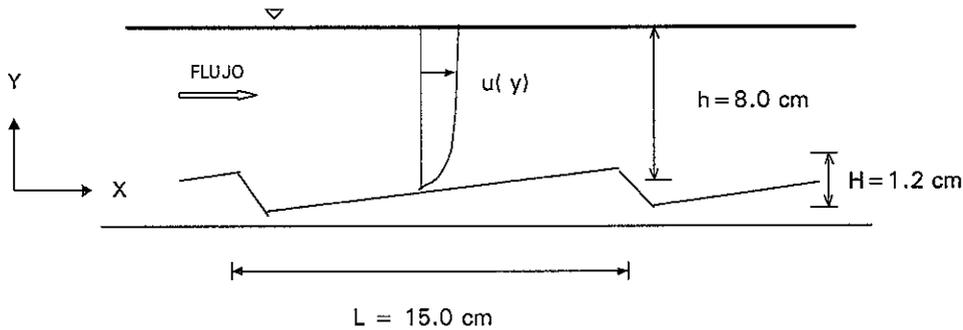


Lámina 3.2 Diagrama de las formas de fondo

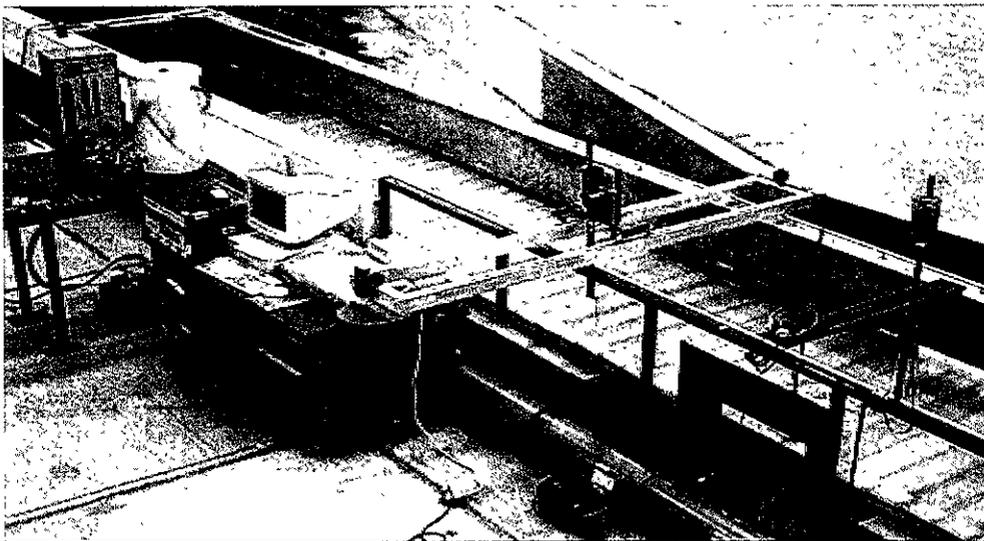


Lámina 3.3. Instalación experimental con formas de fondo.

### 3.2 Equipos y Técnicas experimentales.

#### 3.2.1 Mediciones de turbulencia en flujos de agua.

En orden de elegir el instrumento apropiado para mediciones de turbulencia, estimaron la escalas de turbulencia espaciales y temporales; esto es la microescala  $\lambda$  y el máximo número de onda de la señal que contribuye a la medición. Debido a que la macroescala espacial de las estructuras  $L_x$  es del orden de magnitud del tirante  $h$  en la región externa, la máxima respuesta a la frecuencia  $f_{\max}$  y la microescala  $\lambda$  de turbulencia pueden estimarse de la manera siguiente (Nezu 1993)

$$f \approx \frac{50}{\pi} (U' / h) \quad (3.1)$$

$$\lambda \leq Lx/100 \approx h/100 \quad (3.2)$$

Estrictamente hablando, la microescala de Kolmogoroff , que gobierna la disipación de energía turbulenta, debe usarse  $\eta$  como microescala en lugar de  $\lambda$ ; en este caso si se consideran los datos del experimento típico,  $h=0.08\text{m}$ ,  $U=0.23\text{ m/s}$ .

Las estimaciones de las ecuaciones (3.1) y (3.2) son:

$$f_{\text{máx}} \approx (50/\pi) ((0.23)/0.08) = 45.76$$

$$f_{\text{máx}} \approx 46 \text{ Hz}$$

$$\lambda \leq L / 100 \approx h/100 = 0.08/100 = 0.0008 = 0.8\text{mm}$$

$$\lambda \leq 0.8 \text{ mm}$$

La frecuencia de muestreo de los datos se elige de manera que se satisfaga la condición :  $f \geq 2 f_{\text{máx}}$  en este caso  $f \geq 92$

La respuesta a la frecuencia del anemómetro de película caliente usado en la medición fue de 1000 Hz con esta frecuencia se cumple con el criterio propuesto por Nezu.

### 3.2.2 Técnica de anemometría de película caliente

Las técnicas de anemometría de hilo o película caliente miden las componentes de velocidad instantáneas del flujo. Las pequeñas dimensiones de los sensores y su buena respuesta en frecuencia los hace especialmente adecuados para estudiar flujos turbulentos.

En este trabajo se usó un equipo de anemometría de película caliente TSI con el que se cuenta en el laboratorio Enzo Levi. Los sensores de película caliente son elementos de longitud y diámetro pequeño (.25 mm) lo más común es que sean de

tungsteno, platino u otro metal conductor. Cada sensor es sostenido por dos patas sujetas a un elemento de soporte. El principio de funcionamiento de los sensores térmicos consiste en mantenerlos a una temperatura constante usando un circuito electrónico de control, del tipo puente de Wheatstone. Cuando se coloca el sensor en el flujo de un fluido, éste tiende a enfriarlo, así que para mantenerlo a temperatura constante se requiere de un circuito de retroalimentación, en el control electrónico, que incremente la corriente eléctrica a través del sensor. El cambio en la corriente eléctrica produce un cambio en el voltaje del puente de wheatstone. Dicho voltaje está directamente relacionado con la transferencia de calor del sensor al fluido y consecuentemente a la velocidad con que pasa el fluido sobre el sensor. Los dos tipos de sensores de película caliente usados más frecuentemente en el estudio de flujos turbulentos, son los sensores de un solo hilo y los sensores dobles en "X" a 90° que se presentan en la lámina 3.4 y se describen a continuación:

- 1) Un sólo hilo normal a la corriente, usado para medir las fluctuaciones de velocidad en dirección de la corriente  $U$ , en las mediciones se usó un sensor modelo TSI210-20W el cual es indicado para mediciones de velocidad en flujos de agua.
- 2) Un par de hilos arreglados en forma de "X" a aproximadamente 45° de la dirección del flujo: idealmente, un hilo en "X" en el plano  $xy$  corresponde a  $u + v$  y el otro a  $u - v$ , de acuerdo con la ley de los cosenos, de manera que la diferencia entre las señales de los dos hilos es  $2v$ , en la práctica, los hilos no son idénticos hidrodinámicamente ni tienen la misma resistencia por lo que su sensibilidad es diferente. En esta investigación se usó un sensor modelo TSI1245-20W

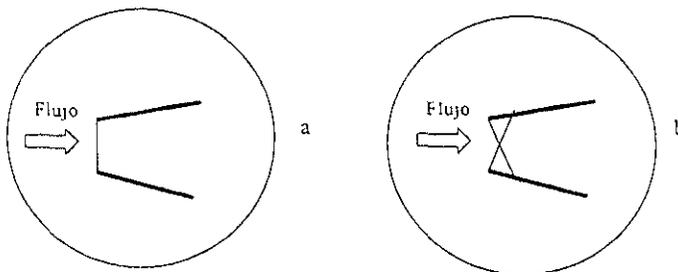


Lámina 3.4. Sensores de película caliente, a) de un solo hilo, b) hilo doble en "X" a 90°

Calibración de sensores.

Para la calibración de los sensores se usó el siguiente equipo y software:

- Equipo de calibración para agua, TSI modelo 10180
- Sistema de anemometría TSI, IFA 100
- Sistema digitalizador de canales múltiples TSI, IFA 200
- Programa de adquisición y análisis de datos TSI, DAP

La calibración de los sensores se efectuó en el equipo de calibración TSI modelo 10180, asignando valores de velocidad conocidos en uno de los rotámetros. Se asignaron 15 valores diferentes de velocidad, cubriendo un rango que varió desde 0.03 hasta 0.80m/s, rango en el cual se encontraba la velocidad media del flujo en estudio. Con los datos de voltaje obtenidos el programa calcula los coeficientes del polinomio de cuarto orden para obtener la curva de calibración.

La adquisición de datos se realizó con las unidades IFA 100 e IFA 200 para convertir la señal de analógica a digital. El programa DAP permite la adquisición de datos a partir del sistema IFA 100, calcula velocidades medias, desviación estándar, entre otros parámetros. El error en la medición de la velocidad media con el anemómetro de película caliente fue del orden del 2%.

Durante la calibración se tuvo cuidado en controlar la temperatura del agua, puesto que los medidores son muy sensibles a ésta. La temperatura de calibración y la del flujo en el cual se realizaron los experimentos se mantuvieron en un mismo valor ( $\pm 1^\circ$ ). En la lámina 3.4 se muestra el equipo de adquisición de velocidades de TSI junto a la sección de pruebas.

### 3.2.3 Técnicas de visualización de flujo.

Para la visualización del flujo en canales las técnicas más comunes son: inyección de tinta; generación de burbujas de hidrógeno e inyección de partículas o trazadores. En esta investigación se usaron las tres técnicas de visualización.

*-Inyección de tinta.* Se empleo para detectar estructuras vorticosas en el flujo. En este

caso el colorante fue azul de metileno diluido con agua. Esta solución se inyectó por medio de una aguja en la frontera inferior del canal. La ubicación de los puntos de inyección se eligieron estratégicamente para la detección de las estructuras del flujo.

*-Generación de burbujas de hidrógeno.* Se decidió usar esta técnica debido a que en numerosos estudios de visualización de flujo combinados con técnicas de medición con anemometría de película caliente o de laser doppler, han tenido problemas cuando intentan interpretar las mediciones puntuales de velocidad y relacionarlas con los patrones de las estructuras observadas en una cierta región. La técnica de generación de burbujas de hidrógeno en combinación con un equipo de video de alta velocidad Kodak Ektapro permitió obtener mediciones de velocidad en varios puntos simultáneamente y acumular esas mediciones en un periodo de tiempo en el que se siguió la evolución del campo de flujo. La generación de burbujas de hidrógeno se produce a partir de un alambre muy fino que es el ánodo de un circuito de corriente directa, el cátodo comúnmente es una placa de cobre que se coloca cerca del ánodo en la corriente del agua. Cuando se aplica voltaje al circuito se produce la liberación de burbujas de hidrógeno por electrólisis. Si el voltaje se proporciona en forma de pulsos cuadrados se forman líneas discretas de burbujas. Para que las burbujas puedan seguir los movimientos locales del agua es necesario que sean muy pequeñas de manera que los efectos de flotación sean mínimos y las trayectorias de las burbujas duren más siguiendo las líneas de corriente. El diámetro de las burbujas está relacionado con el diámetro del hilo, se recomienda usar un hilo de 0.25 a 0.05mm. Para aumentar la densidad de las burbujas se le pueden agregar electrolitos al agua. En estos experimentos, el voltaje que se le proporcionó al circuito fue de 13 volts y como electrolito se añadió sulfato de sodio en una concentración de 0.075 g/l. Se diseñó y construyó un circuito para controlar los pulsos del voltaje, este consistió de un timer, un potenciómetro, un condensador y resistencias.

*-Inyección de partículas.* Esta técnica se empleó de manera simultánea con la de visualización de burbujas de hidrógeno. En este caso los trazadores fueron partículas de sal que sirvieron para inferir las trayectorias de los sedimentos.

Para la adquisición de imágenes se emplearon dos técnicas:

1. *Imágenes de alta velocidad en un plano.* Se empleó un equipo de video Kodak Ektapro de alta velocidad que permite la grabación de hasta 1000 cuadros por segundo. Con este equipo se grabaron las imágenes en el plano vertical, el de mayor cortante. Esta técnica se aplicó para hacer el seguimiento de las burbujas de hidrógeno, con el software MAW del inglés Motion analysis workstation, se obtuvieron las velocidades en la dirección  $u$  de la corriente y en sentido vertical  $v$ . Los perfiles de velocidad instantáneos en secuencia generaron campos de velocidad más completos en los que se logra definir la región de recirculación de flujo.
2. *Imágenes en dos planos.* Se instalaron dos cámaras de video a color, profesionales Sony DXC325/325 con una velocidad de 30 cuadros/s (NTSC) conectadas a un mezclador de imágenes Sony SEG-200A con el cual las dos imágenes quedaron integradas en un mismo plano. Las imágenes sincronizadas de las vistas en planta y lateral en forma simultánea permitieron obtener una concepción tridimensional de las estructuras del flujo. Así por ejemplo si se observa una eyección, con la vista de un plano solamente es imposible saber si el movimiento del fluido es solo en la vertical, o si involucra un movimiento en el sentido transversal, tal como una rotación y estiramiento simultáneo en el sentido longitudinal. La visualización con dos cámaras resuelve este problema.

Para sincronizar las mediciones de anemometría con las imágenes, se conectó un timbre que se activó en el momento de hacer la adquisición de velocidades, este se detectó auditivamente en el video. Las imágenes de video se grabaron en un sistema de grabación U-matic VO9850 y posteriormente se pasaron a cassettes VHS. En la lámina 3.5 se muestra esquemáticamente el sistema de medición y visualización.

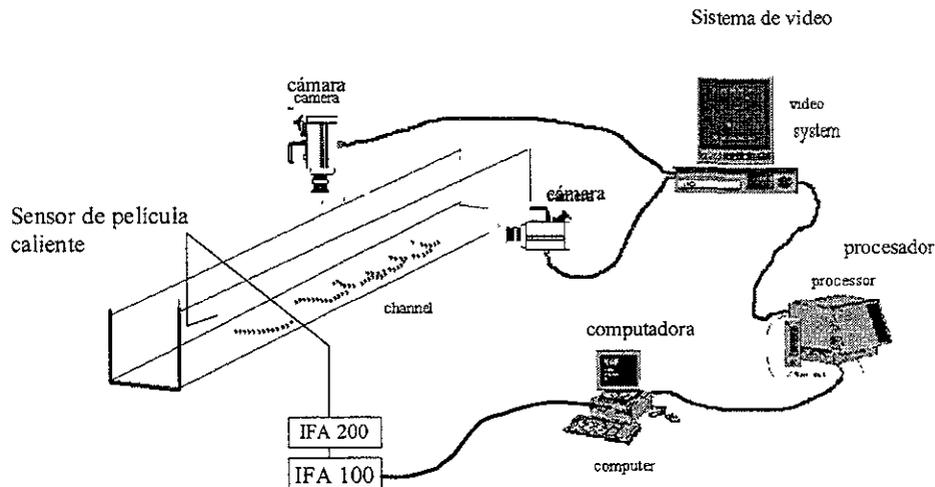


Lámina 3.5. Esquema general del sistema de medición y visualización

En esta investigación doctoral se busca conciliar los resultados de la visualización de flujo y los datos adquiridos a partir de sensores locales, con el propósito de identificar, estudiar y caracterizar estructuras coherentes en canales. En particular, resulta de sumo interés estudiar la relación existente entre la ocurrencia de estos eventos intermitentes y la suspensión de sedimento desde el lecho en canales.

### 3.3. Programa de experimentos, procedimiento experimental, y procesamiento de datos.

#### 3.3.1 El programa de experimentos.

Los experimentos realizados fueron los siguientes:

**1.- Experimentos preliminares para el Caso Canónico Unifásico o flujo sobre una placa plana lisa.** Estos experimentos se hicieron con el objetivo de verificar la uniformidad del flujo en el canal y la consistencia de los resultados al repetir los experimentos para condiciones hidráulicas propuestas. Verificación del buen funcionamiento de los sistemas de medición y visualización.

**2.- Experimentos Caso Canónico Unifásico.** Estudio de estructuras turbulentas sobre un fondo plano liso. Identificación de estructuras coherentes y sus características espacio-temporales. En esta etapa se reprodujeron experimentos establecidos y se verificó el funcionamiento tanto del canal como de los instrumentos de medición y visualización. Los experimentos comprendieron:

- Medición de fluctuaciones de componentes de velocidad, obtención de velocidades medias. (perfiles de velocidad media)

- Obtención de autocorrelaciones temporales para detectar el tiempo de duración de estructuras coherentes.
- Visualización de flujo en dos planos para inferir la tridimensionalidad de las estructuras y análisis de estructuras coherentes.

Para el estudio de la Interacción de estructuras turbulentas transporte de sedimento y formas de fondo se realizaron los siguientes experimentos:

Estudio experimental del flujo sobre formas de fondo fijas (elementos triangulares) bidimensionales. En este caso se realizaron dos series de experimentos:

**3. Experimentos preliminares para el Caso no canónico unifásico o flujo sobre formas de fondo bidimensionales fijas triangulares.** verificar la uniformidad del flujo.

**4. Experimentos Caso no canónico unifásico o flujo sobre formas de fondo bidimensionales fijas triangulares.** En estos experimentos se realizaron las siguientes mediciones:

- Estudio clásico (velocidades medias, intensidad de turbulencia, esfuerzos de Reynolds)
- Con las técnicas de visualización de flujo (inyección de tinta, generación de burbujas de hidrógeno y trazadores como partículas.
- Clasificación de estructuras coherentes
- Caracterización espacio-temporal

De acuerdo con las mediciones y observaciones proponer modelos de mecánica de fluidos para explicar la mecánica de las estructuras. Con herramientas de topología de flujo y sistemas dinámicos, proponer un modelo que explique la dinámica de los eventos en un flujo sobre formas de fondo.

**. 5. Estudio experimental del flujo en un canal con fondo móvil con formas de fondo tridimensionales.**

- Medición de concentraciones a diferentes profundidades (perfiles de concentración)
- Medición de los perfiles del fondo del canal (geometría de las formas de fondo y clasificación)

- Identificación de las estructuras coherentes en un flujo sobre fondo móvil con formas de fondo tridimensionales.

Con base en los experimentos realizados en fondo móvil y las grabaciones en videos, proponer los mecanismos de transporte de sedimentos y evolución de formas de fondo

En la tabla 3.1 se presenta en forma resumida el programa experimental y las técnicas de medición utilizadas en cada tipo de experimento.

### 3.3.2. Procedimiento experimental.

El procedimiento estándar para fijar las condiciones de operación cada vez que se inició un experimento dado, fue el siguiente: Inicialmente se llenó el canal con agua limpia y se encendió la bomba con un gasto bajo, una vez lleno el canal se dieron las condiciones de gasto y tirante correspondientes al experimento deseado. El gasto se controló con una válvula instalada en la tubería de recirculación de flujo, el tirante se controló con una compuerta abatible al final del canal. En el transcurso de los experimentos se verificó continuamente que fueran permanentes las condiciones de operación (gasto, tirante, velocidad media en el canal). La medición de los tirantes se hizo con un limnómetro y la aproximación fue de  $\pm 1.00$  mm. La velocidad media se midió con un micromolineté electrónico con una aproximación de 0-001m/s. En los capítulos correspondientes se presentan las características específicas de las series de experimentos efectuados en cada etapa de la investigación.

### 3.3.3 Procesamiento de datos.

Se considero el uso de la estadística para la cuantificación de las velocidades medias, intensidades de turbulencia y esfuerzos de Reynolds. Para el análisis de las imágenes de video obtenidas de la visualización de flujo se usaron conceptos de topología de flujo que ayudaron a dar una descripción de la dinámica de las estructuras del flujo.

-Propiedades medias

En cada serie de experimentos se calcularon los parámetros hidráulicos siguientes:

En condiciones de equilibrio las velocidades medias y los tirantes medios del flujo se calcularon promediando las velocidades medidas y tirantes del flujo.

Número de Froude :

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}} \quad (3.3)$$

Número de Reynolds

$$Re = \frac{Uh}{\nu} \quad (3.4)$$

Número de Reynolds con la velocidad cortante

$$Re_* = \frac{u_* h}{\nu} \quad (3.5)$$

Velocidad cortante

$$u_* = \sqrt{Sgh} \quad (3.6)$$

Periodo adimensional

$$T = \frac{UT}{h} \quad (3.7)$$

Donde:  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $S$  es la pendiente de la superficie libre del agua,  $h$  es el tirante,  $u_*$  velocidad cortante,  $T$  periodo adimensional,  $T$  periodo,  $U$  velocidad media de la corriente,  $\nu$  viscosidad cinemática.

-Determinación de las escalas espacial y temporal de las estructuras coherentes a partir de la función de autocorrelación. Correlaciones espaciales, temporales y su significado físico.

Para obtener información cuantitativa de las escalas espacio-temporales de las estructuras coherentes, fue necesario analizar las correlaciones temporales de variables como la velocidad instantánea del flujo, que se obtuvieron usando la técnicas anemometría de película caliente.

El modelo conceptual de la turbulencia como compuesta por muchos remolinos superpuestos al flujo medio sugiere que las componentes de velocidad medidas en dos puntos al mismo tiempo deberán estar relacionadas entre sí cuando pertenecen al mismo remolino o estructura. Teniendo esto en cuenta, el tamaño de los remolinos se podrá determinar midiendo por ejemplo la componente  $u$  de la velocidad en dos puntos (A y B). Si los remolinos son grandes la correlación  $R_{AB}$  alcanzará el valor "cero" para distancias grandes entre A y B. Por el contrario se hará rápidamente "cero" cuando los remolinos sean pequeños. Esto es, la correlación espacial de dos variables con separación  $r$  es una medida del tamaño de las estructuras en la dirección a que se refiera. Por otra parte tenemos la autocorrelación, que es la correlación de la misma variable en dos tiempos diferentes pero en el mismo punto. Las correlaciones espaciales de las componentes de la velocidad obtenidas con anemometría de película caliente son difíciles de realizar debido a que es necesario colocar varios sensores a lo largo, por ejemplo, de la dirección del flujo, provocando perturbaciones en el mismo flujo que afectan las mediciones aguas abajo. Por ello en general se recomienda obtener autocorrelaciones que dan resultados, aunque limitados, más realistas. Con la autocorrelación en el tiempo lo que se estima la duración de la estructura. Con ese valor se puede inferir el tamaño de las estructuras, conociendo la velocidad del flujo.

Si se usan los símbolos  $R_{11}$ ,  $R_{22}$  y  $R_{33}$  para las correlaciones de  $u$ ,  $v$  y  $w$  respectivamente. La autocorrelación en el tiempo se puede escribir como:

$$R_{uu}(\tau) = \frac{u(t)u(t+\tau)}{u(t)^2} \quad (3.8)$$

-Distribuciones características de fluctuaciones de velocidad, esfuerzos de Reynolds e intensidad de la turbulencia.

Las velocidades en el sentido de la corriente,  $u$ , en sentido vertical  $v$ , y lateral  $w$ , fluctúan alrededor de un valor medio que es muy cercano a cero, pero no necesariamente cero. Por definición, la media de las fluctuaciones de velocidad turbulenta  $u, w, v$  son cero, ya que estas se obtienen después de haber restado el valor medio  $U, W$  y  $V$  de las velocidades instantáneas  $u, w, v$ . Sin embargo, su raíz media cuadrada (rms)  $u', v', w'$  es diferente de cero. Estas frecuentemente se adimensionalizan dividiendo por  $U$  o  $u_*$  y se usan para medir la intensidad de la turbulencia  $u'/u_*, v'/u_*, w'/u_*$ .

En cada sección y para cada uno de los puntos se midieron las componentes longitudinal y vertical de la velocidad instantánea. A partir de estos valores se calcularon las velocidades medias en dirección de la corriente  $U$  y de la velocidad vertical  $V$ , estas se determinaron calculando la media aritmética. Las intensidades de turbulencia, raíz media cuadrada (rms) de la fluctuación alrededor de la media de cada componente ( $u', v'$ ), se calcularon con las fórmulas:

$$u' = [1/n \sum (u_i - U)^2]^{1/2} \quad (3.9)$$

$$v' = [1/n \sum (v_i - V)^2]^{1/2} \quad (3.10)$$

donde  $n$  es el número total de mediciones;  $u_i$  y  $v_i$  son las velocidades instantáneas longitudinales y verticales respectivamente.

Los esfuerzos de Reynolds  $\tau_R$ , se determinaron usando:

$$u'v' = 1/n \sum (u_i - U) (v_i - V) \quad (3.11)$$

$$\tau_R = -\rho u'v' \quad (3.12)$$

Tabla 3.1. Programa experimental

Experimentos	Fondo	Q(m <sup>3</sup> /s)	h (m <sup>2</sup> )	U (m <sup>2</sup> /s)	Fr	Re	Mediciones y Técnicas
1.-Preliminares caso canónico unifásico  <i>Objetivo</i> Verificar la uniformidad del flujo Probar las técnicas de medición y el equipo	Plano liso	0.012	8.3	15.0	0.169	12,450	-Mediciones de u→t en un punto en diferentes tiempos -Medición de u→t en dos puntos en diferentes tiempos -Perfiles de velocidad a cada 0.5 cm a partir del fondo y en secciones transversales.  <i>Técnicas</i> Anemometría de película caliente y visualización de flujo (tinta) en dos planos en sincronía con sonido.
2.-Caso canónico unifásico  <i>Objetivo</i> Estudiar las estructuras coherentes en la capa límite turbulenta	Plano liso	0.012	8.0	15.0	0.169	12,000	Detección de estructuras coherentes en la capa límite. -ángulo de desprendimiento -obtención de sus características espacio-temporales.  <i>Técnicas</i> Anemometría de película caliente y visualización simultánea logrando una concepción casi tridimensional de flujo en dos planos en sincronía con sonido.
3.-Preliminares Caso no canónico unifásico  <i>Objetivo</i> para verificar la uniformidad del flujo	Formas de fondo fijas	0.012	8.0	15.0	0.169	12,000	-Medición de velocidades instantáneas, u -Perfiles de velocidad  <i>Técnicas</i> Anemometría de película caliente, visualización con tinta.
4.-Caso no canónico unifásico  <i>Objetivo</i> Estudiar las estructuras coherentes en un flujo sobre formas de fondo bidimensionales fijas y los mecanismos de transporte de sedimentos en condiciones más sencillas	Formas de fondo fijas	0.012-0.028	0.06-0.08	15.0-35.0	0.169-0.3951	12,000-28,400	-Medición de componentes de velocidades instantáneas (u,v). -Perfiles de velocidad (u,v) -obtención de características turbulentas ; intensidad de turbulencia y esfuerzos de Reynolds. -Detección de estructuras coherentes -Topología del campo de flujo -mecanismos de transporte.  <i>Técnicas:</i> Anemometría de película caliente, visualización de tinta simultánea en dos planos y generación de burbujas de hidrógeno (Obtención de perfiles de velocidad instantáneos), visualización de flujo con partículas trazadoras. Comparación con otros autores: Lyn (1993), Nelson(1993) , Bennett y Best (1995).
5.-Caso no canónico bifásico.  <i>Objetivo</i> Estudiar la Interacción estructura-flujo-formas de fondo. y su relación con los mecanismos de transporte de sedimentos	Fondo móvil d= 0.019m	0.012-0.024	7.5-9.8	18.4-28.0	0.215-0.285	13,800-27,440	-Medición de concentraciones de sedimento a diferentes profundidades (Obtención de perfiles de concentración) -Características de formas de fondo (geometría, tipo de formas) -video de experimento completo (duración 8 hrs) filmación en planta -Detección de estructuras turbulentas inferencia de mecanismos de transporte de sedimentos  <i>Técnicas</i> Visualización de flujo, filmación en video Comparación con otros autores: Barton y Lin (1955) , Guy et al (1961), Van Rijn (1993).

## 4. ESTUDIO DE LA ESTRUCTURA DEL FLUJO SOBRE UN FONDO PLANO LISO CASO CANÓNICO

### 4.1. Antecedentes

Se ha demostrado que las estructuras coherentes, caracterizadas por estrías de baja velocidad, vórtices en la dirección de la corriente, y “burstings” observados en la capa de fluido cercana a la pared, son las responsables de gran parte de la producción de energía de la turbulencia. El trabajo experimental llevado a cabo en las últimas décadas ha contribuido a aumentar el conocimiento acerca de varios aspectos de la estructura interna de la región de la pared. Sin embargo, la interacción entre la capa interna, externa y su significado físico no está aun del todo clara.

Para facilitar la presentación del tema a continuación se describen algunos de los principales términos utilizados:

Una estructura coherente se define como la región de un flujo tridimensional en la cual al menos una de las variables fundamentales del flujo (componente de la velocidad, densidad, temperatura, etc.) exhibe una correlación significativa consigo misma o con otra variable, ya sea en el espacio o, en el tiempo, la cual es significativamente mayor que las escalas del flujo más pequeñas, Robinson (1991).

A la región  $y^+ \leq 100$  comúnmente se le considera la región de la pared; ésta incluye la subcapa laminar, la región de transición o “buffer layer”, y por último parte de la región logarítmica. Al resto de la capa límite usualmente se le refiere como región externa.

Las unidades de pared indicadas por el superíndice “+” se refieren a la normalización de la variable con respecto a la velocidad cortante y a la viscosidad ( $\nu/u_\tau$ ).

En la región de la pared, el campo de velocidades se organiza en estrías longitudinales alternadas de alta y baja velocidad que persisten la mayor parte del tiempo. La mayor

producción de turbulencia en la capa límite ocurre en la región de la pared durante las eyecciones intermitentes y violentas de fluido de baja velocidad hacia afuera de la pared y durante los barridos o entradas de fluido de alta velocidad hacia la pared. El proceso de eyección intermitente, en una secuencia cuasi-cíclica, es llamado *bursting*. Durante este proceso, las estrías de baja velocidad se levantan hacia afuera de la pared, oscilando, y rompiéndose, de tal manera que una porción de fluido de velocidad baja es eyectado hacia la capa externa.

En la región externa, existen estructuras vorticosas tridimensionales que se pueden escalar con el espesor de la capa límite, éstas aparecen a partir de la interfaz turbulenta/no turbulenta. Aunque parece que la región interna produce por sí misma la secuencia de movimientos coherentes, se cree que la estructura externa tiene cierta influencia en los eventos de la región de la pared, y que a su vez, estos están influenciados o dependen del número de Reynolds. La dinámica entre la región interna de gran producción de turbulencia y la región externa de estructuras vorticosas de mayor escala pero menos activa, no se ha alcanzado a entender completamente.

Kline *et. al.*, (1967) fueron los primeros en realizar una investigación sistemática y cuantificar el fenómeno de las estrías de alta y baja velocidad. Ellos realizaron un gran número de experimentos haciendo visualización de flujo con la técnica de burbujas de hidrógeno en la región  $y^+ = 2.7$ , encontrando que las burbujas no seguían trayectorias rectas sino que se presentaban arreglos alternados de regiones de alta y baja velocidad, regiones llamadas estrías. Ellos observaron que estas estructuras se levantaban periódicamente, oscilaban, se hacían inestables y rompían caóticamente. El ciclo se repetía terminando con una entrada de agua que remplazaba el fluido expulsado de la región de la pared.

Kim *et. al.*, (1971) mostró que la mayor parte de la producción de energía de la turbulencia para el rango  $0 < y^+ < 100$  (es decir en la región de la pared) ocurría durante los eventos de levantamiento y rompimiento de las estrías. Más tarde otros investigadores (Grass, 1971; Willmarth y Lu, 1972; Nakagawa y Nezu, 1977)

observaron que los eventos de eyección y barrido o entrada de fluido de alta velocidad son muy importantes, dado que aportan entre el 60 y el 80 por ciento de los esfuerzos de Reynolds. Los experimentos desarrollados por Grass (1971) mostraron que los eventos de eyección y barrido se presentan independientemente de la rugosidad del fondo.

De las diferentes investigaciones se ha aceptado definir la distancia entre las estrías de baja velocidad en un rango de  $\lambda^+ \approx 100$ , en  $y^+ = 5$ , donde  $\lambda^+$  es el espacio medio entre estrías el cual se incrementa con la distancia a la pared. Blackwelder y Eckelmann (1979) haciendo un estudio detallado de la estructuras de la pared, usando una combinación de sensores de hilo caliente, identificaron las estrías de baja velocidad observadas por Kline *et al.* (1967) y otros como las regiones entre vórtices pares que giran en sentidos contrarios avanzando en la dirección de la corriente. Ellos encontraron que los vórtices en la dirección de la corriente tenían una separación  $\Delta z^+ \approx 50$  y su longitud  $\Delta x^+ \approx 1000$ , ver lámina 4.1. Estos vórtices generalmente se originaron con un ángulo de 15-25 grados para  $y^+ < 20$  y se levantaron y rompieron caóticamente con un ángulo de 40-50 grados para  $y^+ > 20$ .

Varios autores (Kline *et al.*, 1967,1971,1975, Nakagawa y Nezu, (1977) encontraron que las estrías de baja velocidad poseen una separación transversal característica casi constante  $\lambda_x^+ = \lambda U. / v = 100$

El espaciamiento entre estrías se incrementa con la distancia a la pared y tienen una velocidad típica de  $0.5 U_m$

Con base en visualización de flujo y mediciones de promedios de velocidad condicionados se llegó a un consenso de que los bursting pueden describirse también como vórtices de horquilla y el proceso como un tubo vorticoso transversal al flujo que ondula debido a disturbios tridimensionales, se levanta y se mueve hacia fuera de

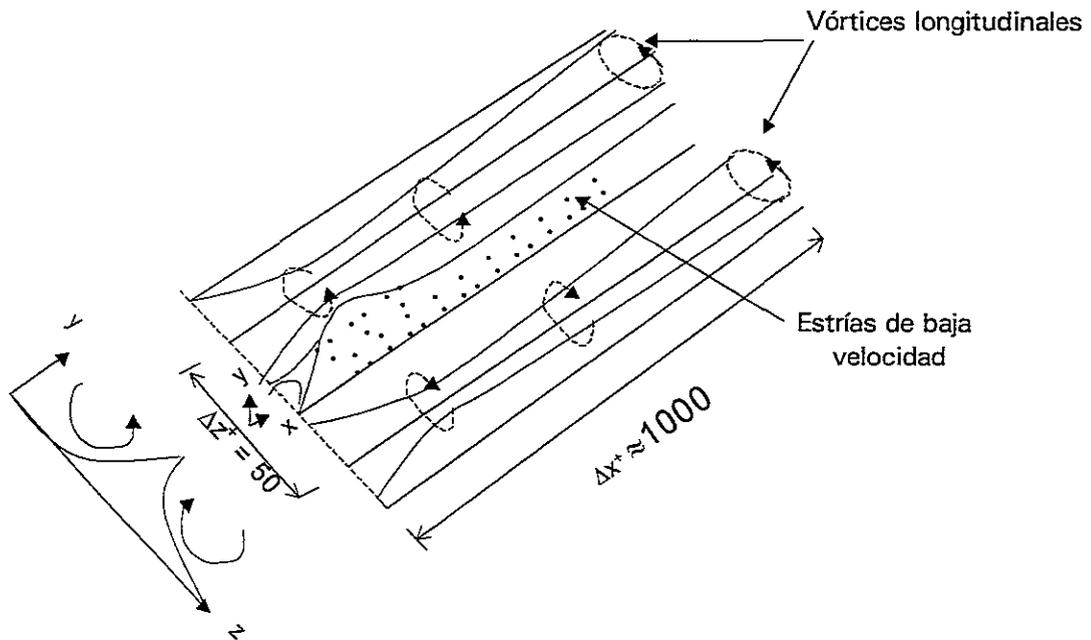


Lámina 4.1 Modelo de vórtices longitudinales que rotan en sentidos contrarios, estrías de baja velocidad. Blackwelder y Kaplan, 1976.

la pared por el flujo inducido por la misma estructura. De acuerdo con observaciones visuales Smith y Walker (1990) presentaron un modelo de desarrollo de estas estructuras vorticosas. Una vez que se generó un vórtice de horquilla en la capa límite, la interacción vorticosa incluye un crecimiento lateral e interacciones Biot-Savart, generando vórtices de horquilla subsidiarios en los lados del vórtice original y vórtices secundarios aguas arriba detrás del vórtice principal como se muestra en la lámina 4.2. Este proceso continua hasta que la disipación viscosa limita la expansión de los vórtices.

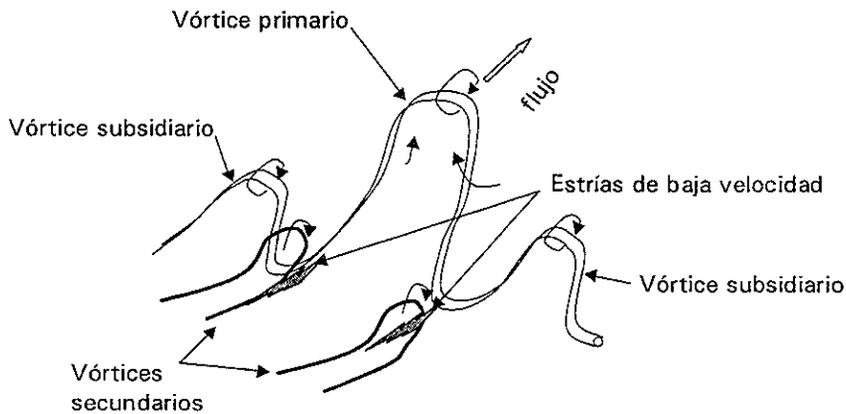


Lámina 4.2 Modelo de la estructura de la capa límite con vórtices primarios, secundarios, con estrías longitudinales de baja velocidad, Smith y Walker, (1990).

Robinson (1990a) presentó un modelo conceptual de varias estructuras vorticosas dentro de la capa límite turbulenta e ilustró como la forma de los vórtices varía de acuerdo con su posición en relación con la distancia a la pared (ver lámina 4.3)

. En la región de mezclado dominan las estrías de baja velocidad pero conforme se levantan se forman unas estructuras en forma de arco o herradura. Esta tendencia continua hasta que los vórtices de herradura son levantados y estirados hacia el flujo externo. Estos modelos definen mecanismos para la generación de vorticidad en la capa límite sobre una placa plana.

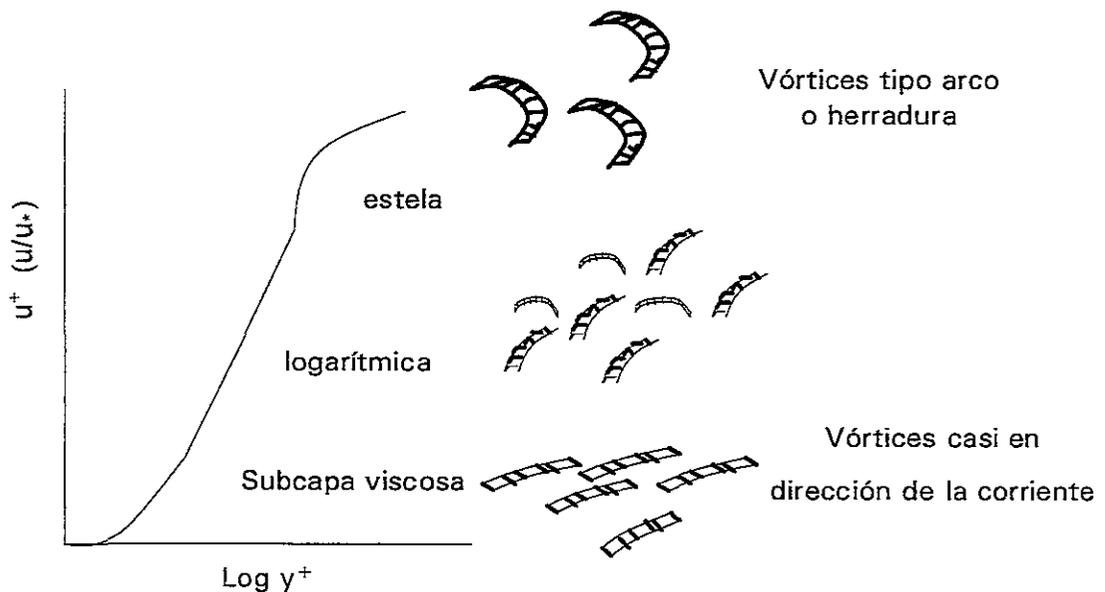


Lámina 4.3. Modelo de estructuras vorticosas dentro de la capa límite, Robinson (1990a).

Otros trabajos recientes como son los de: Smith y Metzler (1983), Monin y Kim (1985), Luichik y Tiederman (1987), Kim *et. al.* (1987), Rashidi y Banerjee (1990), Nakagawa y Nezu (1993), Rashidi (1997). En particular es interesante mencionar el trabajo de Rashidi (1997), que es uno de los más recientes acerca de los burst en flujos a superficie libre. En él se engloban algunas de las observaciones ya concensadas por investigaciones previas y de las estructuras que aparecen de la interacción de los burst con la superficie libre. Rashidi presenta un esquema conceptual de las principales estructuras de un flujo a superficie libre, (ver lámina 4.4). En él las estrías de baja velocidad aparecen cerca de las fronteras (pared o intercara) como resultado del esfuerzo cortante. Conforme estas estructuras se sitúan cerca de la frontera, son estiradas gradualmente y levantadas por el flujo medio, el cual contiene mayor cantidad de movimiento, esto produce vórtices inclinados en la dirección de la corriente. Estos vórtices se asemejan a una *herradura* (cuando se marcan las dos piernas) o a un palo de *hockey* cuando tienen una sola pierna, estos se encuentran cerca de la pared. Estos vórtices se alinean en la dirección del flujo y sus cabezas se inclinan con un ángulo de  $\approx 45^\circ$  y sus piernas con un ángulo de  $\approx 22^\circ$ .

Conforme estos vórtices crecen hasta una cierta distancia de la pared  $y^+ \approx 20 - 40$  empiezan a oscilar por la interacción con el flujo medio de mayor cantidad de movimiento. Como resultado se tienen una o varias eyecciones a lo largo de su longitud ( $\Delta x^+ \approx 500$ ); después pierden su identidad. Las eyecciones transportan el fluido de menor cantidad de movimiento hacia fuera de la pared, estas causan la formación de vórtices transversales que se enrollan con el flujo, y que se aproximan a la superficie libre acelerando el fluido que se encuentra entre ellos y la superficie, esto produce un ligero levantamiento u ondulación de la superficie libre (upsurge). El fluido que alcanza la superficie, rota hacia la pared formando vórtices downswinging (entradas de flujo en forma de barrido). En la superficie libre, la interacción burst-superficie libre genera diversos tipos de estructuras. 1. Regiones de flujo acelerado hacia fuera de la pared, debida a eyecciones o upsurge, 2. Regiones de flujo hacia la pared a partir de la superficie (down surge), 3. Vórtices superficiales casi bidimensionales que se forman en los límites de las regiones de flujo hacia fuera (zonas elevadas, de la superficie libre), hacia adentro (zonas con hundimientos) debidas a la deformación de la superficie y a diferencias de las velocidades superficiales entre las estructuras que salen y las que entran a la pared.

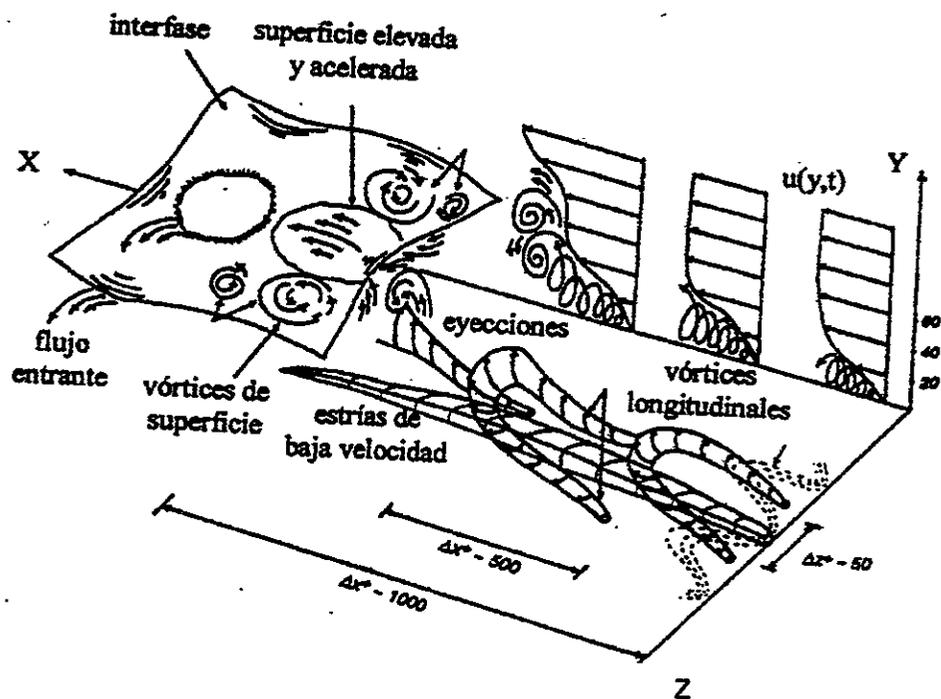


Lámina 4.4. Esquema conceptual de las estructuras de un flujo a superficie libre y el proceso del bursting, Rashidi (1997).

Los estudios previos han confirmado algunas características de las estrías y de los vórtices discutidas anteriormente, sin embargo, existen todavía muchas preguntas para la comprensión de las estructuras del flujo. Comúnmente se invocan argumentos de inestabilidad para explicar el nacimiento de los vórtices. Los detalles de la generación, evolución e interacción de los vórtices permanecen en discusión.

Los puntos más importantes que persisten como incógnitas en el estudio de las estructuras coherentes son los siguientes:

- La formación de estrías en la región de la pared
- El proceso del bursting
- La transferencia de masa y de momentum entre las regiones interna y externa de la capa límite

- El efecto del número de Reynolds y las escalas apropiadas para escalar las variables en los eventos de producción de turbulencia en la región de la pared.
- La existencia y el papel que juegan los vórtices de horquilla/ (de herradura) y anulares.

Aunque existe consenso en muchas de las características cinemáticas de las estructuras coherentes, la dinámica, incluyendo los principios de causa-efecto, permanecen sin entenderse completamente. Por lo tanto, una investigación de la estructura espacio-temporal del fenómeno de bursting, contribuirá no solamente a confirmar, sino a refinar la descripción física del fenómeno del bursting.

En el presente estudio se investigaron los fenómenos de la región de la pared en un canal con fondo liso, horizontal, con técnicas de anemometría de película caliente y visualización del flujo en dos vistas (lateral y en planta) para inferir las características de tridimensionalidad de estas estructuras.

#### ***4.2 Instalación experimental y experimento tipo.***

Los experimentos se efectuaron en la instalación experimental descrita en el capítulo tres. En este caso el fondo fue liso, sin pendiente, la sección de medición se localizó a 10 metros aguas abajo de la entrada. Se utilizó el equipo de anemometría de película caliente para medir las velocidades instantáneas, y las técnicas de visualización de inyección de tinta descritas anteriormente. Se pintó tanto el fondo del canal como la pared posterior con pintura blanca, para lograr un mayor contraste y obtener mejores imágenes, también fue muy importante la iluminación.

El sensor de película caliente permitió la medición de las componentes de velocidad  $u'$  en dirección de la corriente. La visualización se obtuvo inyectando azul de metileno por medio de una aguja hipodérmica colocada en el lecho del canal.

Las características de experimentos típicos se muestran en la tabla 4.1. Estas condiciones fueron semejantes a estudios previos realizados por Nezu (1981).

Tirante $h$ (cm)	8.0
Gasto $Q$ (l s <sup>-1</sup> )	12.0
Velocidad media $U$ (cm s <sup>-1</sup> )	15.0
Número de Reynolds $Re=Uh/\nu$	$1.2 \times 10^4$
$Re_* = U_* h / \nu$	760
Número de Froude $F=U/(gh)^{1/2}$	0.169
Temperatura del agua $T$ (°C)	25
Velocidad de Fricción $U_*$ (cm s <sup>-1</sup> )	0.95

Tabla 4.1. Parámetros hidráulicos para los experimentos típicos.

Las señales de los anemómetros se tomaron en series de muestras, en cada una de ellas se registraron 1024 datos por segundo. Antes de que se iniciaran las mediciones se calibraron los sensores

### **4.3 Resultados experimentales**

#### **4.3.1 Visualización de estructuras coherentes.**

De las imágenes capturadas en video se pueden apreciar ángulos de inclinación de las estructuras entre 15 y 30 grados medidos a partir del fondo del canal que coinciden con los reportados por otros autores, para  $\gamma^+ < 20$ . Por medio de la captura digital se obtuvo la imagen que se presenta a continuación.



Lámina 4.5 Visualización de flujo en la región de la pared para una capa límite sobre una placa plana.

Las imágenes de video digitalizadas generaron información acerca de la forma de las estructuras coherentes observadas, las cuales fueron similares a aquellas reportadas en estudios previos de visualización, por ejemplo, Kline *et al* (1967) y García *et al*, (1995).

En la secuencia de la lámina 4.6 se muestra la evolución de las estructuras vorticosas observadas cerca del fondo. La sección superior en cada una de las imágenes muestra una vista en planta y la sección inferior muestra una vista lateral o de perfil de las estructuras coherentes. El flujo se desplaza de derecha a izquierda y el intervalo de tiempo entre imágenes fue de 0.13s. El inyector de tinta, como se puede observar, se encuentra en el lado derecho de cada una de las imágenes.

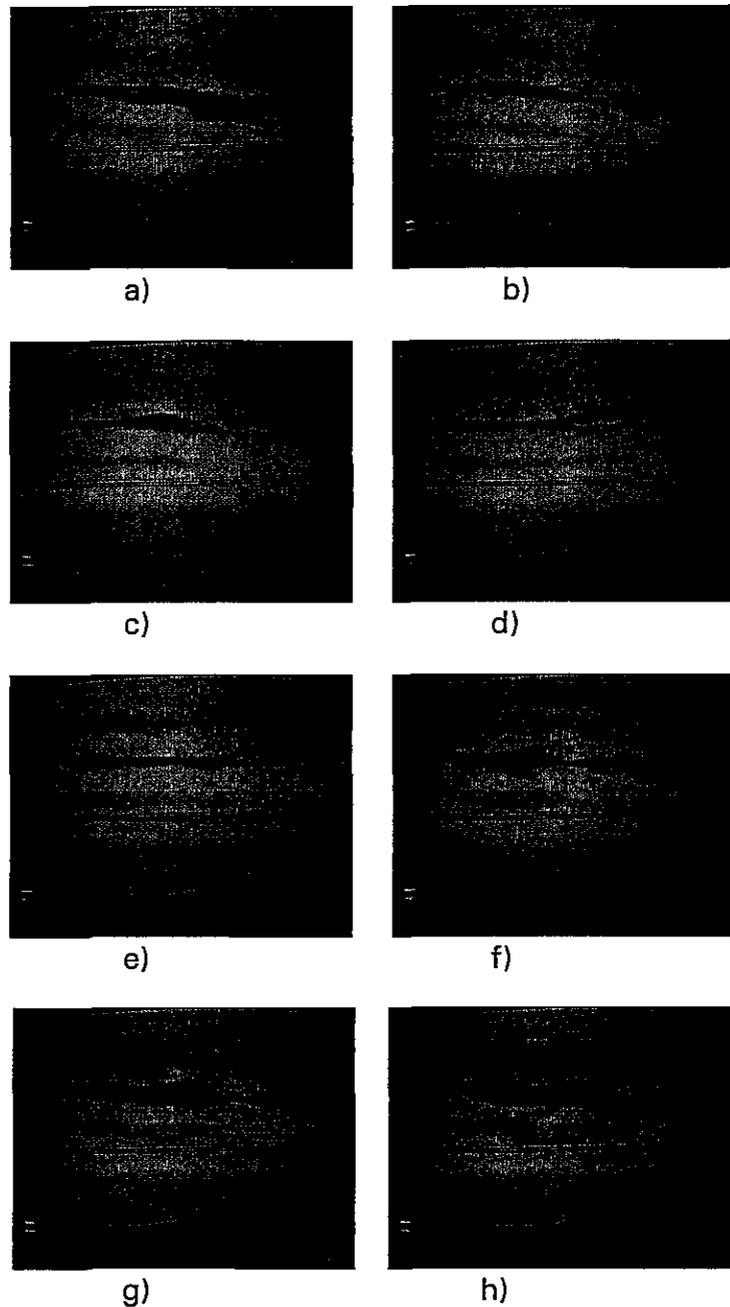


Lámina 4.6. Secuencia de imágenes, muestra la formación y rompimiento de estructuras vorticosas cerca de la pared para  $Re = 12,000$ . Intervalo entre fotografías de 0.16s.

La vista lateral de la lámina 4.6a, en la parte derecha cerca del inyector de tinta, muestra el inicio de una estructura vorticosa, mientras que en el lado izquierdo se observa el rompimiento de otra estructura a un ángulo de  $20^\circ$ , las flechas en la figura muestran la localización de estos dos fenómenos. En la vista en planta de la misma

imagen, se observa que los filamentos del trazador se mueven dando idea de trayectorias cónicas, que son típicas de las estrías que se originan en la capa límite.

Las vistas laterales de las láminas 4.6b,c,d,e y f muestran la evolución de la estructura que inició en la lámina 4.6a, conforme transcurre el tiempo la estructura se levanta del fondo, oscila y se rompe, mostrando ángulos de inclinación entre 12 y 30 grados, valores que concuerdan muy bien con los reportados por García *et al*, (1995) y López *et al*, (1996).

Por otro lado, en las secciones superiores de las figuras 4.6 d, e y f se puede observar claramente el movimiento de enrollamiento y estiramiento de las estructuras vorticosas en la dirección principal del flujo y su desplazamiento en el sentido transversal al flujo. A partir de esas imágenes se pudieron observar, como ya se mencionó anteriormente movimientos de las estructuras vorticosas en las tres direcciones principales (X,Y,Z), con lo que se puede inferir la tridimensionalidad de ese tipo de estructuras.

En la parte derecha de la 4.6f se observa el nacimiento de una estructura nueva y el rompimiento de la estructura que inició en la figura 4.6a, formando un ángulo de 15°. Parte de esta evolución de ésta, se observa en la lámina 4.6f como ya se mencionó anteriormente y en las láminas 4.6g y 4.6h.

A partir de estas imágenes se pudo determinar el ciclo de vida de las estructuras, el cual dura aproximadamente 0.8 segundos ( $t^+ = 57.7$ ), dato que concuerda muy bien con los reportados por García *et al*, (1995) ( $t^+ = 60$  y  $80$ ) quienes emplearon un número de Reynolds de 12,400 y las mediciones se realizaron en  $Y^+ = 52$ . Sin embargo el tiempo estimado de las estructuras vorticosas a partir de la serie de imágenes de la figura 4.6, no corresponde al tiempo total de vida de estas estructuras, puesto que estas persisten aún después del proceso de rompimiento. Con esto se puede inferir que el ciclo de vida de este tipo de estructuras es mayor a 0.8 segundos, lo que concuerda muy bien con los tiempos evaluados mediante autocorrelaciones a partir de los datos de velocidades instantáneas obtenidos con el

sensor de película caliente colocado a 4 mm ( $Y^+ = 38$ ) del fondo del canal, zona en la cual se manifiestan más fuertemente las estructuras vorticosas.

#### 4.3.1.1 Análisis de la visualización de estructuras coherentes con registros simultáneos de velocidad instantánea.

Con el fin de obtener información cualitativa acerca de las estructuras coherentes se sincronizaron las señales de velocidad instantánea obtenidas con el anemómetro de película caliente en  $Y^+ = 38$  y con las imágenes de video. Para obtener sincronía entre estas dos señales, se conectó un timbre eléctrico, el cual se accionaba manualmente en forma simultánea en el momento de iniciar la adquisición de datos de velocidades instantáneas, la señal de audio del timbre se grabó en el video de imágenes. En la lámina 4.7 se muestran cuatro vistas laterales de la estructura del flujo y la gráfica superpuesta de las fluctuaciones de velocidad en la dirección principal del flujo con respecto al tiempo. El sensor de película caliente con el cual se tomaron los datos de velocidad puede ser fácilmente observado casi en la parte central de cada una de las imágenes. Las imágenes fueron tomadas a diferentes tiempos para un mismo experimento. El análisis de las imágenes muestra que las fluctuaciones de velocidad se incrementan cuando pasa una estructura justo abajo del sensor de película caliente. En la lámina 4.7 a se observa un incremento en la gráfica de velocidad instantánea justo cuando pasa una estructura abajo del sensor y grandes oscilaciones cuando se observan otras estructuras. En la lámina 4.7b ocurre un fenómeno similar al anterior. Por otra parte en las imágenes c, d de la lámina 4.7 se observan dos picos en la señal de velocidades instantáneas y dos estructuras bien definidas justo debajo de éstos, lo que refuerza lo observado en las dos primeras imágenes y da la idea de que este tipo de estructuras son en gran parte responsables de incrementos en la velocidad en el punto donde se colocó el sensor. En las cuatro imágenes de la lámina 4.7 se indica con una flecha las estructuras presentes en el flujo.

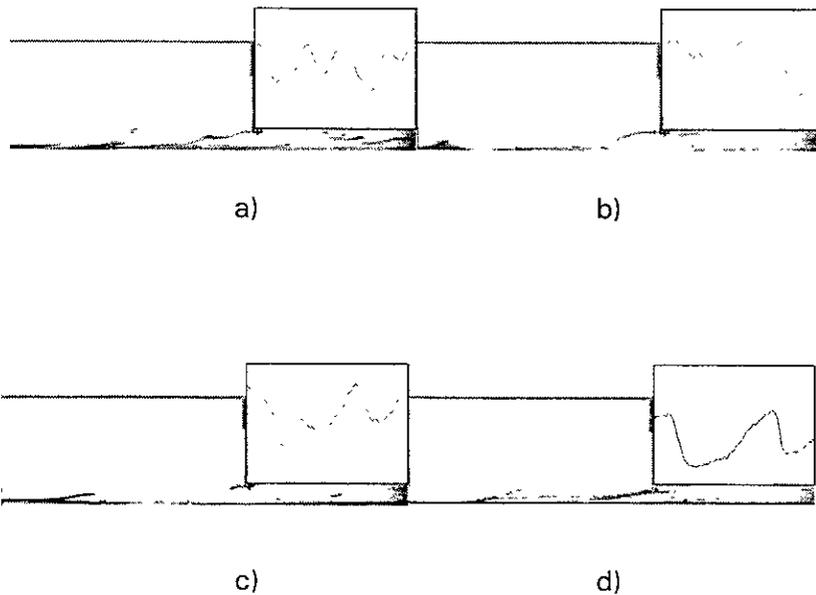


Lámina 4.7. Estructura del flujo y variación de la velocidad longitudinal  $u$  para diferentes tiempos

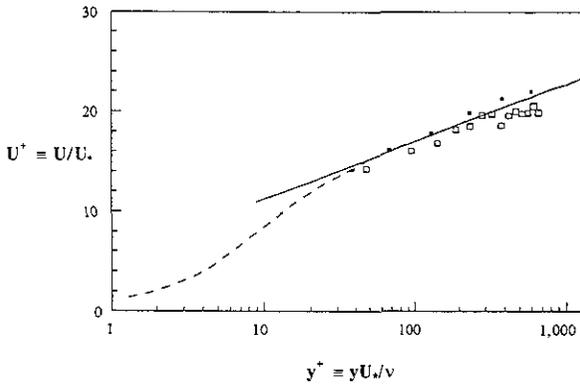
#### 4.3.2 Distribuciones de velocidad medias puntuales en la dirección X comparados con otros autores.

Con el fin de poder comparar los resultados obtenidos con resultados reportados por otros autores, los experimentos se llevaron a cabo bajo condiciones hidráulicas similares a las empleadas por Nakagawa y Nezu (1981), para el caso QV, el cual corresponde a un grupo de experimentos, en los cuales se obtuvieron datos de velocidades medias longitudinales y verticales en dos puntos diferentes en el centro del canal en el plano X-Y, para lo cual utilizaron dos tipos de sensores de película caliente: un sensor doble en "X" (DISA 55R64) y un sensor en "V" (DISA 55A89). El sensor en "X" se colocó aguas arriba y el sensor en "V" se colocó aguas abajo, el primero se utilizó como sensor móvil y el segundo se mantuvo fijo a 4.0 mm ( $Y^+ = 38$ ) del fondo del canal, mientras que el sensor móvil se colocó en seis diferentes profundidades iniciando a 0.4 cm; es decir, a la misma distancia que el sensor fijo y posteriormente a 0.7, 1.3, 2.4, 4.0 y 6.0 cm para obtener perfiles de velocidades medias. Los experimentos los realizaron en el Laboratorio de Hidráulica de Ingeniería –

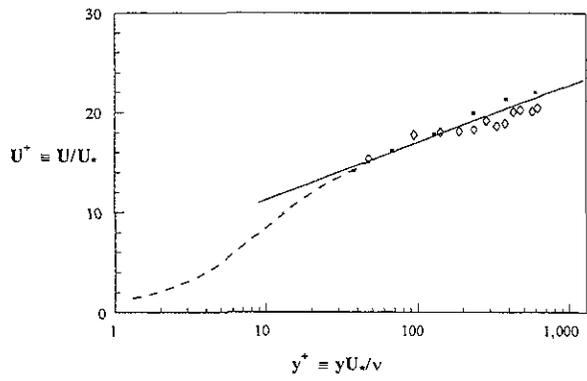
Civil de la Universidad de Kyoto, Japón, en un canal de pendiente variable de 15 m de longitud, 50 cm de ancho y 30 cm de profundidad. Las condiciones hidráulicas se presentan en la tabla 4.1.

Por otro lado, en este trabajo se realizó una serie de experimentos en los que se obtuvieron perfiles de velocidades medias puntuales en la vertical, bajo condiciones hidráulicas similares en diferentes días. Los datos se tomaron en la línea central del canal ( $Z=0$ ) a 10 m de la entrada con un sensor de un solo hilo (TSI 210-20W), el cual se colocó a quince diferentes profundidades: 0.4, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0 y 7.5 cm. Los datos obtenidos también se compararon con la ley logarítmica.

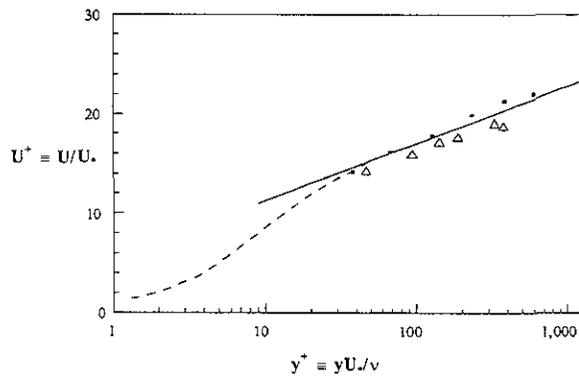
Los experimentos de este trabajo se denominaron, Perfil 1, Perfil 2, y Perfil 3. Las gráficas de la lámina 4.8 se muestran, de manera adimensional, las tres distribuciones de velocidad media  $U^+ = U/U_*$ , medidas. Los tres perfiles de velocidades medias puntuales concuerdan muy bien con los perfiles que normalmente se reportan en la literatura para canales a superficie libre. La velocidad cortante pudo estimarse con el mejor ajuste de los perfiles a la ley logarítmica dada por la ecuación . En ésta lámina la línea sólida se conoce como distribución o ley logarítmica de velocidades, donde la constante de von Kármán es  $k=0.4$  y la constante de integración es  $A=5.5$ .



• Caso QV □ Perfil 1 - - van Driest's - -  $U^+ = 5.75 \log y^+ + 5.5$



• Caso QV ◇ Perfil 2 - - van Driest's - -  $U^+ = 5.75 \log y^+ + 5.5$



• Caso QV △ Perfil 3 - - van Driest's - -  $U^+ = 5.75 \log y^+ + 5.5$

Lámina 4.8 Distribución de velocidades,  $U^+ = U/U_*$  vs  $y^+$

En esta lámina se muestran los datos obtenidos por Nakagawa y Nezu (1981) para el caso QV, los cuales se obtuvieron en condiciones hidráulicas similares a las empleadas en este trabajo. Las gráficas, como puede observarse en la citada lámina, muestran buena concordancia entre los valores experimentales de este trabajo en la región ( $38 \leq Y^+ \leq 400$ ), tanto con el perfil logarítmico de la ecuación como con los datos experimentales reportados por Nakagawa y Nezu (1981), con un poco de dispersión en la región externa ( $Y^+ > 400$ )

#### 4.3.3 Correlaciones y escalas espacio-temporales de los burst, comparación con otros autores.

La teoría estadística considera como característica fundamental de la turbulencia la noción de que las variables que definen al flujo como son la velocidad y presión varían aleatoriamente con respecto al espacio y al tiempo.

El concepto de aleatoriedad se puede entender de la siguiente manera: si se tienen los registros de las velocidades instantáneas en un punto dado para una serie de experimentos realizados en condiciones idénticas, los detalles de estas corridas serán

$$f(u') = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left[-(u-\bar{u})^2/2\sigma^2\right]} \quad (4.1)$$

muy diferentes. Pero las propiedades de probabilidad serán las mismas de un registro a otro. El comportamiento de una variable aleatoria  $u'$  puede describirse mediante una función de densidad de probabilidades  $f(u')$ . La función de probabilidad normal o gaussiana es la que se asocia a la turbulencia, ya que el teorema del límite central establece que la suma de un gran número de procesos independientes es gaussiana; esto es:

donde la media es

$$\mu = \bar{u}' \quad (4.2)$$

y la variancia

$$\sigma^2 \approx \overline{u'^2} \quad (4.3)$$

Si se considera la fluctuación de velocidad en dos puntos separados por una distancia  $r$ , podría existir una correlación entre las velocidades definida como:

$$R_{ij}(r) = \frac{\overline{u_i(t)u_j(x+r)}}{\sqrt{\overline{u_i^2(x)} \cdot \overline{u_j^2(x+r)}}} \quad (4.4)$$

Donde:  $i=1,2,3$  ;  $j=1,2,3$  y  $u_1=u$ ,  $u_2=v$ ,  $u_3=w$

La barra denota el promedio de varias mediciones tomadas en dos puntos en un mismo tiempo dado.

El modelo conceptual de la turbulencia como compuesta por muchos remolinos superpuestos al flujo medio sugiere que las componentes de velocidad medidas en dos puntos al mismo tiempo deberán estar relacionadas entre sí cuando pertenecen al mismo remolino o estructura. Teniendo esto en cuenta, el tamaño de los remolinos se podrá determinar midiendo por ejemplo la componente  $u$  de la velocidad en dos puntos (A y B). Si los remolinos son grandes la correlación  $R_{AB}$  alcanzará el valor "cero" para distancias grandes entre A y B. Por el contrario se hará rápidamente "cero" cuando los remolinos sean pequeños. Esto es, la correlación espacial de dos variables con separación  $r$  es una medida del tamaño de las estructuras en la dirección a que se refiera.

Por otra parte se puede emplear el análisis de la autocorrelación, que es la correlación de la misma variable en dos tiempos diferentes pero en el mismo punto. Las correlaciones espaciales de las componentes de la velocidad obtenidas con anemometría de hilo caliente son difíciles de realizar debido a que es necesario colocar varios sensores a lo largo, por ejemplo, de la dirección del flujo, provocando perturbaciones en el mismo flujo que afectan las mediciones aguas abajo. Por ello en general se recomienda obtener autocorrelaciones que dan resultados, aunque limitados, más realistas.

Con la autocorrelación en el tiempo lo que se obtiene es la duración de la estructura. Con ese valor se puede inferir el tamaño de las estructuras, conociendo la velocidad del flujo. Si se usan los símbolos  $R_{11}$ ,  $R_{22}$  y  $R_{33}$  para las correlaciones de  $u$ ,  $v$  y  $w$  respectivamente. La autocorrelación en el tiempo se puede escribir como:

$$R_{uu}(\tau) = \frac{\overline{u(t)u(t+\tau)}}{\overline{u^2(t)}} \quad (4.5)$$

Para obtener información cuantitativa de las escalas espaciales y temporales de los bursting, fue necesario analizar las correlaciones espacio-tiempo de variables como la velocidad del flujo, que se obtuvieron usando la técnica de anemometría de película caliente.

En este trabajo se hicieron mediciones de la componente de la velocidad  $u$  en un punto a 5mm del fondo del canal, lo que correspondió a 47.5 unidades de pared, ( $y^+ = 47.5$ ). Las gráficas de autocorrelación  $R_{uu}$  se presentan en la lámina 4.9, de ellas se puede deducir que el tiempo de duración de las estructuras fue de 1.7s y su tamaño fue de  $\lambda = U \cdot t = 1.7 \text{ s} \cdot 15\text{cm/s} = 25.5 \text{ cm}$ , lo que corresponde a lo reportado para condiciones similares por Nezu (1981).

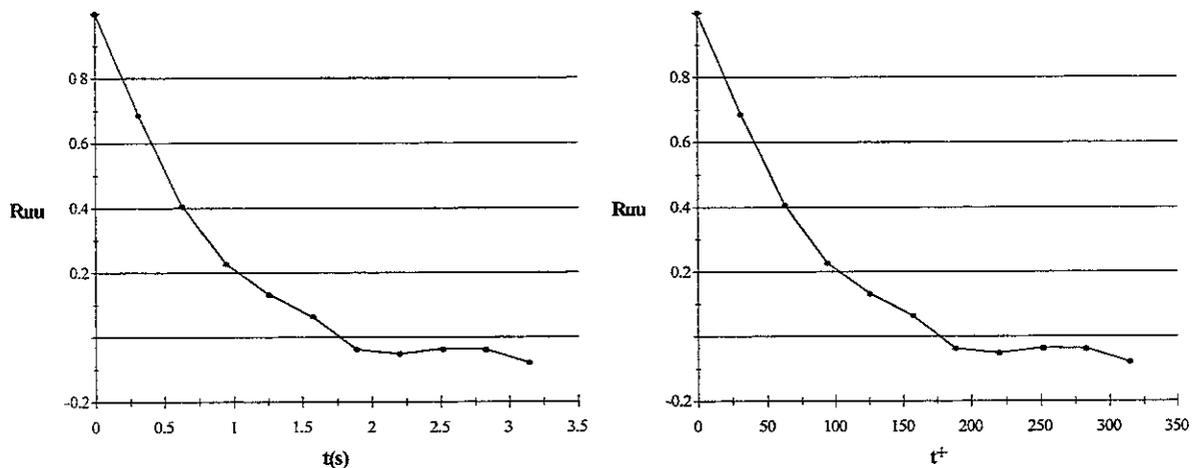


Lámina 4.9 Correlaciones temporales  $R_{uu}(\tau)$  para  $y^+=47.5$ .

Bogard *et. al.*, (1986) reportó periodos medios de duración de las estructuras  $T=1.3$  a  $3.10 \text{ s}$ .

#### 4.4 Análisis de resultados

Se investigaron las características de las estructuras coherentes comúnmente llamadas bursting. Por medio de visualización del flujo simultáneamente en dos planos, uno en planta y otro en perfil. Además se efectuó un análisis de correlaciones temporales por medio de un muestreo de velocidades instantáneas medidas con un anemómetro de

película caliente. El sensor se fijó a una distancia cercana a la pared para detectar los movimientos de los bursting. Los resultados más importantes son los siguientes:

- Con base en observaciones visuales se detectó que los bursting son estructuras coherentes inclinadas aguas abajo con un ángulo entre 15 y 30 grados. Esto estuvo de acuerdo resultados reportados por Blackwelder y Kovaznay (1972).
- Se logró un arreglo experimental con un sistema de visualización con la capacidad de obtener simultáneamente imágenes laterales y en planta de las estructuras, pudiendo observar con mayor claridad el desarrollo de éstas y deducir su tridimensionalidad.
- Se determinó la estructura temporal de los bursting mediante correlaciones temporales y esta correspondió con la reportada por Bogard (1986)
- A partir de la duración de los eventos se dedujo el espaciamiento longitudinal de las estrias  $\lambda_x = 25$  cm, lo cual se encuentra en el rango del espaciamiento,  $\lambda_x = (2-3)h$  ( $h$  es el tirante) propuesto por Nezu (1981) para flujo de agua en canales.

En este estudio se obtuvieron resultados satisfactorios con respecto a la identificación de las características más esenciales de los bursting para el caso del flujo de agua sobre una placa plana, "caso canónico", el cual es el más conocido y reportado en la literatura. Sin embargo, es necesario realizar investigación experimental más detallada del fenómeno de los bursting para diferentes condiciones hidráulicas y de flujos con partículas con el fin de entender el origen de la erosión, sedimentación y resuspensión de partículas en diversos procesos naturales.

Se logró sincronizar la visualización con la medición, la validación de la instalación experimental y la validación de las técnicas experimentales.

## 5. ESTUDIO DE LA ESTRUCTURA DEL FLUJO SOBRE FORMAS DE FONDO FIJAS.

### 5.1 Antecedentes.

El flujo sobre las formas de fondo se puede clasificar de acuerdo con su comportamiento de siguiente manera (ver lámina 5.1): 1) Flujo convergente acelerado en la región de pendiente ascendente sobre la cresta de la duna. 2) zona de separación y recirculación de flujo aguas abajo de la cresta 3) flujo desacelerado o de la estela superpuesto a la zona de separación aguas abajo de la cresta, 4) una región de flujo denominada externa, sobre la estela y cerca de la superficie libre, 5) generación y crecimiento de una nueva capa límite que se origina a partir del punto donde termina la zona de recirculación, ver Raudkivi, 1966, Engelund y Fredsoe, 1982; Müller y Gyr, 1982, 1986.

La región de la estela se difunde vertical y horizontalmente desde la separación del flujo creciendo en tamaño pero decreciendo en energía turbulenta. La nueva capa límite interactúa con la estela y las dos emergen en la cresta de la siguiente duna conformando una capa límite aproximadamente uniforme (McLean, 1994)

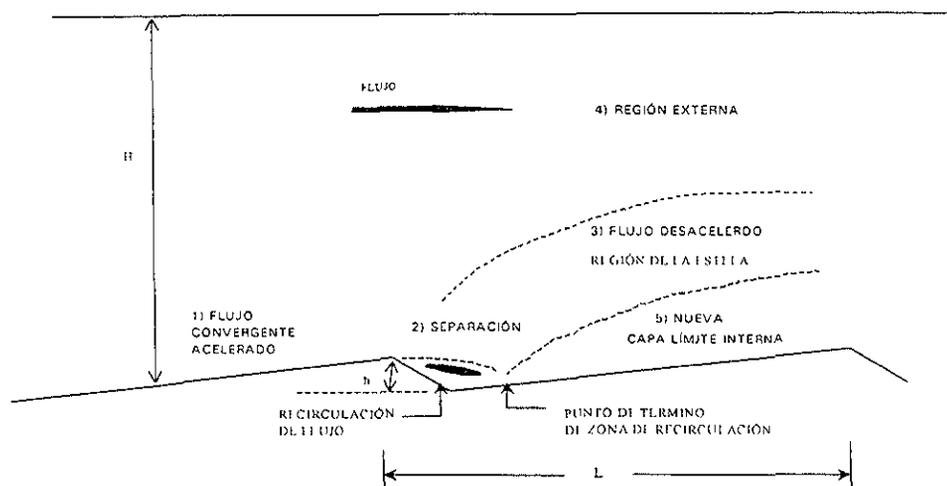


Lámina 5.1. Definición de las características del flujo en una forma de fondo, vista de perfil.

Algunos investigadores desarrollaron modelos numéricos del flujo sobre formas de fondo (McLean y Smith 1989; Mendoza y Shen 1990). En otros estudios se divide el esfuerzo cortante total en una componente de fricción y otra de arrastre de las formas

de fondo (Smith y McLean, 1977, Nelson y Smith,1989). Sin embargo en estos análisis clásicos no se consideran las interacciones entre el transporte de sedimento, la topografía y el campo de flujo turbulento, especialmente la zona de separación de flujo, el desarrollo de una capa cortante y las estructuras turbulentas que dependen de la morfología de la forma y de la posición.

Con base en diversos estudios se sugiere que la macro-turbulencia generada por las formas de fondo es importante para comprender los diversos mecanismos de transporte de sedimento y controlar la formación y estabilidad de las dunas.

Las estructuras macro turbulentas que mejor se conocen en el caso de formas de fondo son las denominados Kolks o boils (Coleman, 1969, Jackson, 1976, Itakura y Kishi, 1980; Nezu *et al*,1980). Jackson, en 1976, obtuvo empíricamente la relación adimensional:

$$T_b U/h \sim 3 - 7$$

Donde  $T_b$  es el periodo medio del boil,  $U$  la velocidad media aguas abajo y  $h$  el tirante. Este periodo es idéntico a la periodicidad de los burst en la capa límite turbulenta. Por ello Rao 1971, Jackson,1976 y Yalin,1977 relacionaron el origen de estos boils, con los eventos de la capa límite y a su vez con el origen de las formas de fondo.

Levi (1983,1991) propuso que la macroturbulencia se debe al desprendimiento de vórtices detrás de la cresta con una frecuencia  $f$  la cual puede determinarse con la relación de Strouhal  $St = f H/U \sim 0.16$  , detrás de formas de fondo. donde  $St$  es el número de Strouhal,  $H$  es el tirante antes de la separación y  $U$  es la velocidad de aproximación, sin embargo, no se ha conseguido información detallada para cuantificar el desprendimiento de vórtices detrás de formas de fondo. Aunque existen muchos estudios del flujo sobre formas de fondo ver Tabla 5.1. No se ha logrado integrar la información en teorías de estabilidad de formas de fondo y de transporte de sedimentos que tomen en cuenta todos los factores que están involucrados en ella.

Tabla 1. Resumen de las investigaciones del flujo sobre formas de fondo fijas en canales

Referencia	Morfología de las formas de fondo					Condiciones del flujo					Mediciones			Notas		
	Material	L (m)	Altura h (m)	Ángulo	L/H	H/h	Ancho B (m)	Tirante H (m)	Veloc. med U (m/s)	u'	v'	Técnica	Número de perfiles		No. de puntos por perfil	Datos (hz)
Vanoni & Nomicos (1960)	arena pegada de 0.091mm	0.11	0.022	na	1.26	3.95	0.267	0.087	0.375	no	no	tubo pitot	1	8	-	(1)
Raudkivi (1960)	lámina lisa de metal	0.386	0.025 0.022	29	3.06	3.04 3.45	0.076	0.126	0.299	no	no	tubo pitot tomas de presión	2	19-20	-	(1),(2)
Raudkivi (1966)	lámina lisa de metal	0.386	0.025	29	3.06	3.04	0.076	0.126	0.299	si	si	tubo pitot anemómetro de témp. const.	4	7-10	na	(3)
Vanoni & Hwang (1967)	arena pegada de 0.23mm	0.162	0.016 0.015	26 26	2.31 2.3	3.38 4.87	0.267 0.267	0.07 0.073	0.228 0.381	no	no	tubo pitot tomas de presión	14-18	6-13	-	(1),(2)
Rifai & Smith (1971)	láminas de bronce	0.5	0.051	30	1.67 1.83	5.98 5.45	0.381	0.305 0.278	0.576	si	no	anemómetro de temperatura. constante	4	6-19	625	(3), ver Rifai & Smith (1969)
McCorquodale & Giratalla (1973)	perspex con arena de 0.2 mm rizados con moldes de yeso	0.064	0.0048	90	0.5	26.68	0.127	0.127	0.229	si	si	anemómetro de temperatura constante	1	6	na	(3)
		0.089	0.0106	30	0.7	11.98	0.127	0.127	0.229	si	si		1	8	na	
Vittal, Ranga Raju & Garde (1977)	láminas de madera con arena de 0.6 mm	0.6 0.45 0.3 0.015	0.03 0.03 0.03 0.03	30 30 30 30	1 0.75 0.51 0.025	20 20 20	na	0.6	na	no	no	tubo pitot y tomas de presión	3	5-10	-	(2)
Itakura & Kishi (1980)	cemento con arena de 0.42 mm	0.3	0.015	30	4.7	4.3	0.1	0.064	0.32	no	si	anemómetro de temperatura. constante	5	4	100	(3)
Fehlman (1985)	plástico liso con arena de 1.75 mm	0.915	0.137	30	4.14 2.83 4.14 2.83	1.61 2.36 1.61 2.36	0.61	0.221 0.323 0.221 0.323	0.147 0.653 0.147 0.534	no	no	artefacto para medir la fuerza total tubo pitot	----			(2) ver Mendoza y Shen (1990)



Tabla 1. Resumen de las investigaciones del flujo sobre formas de fondo fijas en canales (continuación)

Referencia	Morfología de las formas de fondo				Condiciones del flujo					Mediciones			Notas			
	Material	L (m)	Altura h (m)	Ángulo	L/H	H/h	Ancho B (m)	Tirante H (m)	Veloc. med U (m/s)	u'	v'	Técnica		Número de perfiles	No. de puntos por perfil	Datos (hz)
Van Mierlo & de Ruiter (1988)	concreto	1.6	0.08	28	6.35	3.15	1.5	0.252	0.394	si	si	LDA;	10	12-22	na	(2),(3)
	rugoso con arena fina	1.6	0.08	28	4.79	4.18	1.5	0.334	0.513			transductores de presión				
Nelson & Smith (1989a)	concreto rugoso con arena fina	0.8	0.04	30	4	5	0.7	0.2	0.5	si	no	LDA	16	30-54	>256**	(3)
Wiberg & Nelson (1992)	concreto	0.16	0.02	30	0.73	11	0.7	0.22	0.38	si	si	LDA	6	21-35	500-	(3)
	rugoso	0.16	0.02	30	1.33	6	0.7	0.12	0.43					2000**		
	con arena de 0.25 mm				0.73	11		0.22	0.4							
Lyn (1993)	madera	0.15	0.012	45	2.46	5.08	0.267	0.061	0.269	si	si	LDA	4	11-35	15->60	(3)
	con arena de 0.25 mm	0.15	0.012	45	2.46	5.08	0.267	0.061	0.551							
Nelson McLean & Wolfe (1994)	concreto	0.16	0.02	30	0.82	9.75	0.7	0.195	0.32	si	si	LDA	6	20-50	>256**	(3)
	con arena	0.8	0.04	30	-0.73	11		0.22	0.51							
	finas				6.66	3	0.7	0.12	0.4							
					3.64	5.5		0.22	0.43							
McLean, Nelson & Wolfe (1994)	concreto	0.8	0.04	30	3.81	5.25	0.9	0.21	0.482	si	si	LDA;perfilador acústico	15	30	0.4-4	(3)
	con arena	0.8	0.04	30	5.06	3.95	0.9	0.158	0.377							
	finas	0.8	0.04	30	1.47	13.65	0.9	0.546	0.284							
Bennett & Best (1995)	concreto con esferas de vidrio de 0.22mm	0.63	0.04	30	6.3	2.5	0.3	0.10*	0.57*	si	si	LDA	76	20-30	20-100	(3)
Estudio presente	lámina de acrílico lisa	0.15	0.012	45	1.875	6.666	1	0.08	0.18	si	si	anemómetro de temperatura constante	8	30		(1),(3)
							1	0.08	0.23							
		0.2	0.012	45	1.875	6.666	1	0.08	0.23	no	no	PIV	120x6	12	(1)	

\*sobre la cresta de la forma de fondo; \*\* número de partículas medidas

(1)perfiles verticales de velocidad;(2) cortante de fondo y presión ; (3) velocidad vertical y perfiles de turbulencia

Conforme a lo anterior, en esta sección de la investigación se propuso como objetivo realizar un estudio que ayude a comprender las interacciones de la estructura del flujo medio y de las estructuras turbulentas del flujo sobre formas de fondo fijas en un canal de laboratorio. La razón de realizar este análisis en un flujo con formas de fondo fijas, se debe a la dificultad de efectuar mediciones en flujos con material en suspensión, en donde las formas de fondo, y con ellas las posiciones de las crestas, se están moviendo con una celeridad  $c$  en la dirección del flujo.

Específicamente se propuso:

1. Analizar los resultados de mediciones típicas del flujo medio y características turbulentas sobre formas de fondo presentadas por diversos investigadores y las propias.
2. Realizar visualización de flujo por medio de diferentes técnicas incluyendo inyección de colorantes y la generación de burbujas de hidrógeno, con estas técnicas marcar las estructuras del flujo para, poder seguir su dinámica y evaluar algunos parámetros que sirvan para su identificación.
3. Discutir con base en los resultados de las mediciones con anemometría, y los datos obtenidos de la visualización de flujo así como de los perfiles de velocidad instantáneos obtenidos con el seguimiento de las burbujas de hidrógeno los aspectos claves en la interacción estructura del flujo, formas de fondo y sus implicaciones en el transporte de sedimentos.

## ***5.2. Instalación experimental y procedimiento.***

Las formas de fondo consistieron de una serie de elementos triangulares. Para lograr la semejanza con las dunas reales se consultaron los estudios de Vanoni y Hwang (1967) quienes establecieron que en dunas la relación amplitud y longitud de onda es

del orden de  $h/L = 0.1$ , Fredsoe(1982) basándose en predicciones teóricas estableció un valor máximo de  $h/L = 0.06$  en acuerdo con evidencia experimental de Yalin (1972). En la presente investigación se propuso  $h/L = 0.08$ , relación usada también por Lyn. Las formas de fondo se construyeron en acrílico y se fijaron al fondo del canal en una extensión de 10 m (68 formas en total) estas se colocaron en la parte central del canal, cubriendo todo el ancho, como se muestra en la lámina 5.2

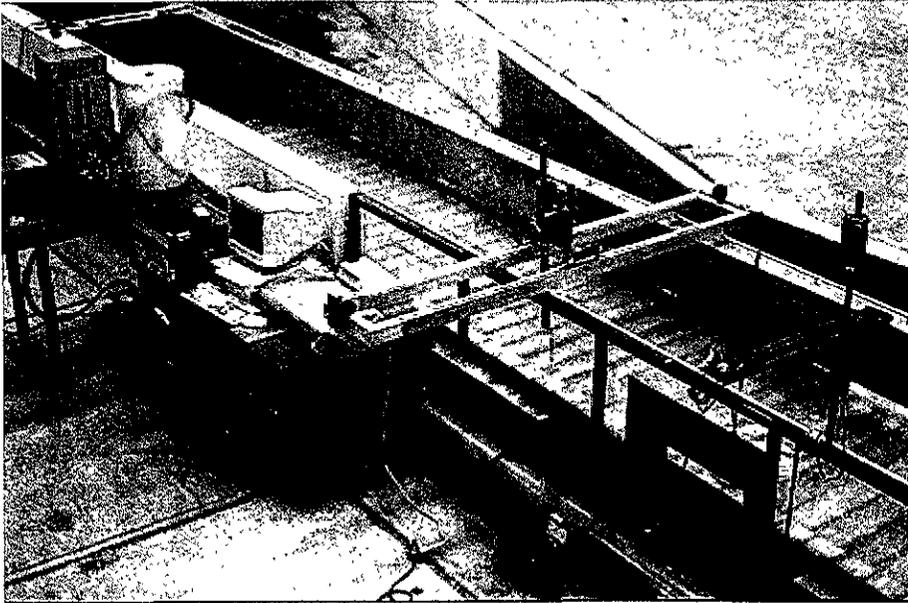


Lámina 5.2. Formas de fondo en el canal de pruebas.

Las mediciones se hicieron a lo largo de una de las formas colocada a 15 m de la entrada. Las secciones de medición fueron 8 como se indica en la lámina 5.3, cuatro secciones aguas abajo de la cresta espaciadas cada 4 mm;  $x/h=0, x/h=0.333, x/h=0.666, x/h=1.0$  y cuatro en la pendiente aguas arriba de la cresta espaciadas cada 30 mm;  $x/h=2.5, x/h=5.0, x/h=7.5, x/h=10.0$ . En la sección  $x/h=0$  se encuentra el punto más alto de la cresta y en la sección  $x/h=1$  se encuentra el punto más bajo. La velocidad del flujo medio se obtuvo con un molinete electrónico colocado a una profundidad media. La medición instantánea de velocidades se hizo con un anemómetro bidimensional de película caliente en "X" a  $90^\circ$  marca TSI 240-20W como el que se ilustra en la lámina 3.4b). En cada perfil se hicieron mediciones en 30 puntos en la vertical. El primer punto de medición se localizó a 3mm de la pared del

fondo. Debido a la importancia de obtener un gran número de mediciones en la región cercana a la pared se decidió tomar mediciones de velocidad a cada milímetro hasta el punto 22 y del punto 22 al 30 cada 5 mm con lo que se logró obtener información sobre una forma completa en una malla de 30 x 8 puntos en total 240 puntos. Las distancias verticales se midieron a partir del nivel medio de la forma. En estas coordenadas, el pico de la forma de fondo se localizó a  $y/H=0.15$ . Se realizaron seis experimentos en un rango de números de Reynolds entre  $12 \times 10^3$  y  $28 \times 10^3$ , todos en régimen subcrítico, con un tirante  $H$  de 8.0 cm. Las condiciones hidráulicas de los seis experimentos se muestran en la Tabla 5.2

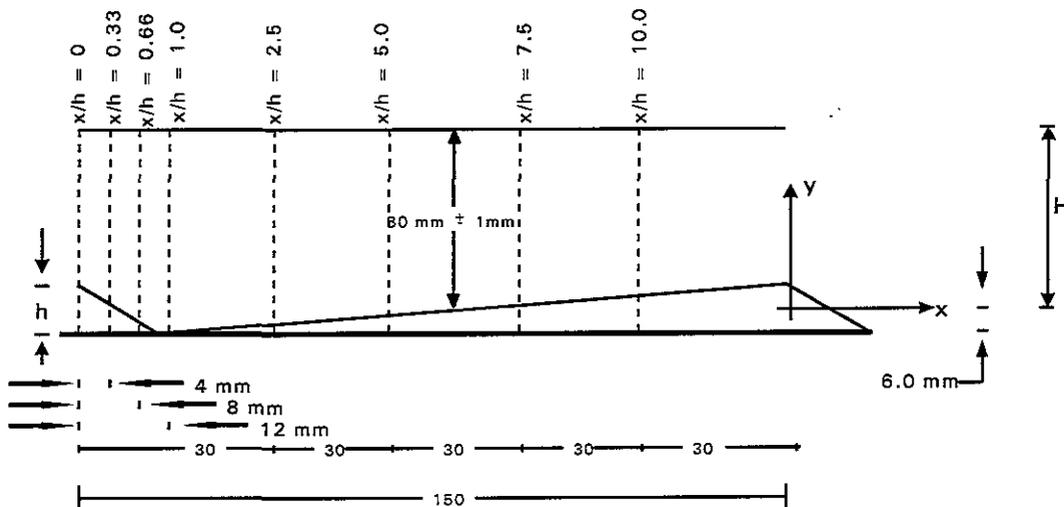


Lámina 5.3 Localización de las secciones de medición con anemometría de película caliente sobre una forma de fondo.

Tabla 5.2 Características de los experimentos para el caso no canónico.

Experimento	$Q$ ( $m^3/s$ )	$H$ ( $m \times 10^2$ )	$u$ ( $m/s \times 10^{-2}$ )	$Fr$	$Re$
1	0.012	8.0	15.0	0.169	12,000
2	0.0144	8.0	18.0	0.20318	14,400
3	0.0184	8.0	23.0	0.2596	18,400
4	0.02	8.0	25.0	0.2822	20,000
5	0.0216	8.0	27.0	0.3048	21,000
6	0.028	8.0	35.0	0.3951	28,400

En cada sección y para cada uno de los puntos se midieron las componentes longitudinal y vertical de la velocidad instantánea. A partir de estos valores se

calcularon las velocidades medias en dirección de la corriente U y en la dirección vertical V, utilizando la media aritmética.

$$U = 1/n \sum u_i$$

$$V = 1/n \sum v_i$$

Donde, n es el número total de mediciones,  $u_i$  y  $v_i$  son las velocidades instantáneas aguas abajo horizontales y verticales respectivamente. Las intensidades de turbulencia, raíz media cuadrada (rms) de la fluctuación alrededor de la media de cada componente ( $u'_{rms}$ ,  $v'_{rms}$ ) se calcularon con las fórmulas:

$$u'_{rms} = [1/n \sum (u_i - U)^2]^{1/2}$$

$$v'_{rms} = [1/n \sum (v_i - V)^2]^{1/2}$$

Los esfuerzos de Reynolds  $\tau_R$ , se determinaron usando:

$$u'v' = 1/n \sum (u_i - U) (v_i - V)$$

$$\tau_R = -\rho u'v'$$

Se realizaron seis experimentos para números de Reynolds entre 12,400 y 28,000, sin embargo solo se presenta el análisis de los resultados de visualización y anemometría de película caliente para el caso del experimento para  $Re = 18,400$  con un tirante de 0.08 m y una velocidad media de 0.23 m/s, por ser los más representativos y a su vez más compatibles con las condiciones hidráulicas de otros experimentos típicos reportados previamente por algunos investigadores.

### ***5.3 Análisis clásico de resultados y comparación con otros autores.***

#### **5.3.1 Velocidad media.**

Las velocidades medias para  $Re = 14,400$  y  $18,400$  se muestran en las láminas 5.4 y 5.5. En estas láminas se observa considerable dispersión en los perfiles de velocidad media medidos. Sin embargo, como se observa en ambas figuras, los perfiles (de los

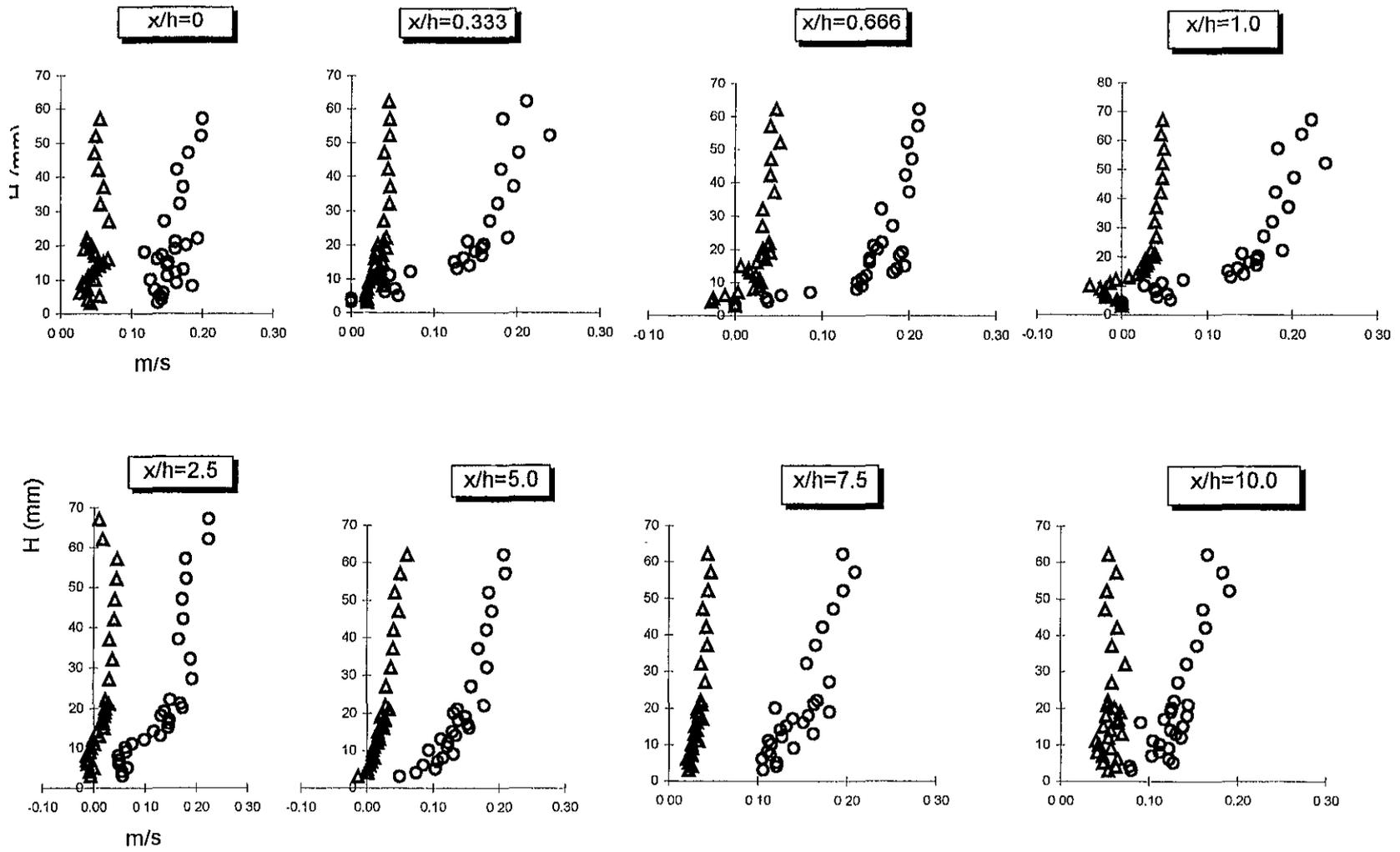


Lámina 5.4. Perfiles de velocidad media  $\bigcirc=U$  y  $\triangle=V$  para  $Re=14,400$

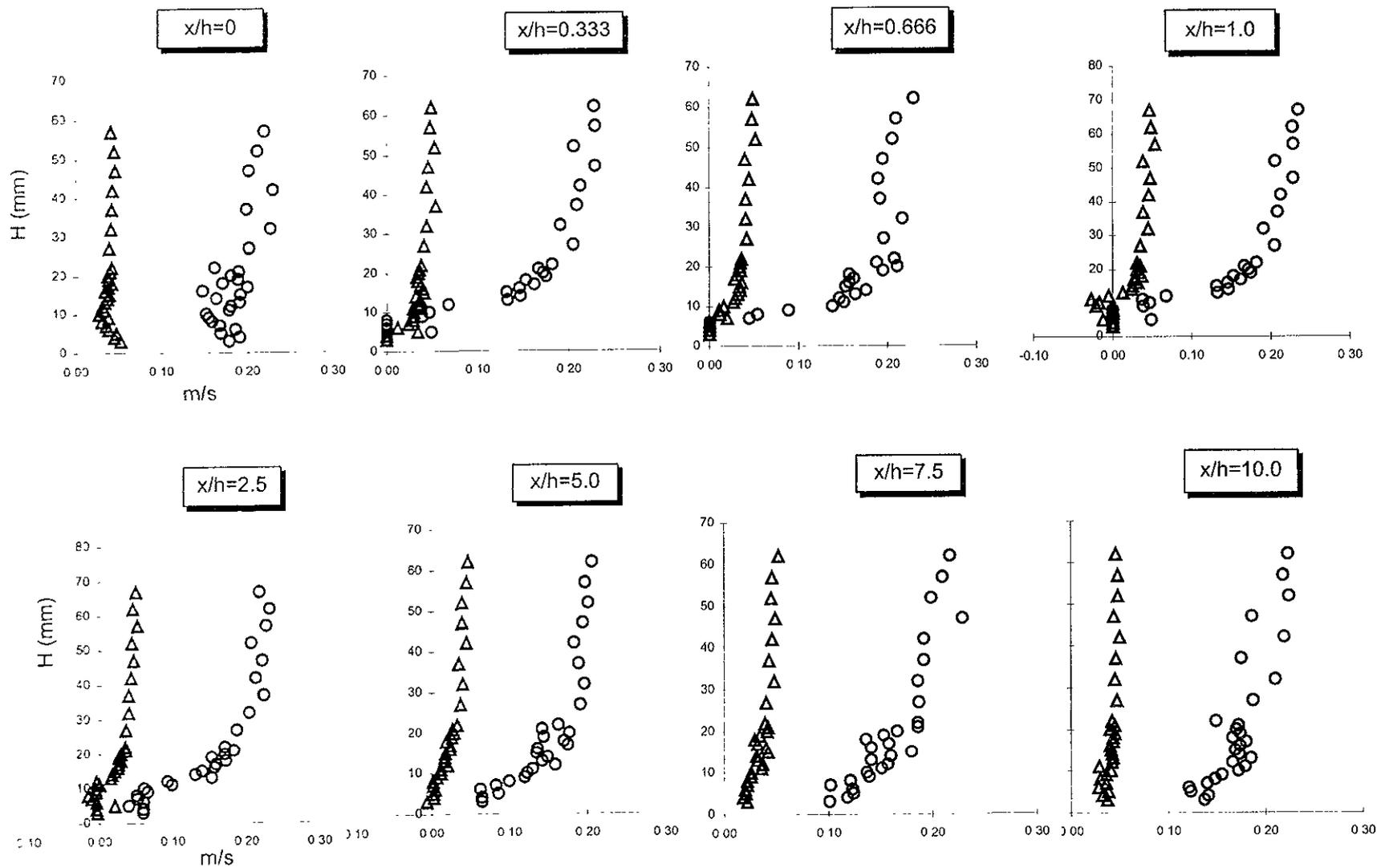


Lámina 5.5 Perfiles de velocidad media  $\circ = U$  y  $\Delta = V$  para  $Re = 18,400$

seis experimentos) presentaron una estructura general cualitativamente similar, lo cual indicó la poca influencia en la dinámica del flujo para variaciones relativamente pequeñas del número de Reynolds. Los perfiles medidos originalmente mostraron considerable dispersión lo cual nos da una idea de la complejidad del flujo especialmente en la zona cercana al fondo. Con el fin de obtener información más clara acerca de las características del flujo en forma global, se adimensionalizaron y suavizaron, como es procedimiento común, los datos medidos. La adimensionalización de las velocidades tanto en la dirección principal del flujo como en la vertical se obtuvo con la velocidad media del flujo,  $U/U_m$ ,  $V/U_m$ , a diferencia del caso canónico donde se adimensionalizó con las variables internas o de la pared ( $U./\nu$ ). Los perfiles se suavizaron usando una rutina de promedio de 5 puntos (cada punto fue reemplazado por el promedio de sí mismo y dos valores adelante y dos valores atrás de este, como en el trabajo de Nelson *et al* (1993); los perfiles de velocidad suavizados se muestran en las láminas 5.6 y 5.7, para  $Re = 14,400$  y  $18400$  respectivamente.

En la sección  $x/h=0$  las velocidades  $U/U_m$ , se encuentran en el rango de 0.7 a 1.0. No obstante la pequeña variación de la velocidad en la región comprendida entre  $0.1 \leq y/H \leq 0.2$  el perfil representa un flujo casi uniforme. A partir de la sección  $x/h=0.33$  se observaron valores de cero para  $U/U_o$  y  $V/U_o$  cerca del fondo, lo que indicó la presencia de una zona de separación de flujo. En las secciones  $x/h=1$  y  $x/h=2.5$  los perfiles de velocidad  $V/U_o$  presentaron valores negativos en la región  $-0.1 \leq y/H \leq 0.1$ . En la sección  $x/h=5$  el perfil de  $U/U_o$  comenzó a tener valores un poco mayores a cero en la región cercana a la pared y el perfil de  $V/U_o$  presentó pocos valores negativos y ellos fueron cercanos a cero. A partir de la sección  $x/h=7.5$  y hasta  $x/h=10$  los perfiles  $U/U_o$  se hicieron más uniformes y los perfiles de  $V/U_o$  ya no presentaron valores negativos.

El espaciamiento entre las mediciones en la dirección principal del flujo no fue lo suficientemente fino como para determinar con precisión el punto de cierre de la zona de recirculación, sin embargo se pudo observar a partir de la forma de los perfiles tanto de la velocidad longitudinal como en la vertical que dicha zona se extendió más

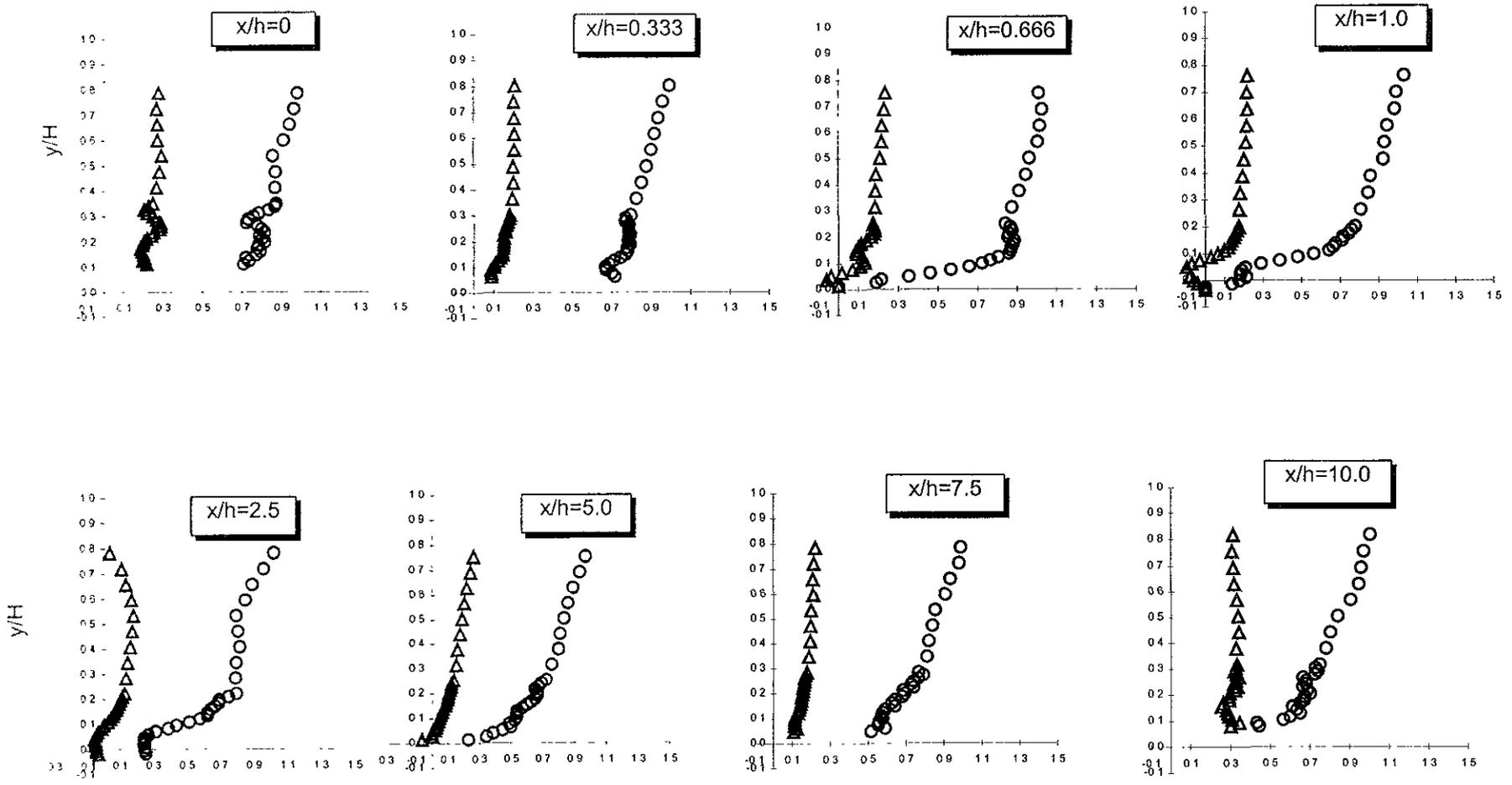


Lámina 5.6 Perfiles de velocidad media adimensionales suavizados  $\circ = U/U_o$  y  $\triangle = V/U_o$  vs  $Y/H$  para  $Re=14,400$

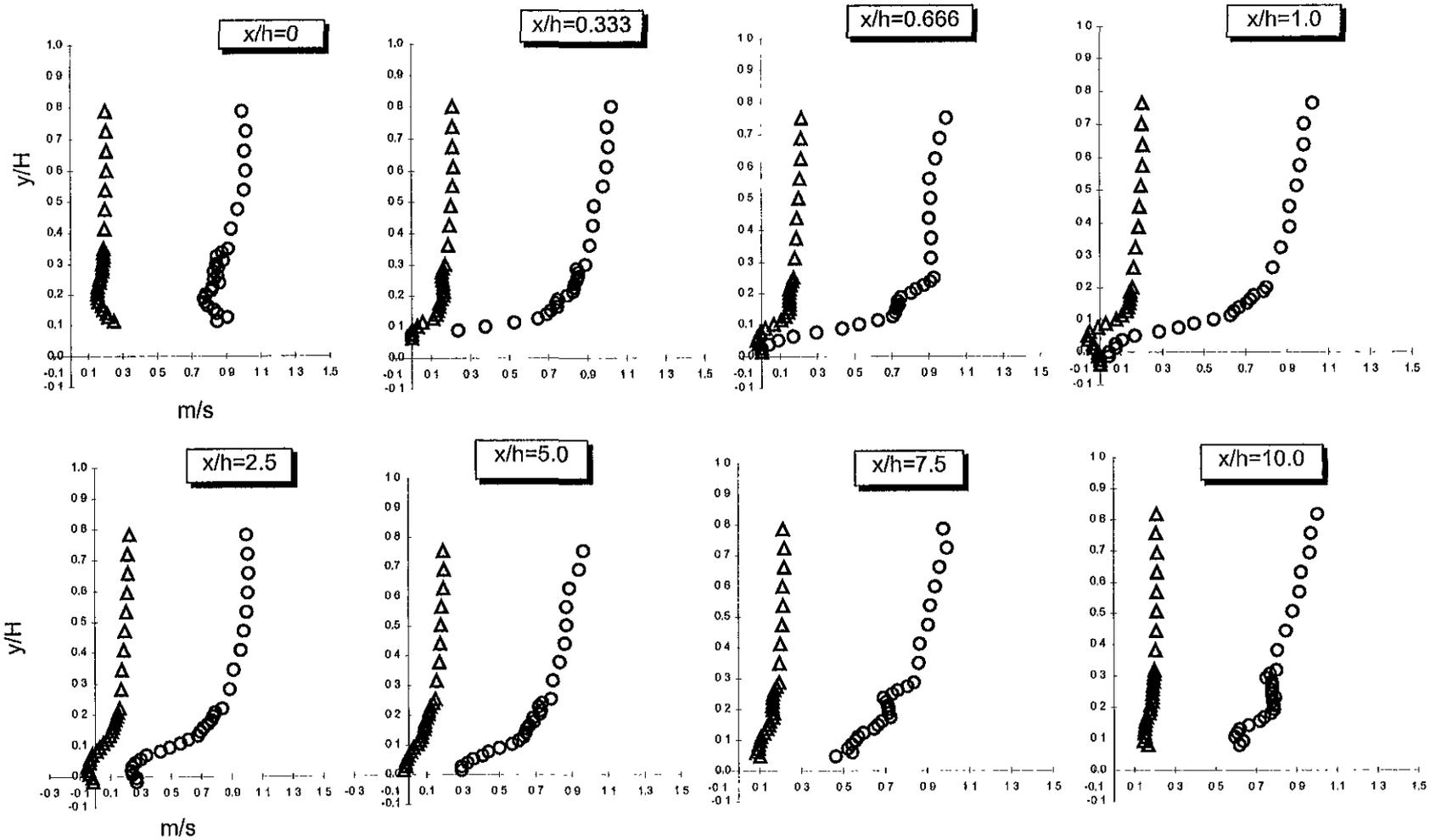


Lámina 5.7. Perfiles de velocidad media adimensionales suavizados  $\circ = U/U_o$  y  $\wedge = V/U_o$  vs  $Y/H$  para  $Re=18,400$

allá de la sección  $x/h = 5.0$ , en la cual todavía se observaron valores cercanos a cero y en algunos casos valores negativos de la velocidad en la dirección vertical al flujo  $V/U_0$  y valores muy pequeños de la velocidad en la zona cercana al fondo en la dirección principal al flujo  $U/U_0$ , tal característica no se observó en los perfiles de las secciones  $x/h = 7.5$  y  $x/h = 10$ , lo cual sugiere que el valor de la longitud de la zona de recirculación  $L_r$  oscila entre  $x/h = 5$  y  $x/h = 7.5$ ; rango que se ajusta muy bien a los resultados reportados por otros autores,  $L_r \approx 6H$  (Lyn, 1993),  $L_r \approx 5.2 H$  (de Ruiter, 1985).

De acuerdo con la visualización del flujo, las fluctuaciones del punto de cierre de la zona de separación se pueden relacionar con el paso de estructuras grandes. Conforme crecen estas estructuras en la capa cortante, el punto de cierre viaja aguas abajo a una velocidad aproximadamente constante, más tarde colapsa la estructura y causa que el punto de cierre se regrese aguas arriba. Conforme crece otra estructura, el punto de cierre se mueve otra vez aguas abajo.

Con el fin de comparar los resultados de este trabajo se analizaron y compararon datos obtenidos en investigaciones previas realizadas por otros autores sobre formas de fondo fijas. En los perfiles de velocidad  $u$  medidos (incluyendo algunos presentados por McCorquodale y Giratalla (1973) y por Müller (1985) Nelson,(1993) y Bennett y Best (1995). En los perfiles de velocidad de la presente investigación se observaron dos puntos de inflexión muy marcados especialmente en la región cercana a la pared  $y/d \approx 0.25$  y otro en la región cercana a la superficie libre del agua en  $y/d \approx 0.69$ , este tipo de inflexiones se muestra también claramente en los perfiles medidos por McCorquodale y Giratalla, ver lámina 5.8. En particular estos puntos de inflexión se pueden relacionar con la inestabilidad del flujo producida en la parte inferior por la pared en contacto con el agua y en la parte superior debido a la interacción del aire con la superficie libre del agua por efecto de discontinuidad de flujo en las fronteras inferior y superior, es importante mencionar que los efectos de la interfase agua aire generalmente se desprecian en las investigaciones de flujo a superficie libre. Las

inflexiones en perfiles de velocidad instantáneos, Grass(1971) los relacionó con el paso de estructuras burst que arrastran fluido hacia fuera de la pared.

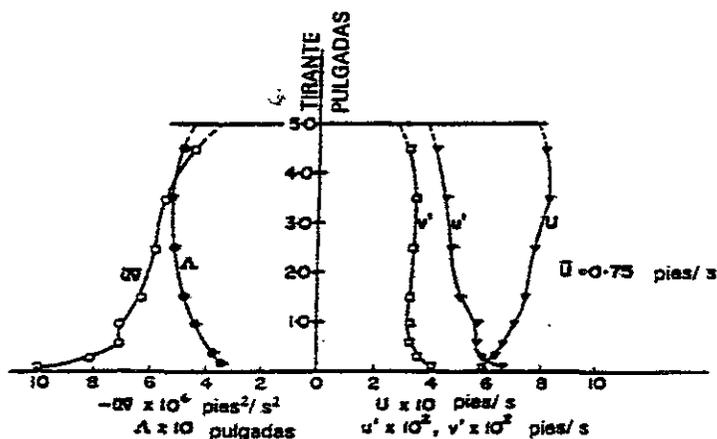


Lámina 5.8. Característica turbulentas en la cresta de un rizo artificial, McCorquodale y Giratalla(1973).

Best (1996) observó que los eventos de eyección asociados a la capa cortante sobre las dunas pueden extenderse hasta  $0.6 H$  y algunas veces llegan hasta la superficie del agua como los boils o estructuras turbulentas de mayor tamaño e intensidad.

En general la estructura de los perfiles de velocidad media obtenidos en la presente investigación concuerdan con los reportados en los estudios realizados por Nelson(1993) y Bennett y Best (1995), ver lámina 5.9, Estos investigadores realizaron experimentos sobre formas de fondo fijas, en especial los de Bennett y Best se aproximan más a los de la presente investigación, lo que se debe a que sus condiciones hidráulicas son más cercanas a las del presente estudio.

### 5.3.1.1 Análisis de los perfiles de déficit de velocidad.

Para examinar los efectos de la separación de flujo se obtuvieron los perfiles de déficit de velocidad  $\Delta U \equiv U_{\text{máx}} - U$  adimensionalizado con la velocidad cortante  $u_*$  y se compararon con el perfil estándar de déficit de velocidad para el caso de un canal con fondo plano. En la región externa  $y/H > 0.4$  como era de esperarse, los perfiles de velocidad se desviaron de la ley logarítmica, sin embargo son comparables con los reportados en la literatura para el caso de fronteras con rugosidad.

Coleman(1981), Zippe y Graf (1983) enfatizaron que la ley logarítmica es válida sólo en la región de la pared y que las desviaciones de la ley logarítmica no deben considerarse haciendo ajustes a los parámetros estándar  $\kappa$  y  $A$  sino adicionando una función  $W(\xi)$  llamada de estela, como es costumbre en el estudio de la capa límite en canales. De este modo:

$$U^+ = 1/\kappa \ln y^+ + A + W(\xi)$$

Ellos sugieren que la función empírica  $W(\xi)$  está dada por:

$$W(\xi) = 2\pi/\kappa \sin^2(\pi/2 \xi)$$

Esta ecuación fue propuesta por Coles (1956,1968) para flujos de capa límite en canales,. En la ecuación anterior  $\pi$  es el parámetro que expresa la desviación de la ley logarítmica en la región externa, en la función de la estela. La función de la estela parece ser la extensión más razonable de la ley logarítmica para la región externa.

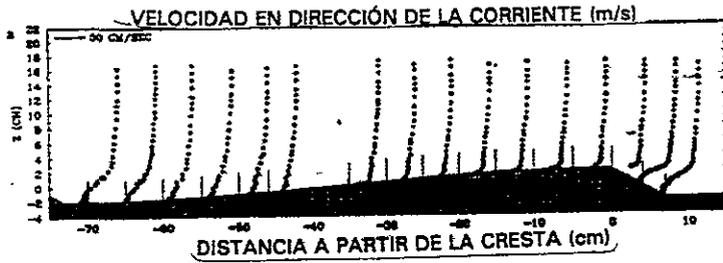
Usando las últimas ecuaciones resulta:

$$U^+_{\text{máx.}} - U^+ = -1/\kappa \ln \xi + 2 W_0/\kappa \cos^2(\pi/2 \xi)$$

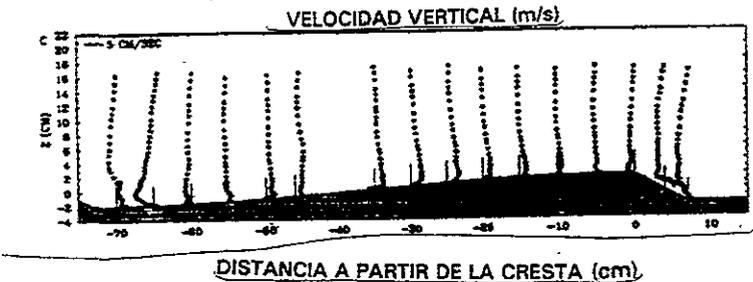
donde si  $\pi = 0$  se convierte en la ley logarítmica normal.

Así mismo,  $\kappa = 0.4$  es la constante de von Karman,  $\xi = y/H$  y  $W_0$  es un coeficiente de la estela estimado por medio de un ajuste de la ecuación al perfil medido.

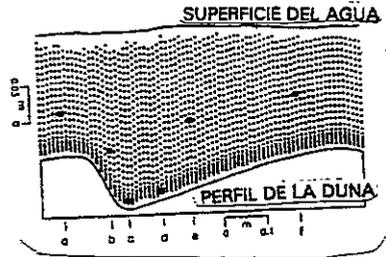
En la lámina 5.10 se muestran los perfiles de déficit de velocidad para el caso de  $Re = 18,400$ . En todas las secciones se observó que en la región externa ( $y/H > 0.4$ )



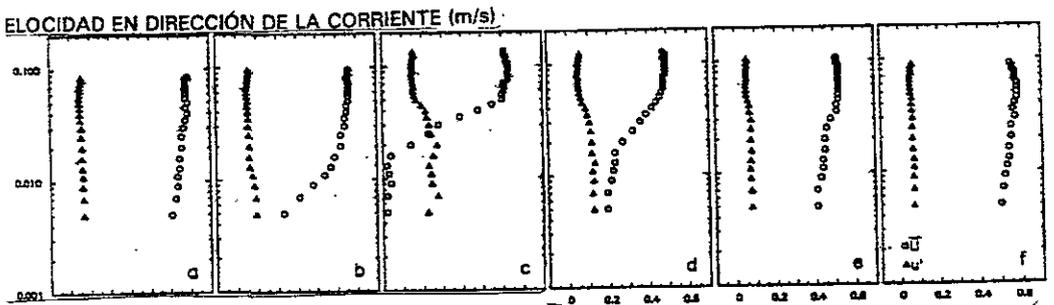
(a)



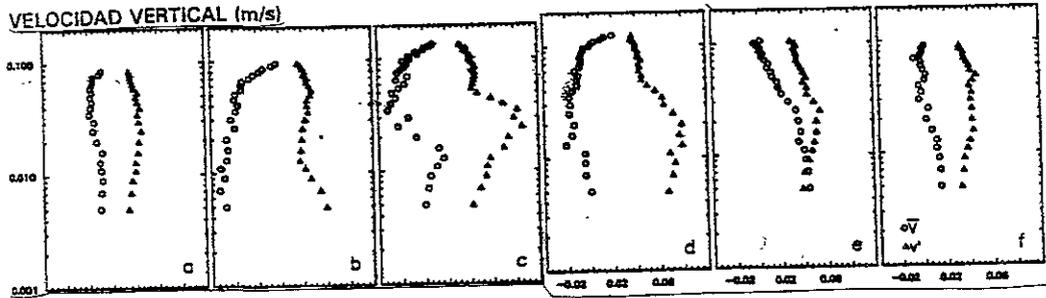
(b)



(c)



(d)



(e)

Lámina 5.9. Perfiles de velocidad media. a) en dirección de la corriente, b) en dirección vertical, medidos por Nelson *et al* (1993); c) localización de las secciones de medición, Bennett y Best (1995), d) velocidad en dirección de la corriente e intensidad de turbulencia, e) velocidad en dirección vertical e intensidad de turbulencia, Bennett y Best(1995).

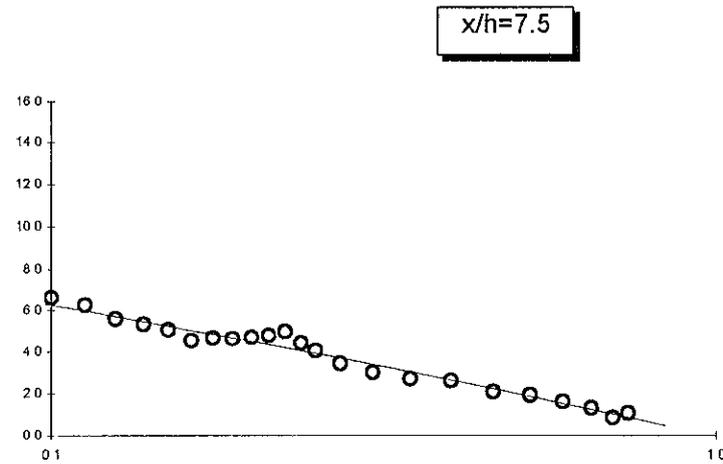
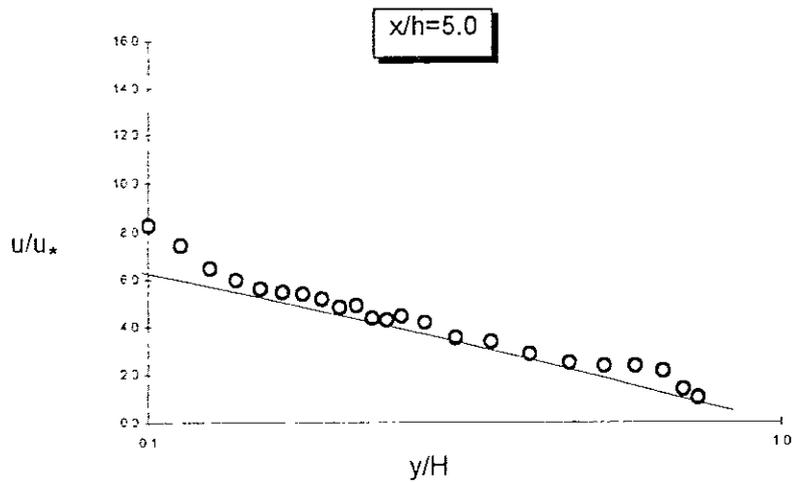
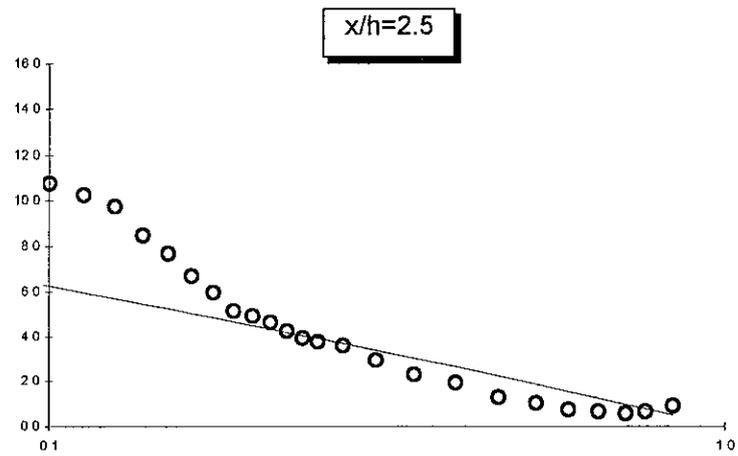
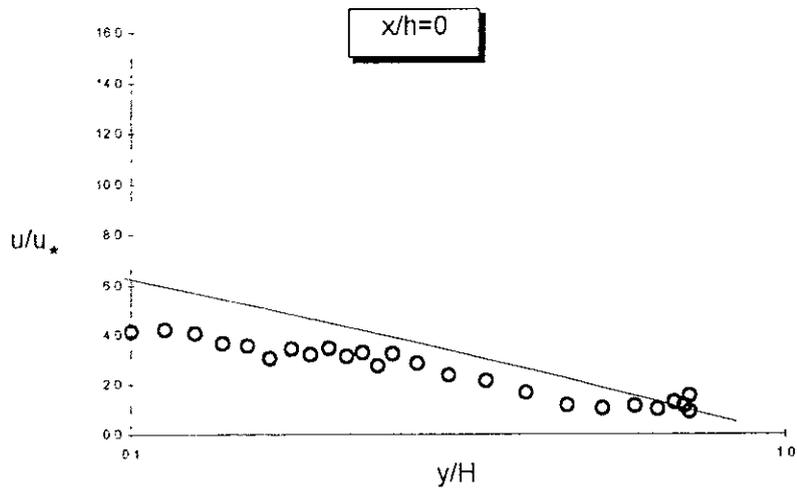


Lámina 5.10. Perfiles de déficit de velocidad semilogarítmicas para el presente estudio  $Re=18,400$

los valores de  $\Delta u / u_*$  se aproximan bastante bien al perfil de déficit de velocidad en un canal con fondo plano. En las secciones  $x/h=0$ ,  $x/h=1$ ,  $x/h=2.5$ ,  $x/h=5$  y  $x/h=7.5$  la región de colapso se extendió hasta  $y/h \approx 0.3-0.5$ . Abajo de la región de colapso se observó que  $\Delta u / u_*$  se desvía significativamente del perfil logarítmico establecido para fondo plano, esta desviación está ligada con la región de recirculación.

En la lámina 5.11, se presentan los perfiles de déficit de velocidad obtenidos por Lyn para el caso 2 en el cual las condiciones fueron semejantes a las del estudio que nos ocupa. Lyn (quien realizó un ajuste visual) encontró que para sus experimentos los valores de  $\Delta u / u_*$  se ajustaron a  $W_o = 0.5$  y  $0.1$  para los casos 1 y 2 analizados por él. Para fondo plano,  $W_o$  varió de 0 a 0.25 con un valor medio de  $W_o \approx 0.2$  (Nezu y Rodi 1986). En el presente estudio el valor de  $W_o = 0.1$ , y es semejante a los valores obtenidos por Lyn y se encuentra en el rango de los valores obtenidos por Nezu y Rodi. En el flujo de capa límite aproximadamente en equilibrio,  $W_o$  depende de los gradientes de presión, se reportan valores de  $W_o$  positivos cuando se incrementan los gradientes de presión adversa y valores negativos de  $W_o$  para gradientes de presión favorables. En el caso de este estudio, como se tiene una separación de flujo casi horizontal, los gradientes de presión en la región externa se reducen de manera que  $W_o$  se aproxima al valor característico para fondo plano. Los perfiles de defecto de velocidad de los casos de Delft para las secciones mostradas en la lámina 5.11, se muestran en la lámina 5.12. En estos se observó claramente el decremento en el déficit de velocidad, no obstante que  $u_*$  fue un poco mayor que en los experimentos de Lyn. Los valores de  $W_o$  para las mediciones de Delft son negativos con valores del orden de  $-0.3$ . Una explicación del comportamiento observado es que las relaciones  $h/H$ , actúan como un parámetro de contracción o expansión que hace que se induzca más gradiente de presión favorable antes de la separación y por lo tanto valores más negativos de  $W_o$ . Conforme a lo anterior, el valor de  $W_o = 0.1$  en el presente estudio es un valor razonable.

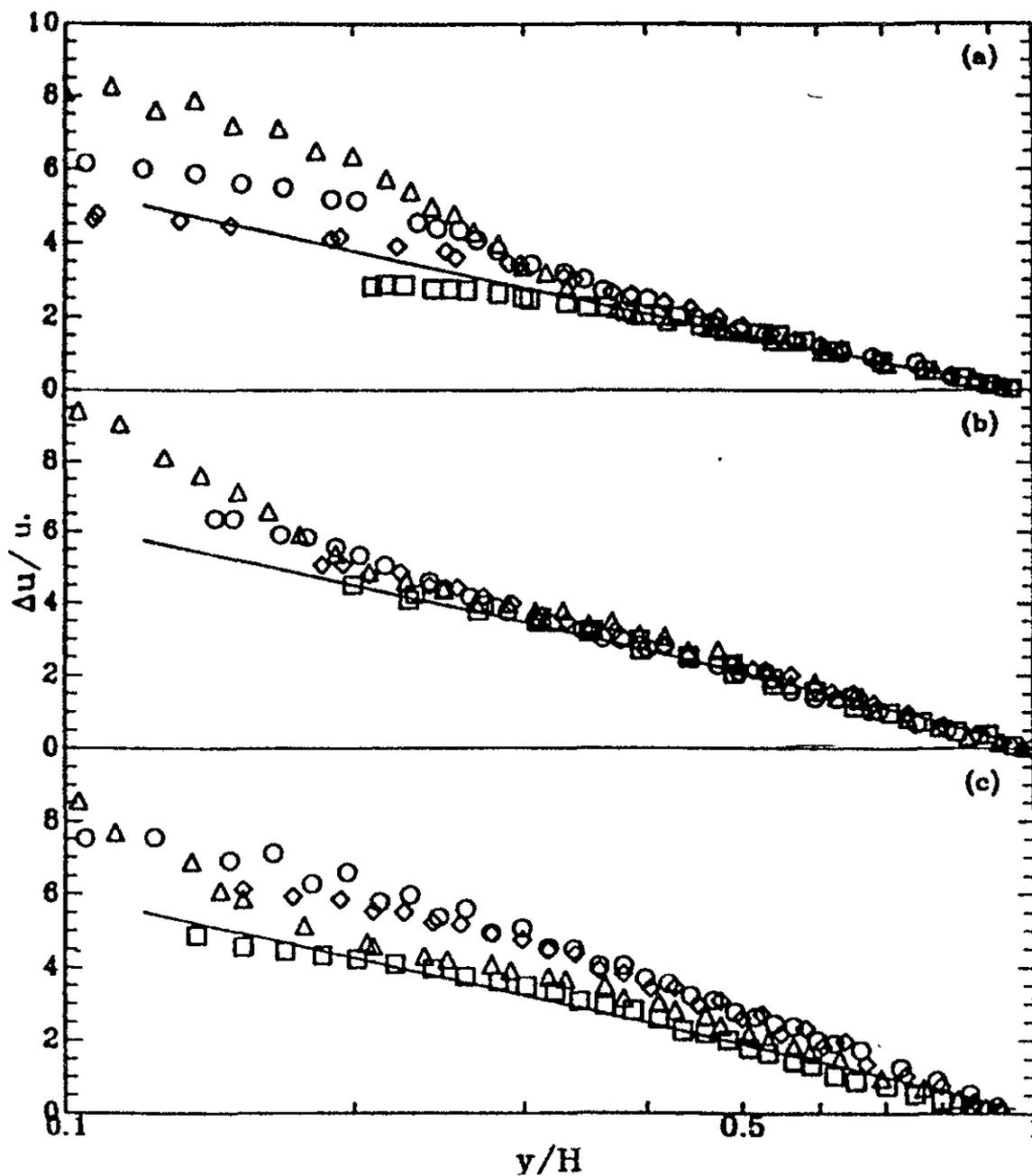


Lámina 5.11. Perfiles de déficit de velocidad en escala semilogarítmica para los experimentos de Lyn(1993). A) Caso 1; b)Caso 2 c) Caso 3; + =  $x/L = 0.04$ ; =  $x/L = 0.23$ ; ◇ =  $x/L = 0.51$ ; O =  $x/L = 0.70$ .

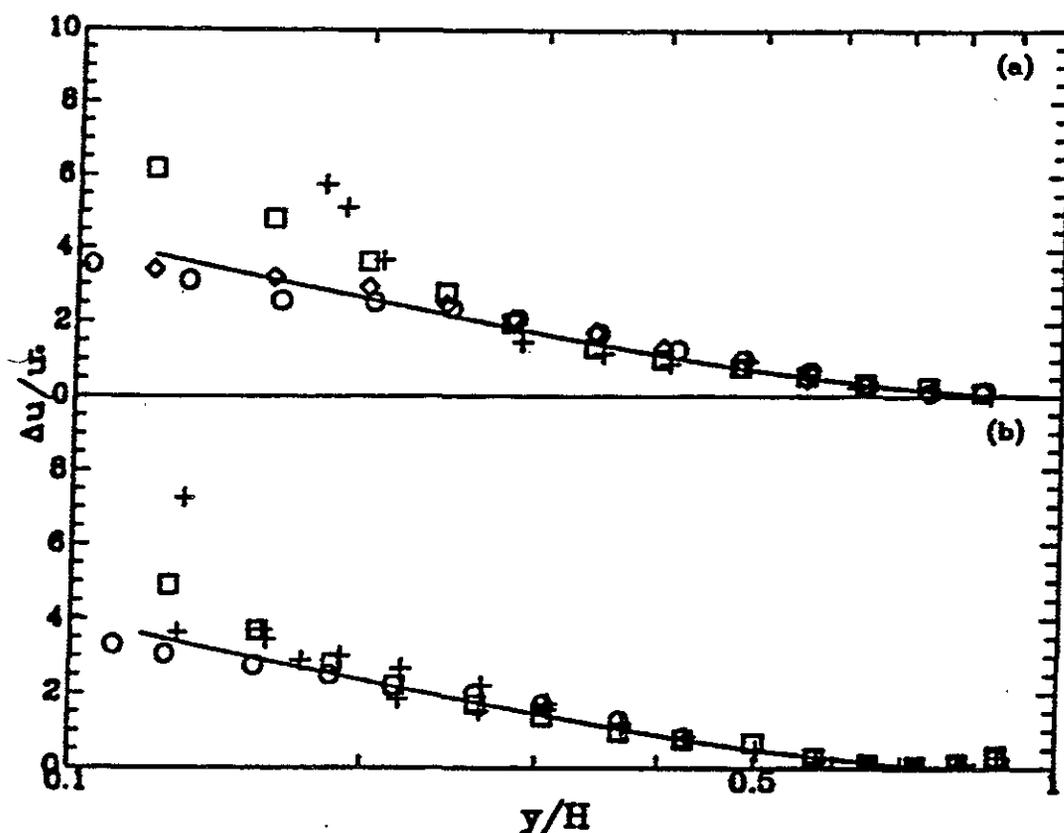


Lámina 5.12. Perfiles de déficit de velocidad en escala semilogarítmica para los experimentos de Delft (1988): a) experimento T5; b) experimento T6 (+ =  $x/L = 0.04$ ;  $\square = x/L = 0.23$ ;  $\diamond = x/L = 0.51$ ;  $\circ = x/L = 0.70$ )

### 5.3.2 Intensidades de Turbulencia y Esfuerzos de Reynolds.

En la lámina 5.13 se muestran los perfiles verticales de la raíz media cuadrada (rms) de las fluctuaciones de velocidad  $u'/u$  y  $v'/u$  vs  $y/H$ . En estos perfiles se observó que ambos tienen valores semejantes en la región del flujo externo y son del orden de  $u'/u \approx 1$  y  $v'/u \approx 0.8$ . Estos valores son similares a los presentados por otros investigadores como Lyn (1993) ver lámina 5.14 y Delft (1988) ver lámina 5.15. Nakagawa y Nezu (1987) reportaron valores máximos de  $u'/U_{m\acute{a}x} = 0.19$  y  $v'/U_{m\acute{a}x} = 0.087$  que observaron cerca de la capa cortante, para el caso del flujo detrás de un escalón. Para el caso de la presente investigación se alcanzaron valores máximos de  $u'/U_{m\acute{a}x} = 0.13$  y  $v'/U_{m\acute{a}x} = 0.087$  observados en la sección  $x/h = 0$ . Los perfiles de  $u'/u$  y  $v'/v$ , mostraron una tendencia muy semejante, casi uniforme, exhibieron máximos a una distancia del fondo  $y/H = 0.15$ .

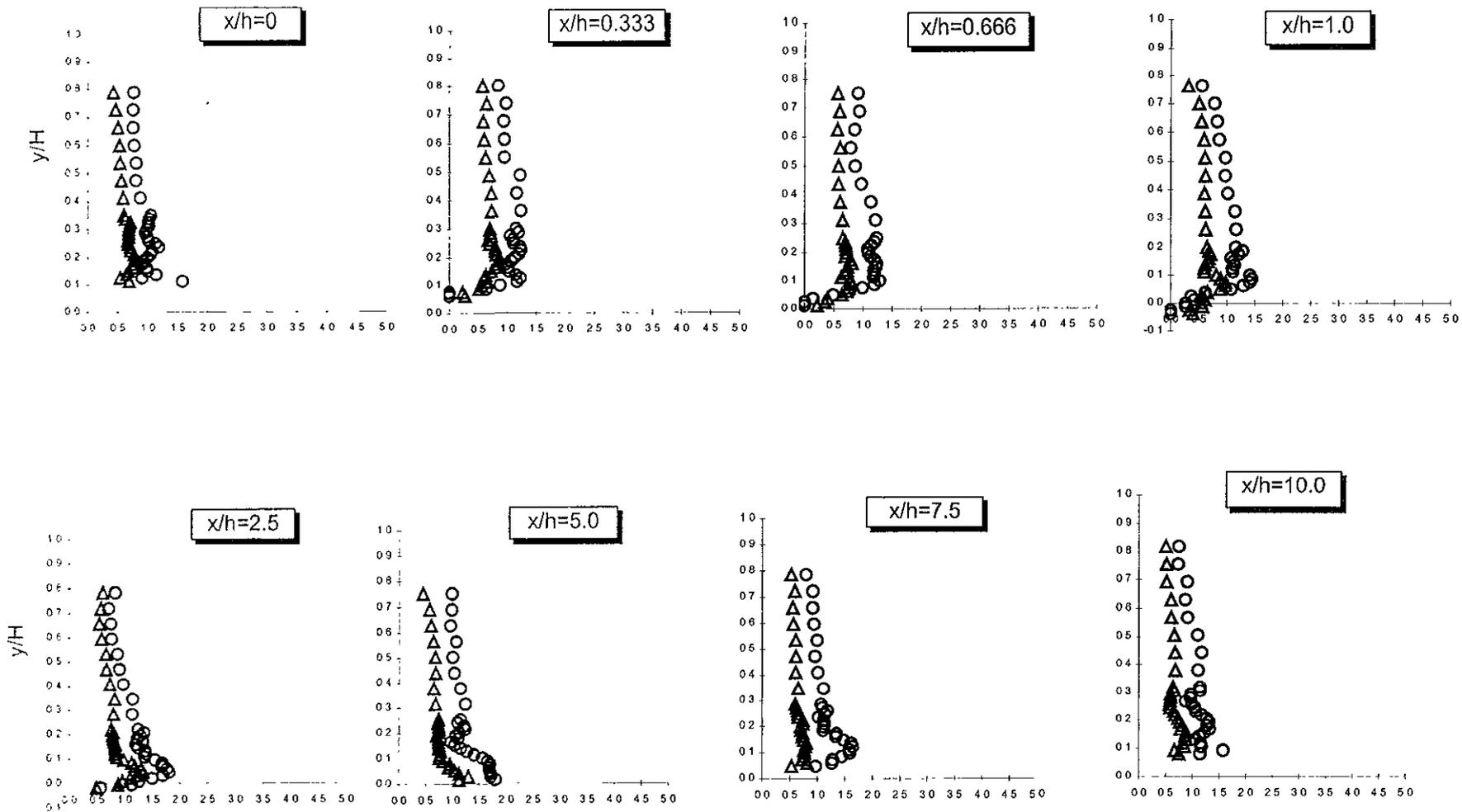


Lámina 5.13. Perfiles verticales de la raíz media cuadrada (rms) de las fluctuaciones de velocidad  $u'/u$  y  $v'/u$  para  $Re=18,400$ .

En  $x/h = 2.5$ , el desarrollo de la capa cortante de separación se relacionó con los fuertes máximos de  $u'/u_*$  que se observaron aproximadamente abajo del nivel de la cresta de la duna. El comportamiento de los perfiles de intensidad de turbulencia  $u'/u_*$  y  $v'/u_*$  es semejante en las secciones  $x/h = 5.0$  y  $x/h = 7.5$ . En la sección  $x/h = 10$  la forma del perfil se hizo más uniforme, los valores de intensidad de turbulencia, cerca del fondo, decrecieron y las distribuciones fueron semejantes a los perfiles observados en la sección cero lo que mostró un comportamiento cíclico. En esta sección los efectos de la recirculación puede decirse que ya han desaparecido.

De estas figuras también se puede deducir que arriba de la capa de mayor cortante para  $y/H > 0.2$  las relaciones  $u'/u_*$  y  $v'/u_*$  son casi constantes o varían muy poco. Best (1996) observó que los valores máximos de la intensidad de turbulencia vertical y en sentido de la corriente ocurren cerca de la cresta y a lo largo de la zona de separación, están restringidos a una posición cercana al 20% del tirante. Arriba de esta región los perfiles decrecen linealmente con la distancia a partir del fondo.

Aguas abajo la capa cortante crece lateralmente, lo que genera un decremento en la magnitud de los máximos en las gráficas de las secciones siguientes.

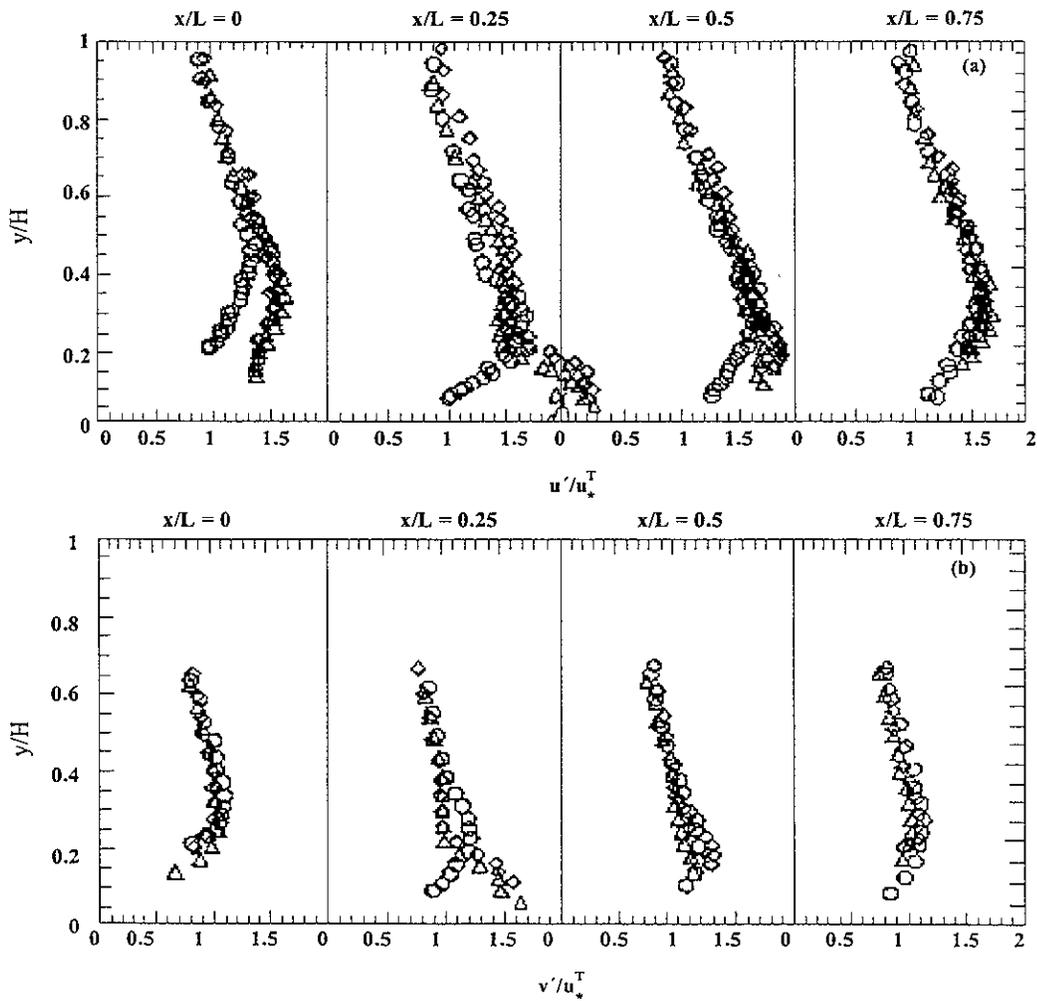


Lámina 5.14. Intensidades de turbulencia adimensionales: a)  $u'/u_*^T$  ( $\diamond$  = caso 2 de Lyn, 1993)

En estudios previos de separación de flujo se usó la velocidad máxima para adimensionalizar las intensidades de turbulencia, por ejemplo mientras  $u$  es una escala de velocidades apropiada para la región externa, no es muy apropiada para la región de la vecindad de la capa cortante. En estudios previos de separación de flujo se usó la velocidad máxima para adimensionalizar las intensidades de turbulencia, por ejemplo Nakagawa y Nezu (1987) reportaron valores máximos de  $u'/U_{m\acute{a}x} = 0.19$  y  $v'/U_{m\acute{a}x} = 0.16$ . En el caso de la presente investigación se alcanzaron valores máximos de  $u'/U_{m\acute{a}x} = 0.13$  y  $v'/U_{m\acute{a}x} = 0.087$  que se observaron cerca de la capa cortante.

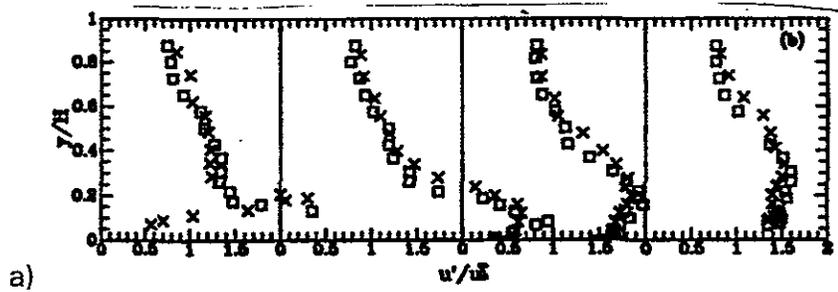


Lámina 5.15. Intensidades de turbulencia características de los experimento de Delft (1988); T5 = x y T6 = □: a)  $u'/u$ . ; b)  $v'/u$ .

Si se comparan las intensidades de turbulencia obtenidas en un flujo sobre formas de fondo con las intensidades de turbulencia reportadas para fondo plano (Nezu y Rodi 1986; Nezu y Nakagawa 1993) se observa que la forma de la distribución de intensidades de turbulencia es semejante en la vertical aunque con valores superiores para el caso de flujo sobre formas.

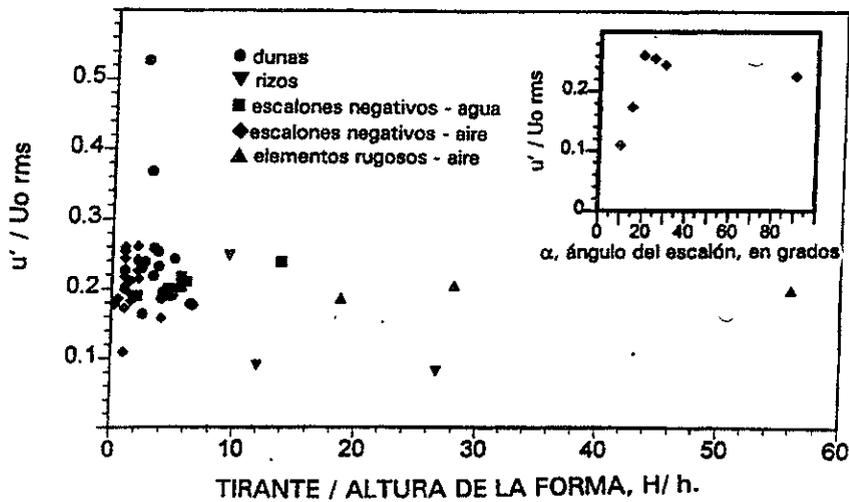


Lámina 5.16. Intensidades de turbulencia máximas observadas a través de la capa cortante en función de la relación tirante/altura de la forma (H/h) por Best (1966) obtenido de los reportes de diferentes autores en investigaciones del flujo sobre formas de fondo y sobre escalones tanto en agua como en aire, Fuentes: Rizos McCorquodale & Giratalla, 1973; Best 1996, Dunas- Raudkivi, 1966; Mc Quievy, 1973; van Mierlo & de Ruiter, 1988; Lyn, 1993; Bennett y Best, 1995; Kornmann, 1995; Escalones con pendiente negativa en agua- Rifai & Smith, 1971; Etheridge & Kemp, 1978; Nakagawa & Nezu, 1987; Best & Bennett; Escalones negativos en aire Bradshaw & Wong, 1972; Eaton & Johnson, 1980; Stevenson et al., 1984; Vogel & Eaton, 1985; Ruck & Makiola, 1987, 1988; Berbee & Ellzey, 1989; Otugüen et al., 1992; Elementos rugosos- Muller & Robertson, 1963. En el cuadro inserto se muestra la variación de la máxima intensidad de turbulencia sobre un escalón negativo en un túnel de viento bajo condiciones de flujo medio idénticas pero con diferentes ángulos de inclinación (Ruck y Makiola, 1987).

En la lámina 5.16 se muestra una comparación de las intensidades de turbulencia  $u'$  adimensionalizada con la velocidad de la corriente libre, a lo largo de la forma. En esta se observó que tanto a lo largo de la capa cortante como en el punto donde se termina la zona de recirculación las intensidades de turbulencia fueron significativamente mayores para el caso de dunas que para rizados y para escalones descendentes.

El máximo valor de  $u'_{rms}/U_0$  es aproximadamente constante e igual a 0.2 en un cierto rango de relaciones H/h mientras que en el caso de las formas de fondo la variación que ocurre en  $u'_{rms}$  es afectada principalmente con la altura de la forma.

Otra observación importante es el efecto del ángulo del escalón en la generación de mayor o menor turbulencia a lo largo de la capa cortante (Ruck y Makiola 1987)

observaron que para las mismas condiciones hidráulicas, los escalones con ángulos de  $25^\circ$  a  $30^\circ$  (que son los que se pueden relacionar con la pendiente de las dunas aguas abajo de la cresta) produjeron las intensidades de turbulencia máximas.

Los perfiles de los esfuerzos cortantes de Reynolds  $-u'v'/u_*^2$  se muestran en la lámina 5.17, y presentaron características semejantes a las previamente observados en  $u'/u_*$  y  $v'/v_*$ . Los esfuerzos de Reynolds mostraron un incremento en la región cercana a la separación, alcanzando un máximo cerca del centro de la región de recirculación, y decreciendo a cero cerca de la superficie del agua. En la sección  $x/h = 2.5$  se alcanzó un máximo para  $y/H = 0.125$  y decrecieron a cero cerca de la superficie del agua. En la sección  $x/h = 5.0$  la distribución de esfuerzos fue semejante a la de la sección anterior, sólo que los valores de máximo esfuerzo decrecieron y se localizaron más cerca del fondo. A partir de la sección  $x/h = 5.0$  la magnitud de los esfuerzos de Reynolds decreció y se hizo más uniforme. En la sección  $x/h = 7.5$  la distribución de los esfuerzos de Reynolds fue muy semejante y aproximadamente de la misma magnitud que los observados para  $x/h = 0$  indicando la repetición espacial del proceso. Como ocurrió para las distribuciones de intensidad de turbulencia, los máximos se localizaron al nivel de la cresta, revelando un fuerte efecto de la capa cortante.

Para efectos de comparación con otros autores, se presentan las características de algunos experimentos típicos en flujo sobre formas de fondo. En la lámina 5.18, se muestran los perfiles de los esfuerzos de Reynolds del estudio experimental de Lyn (1993) enseguida los de Delft (1988). En estas láminas se observa que todos los perfiles decaen fuertemente en la región externa y también decrecen a un valor menor en la región interna. La forma de los perfiles es semejante a las presentadas en la lámina 5.17 que corresponden a los esfuerzos de Reynolds obtenidos en el presente estudio. Sin embargo los valores de los esfuerzos de Reynolds en la región externa son generalmente menores en las láminas de Delft. Los valores de los máximos encontrados en el presente estudio son semejantes a los presentados por Nakagawa y Nezu (1987) en el estudio del flujo detrás de un escalón (adimensionalizando con respecto a  $U_{m\acute{a}x}$ ). Una explicación de las diferencias puede deberse al efecto del

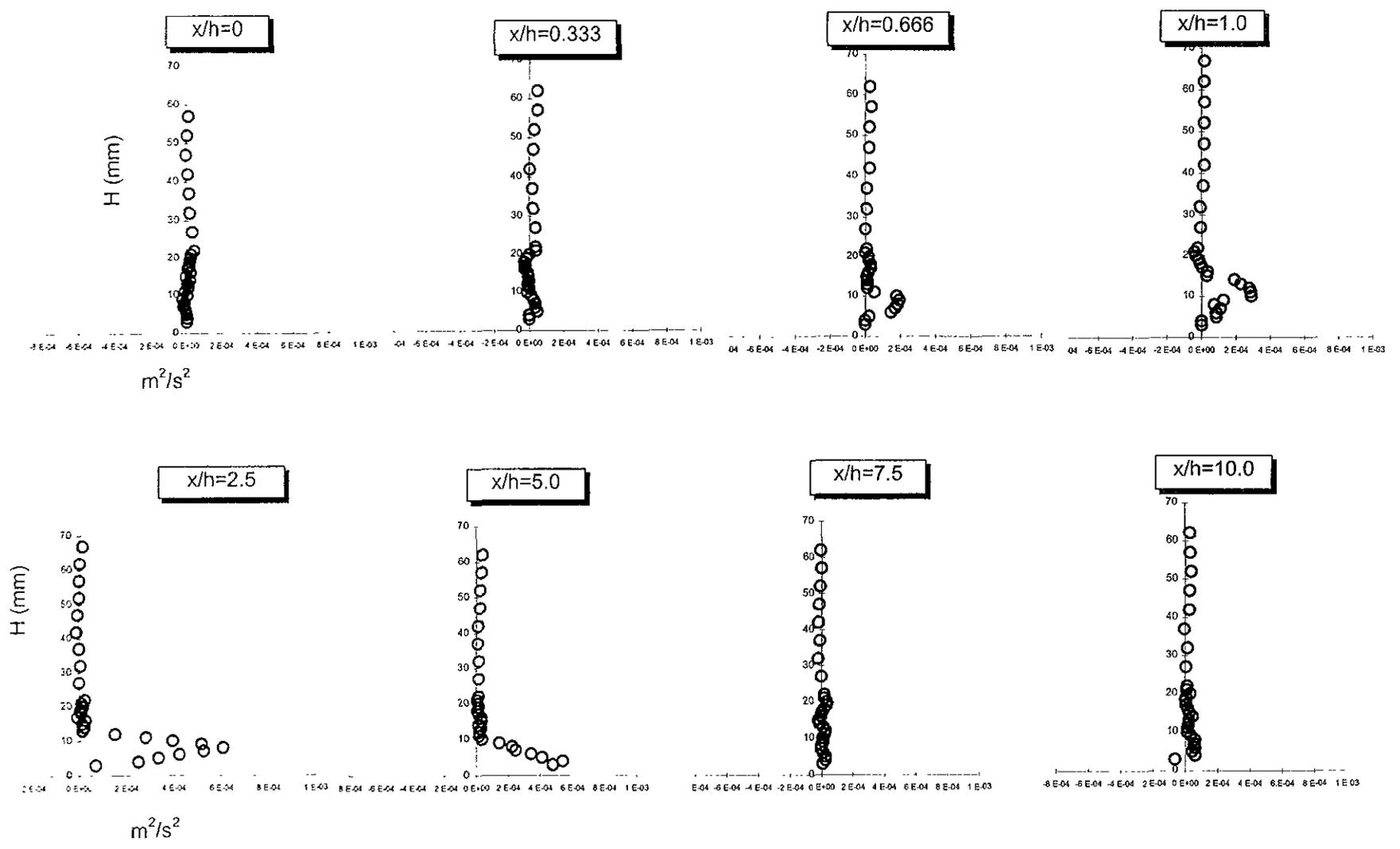


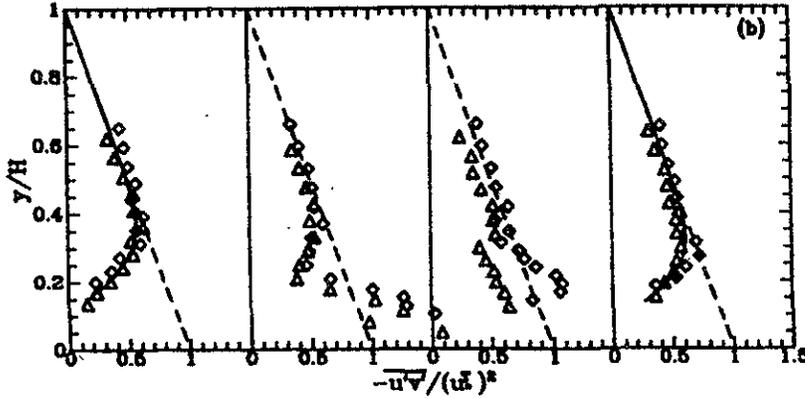
Lámina 5.17. Esfuerzos cortantes de Reynolds  $u'v'$  para  $Re=18,400$ .

aplanamiento en la cresta de la duna, también se puede decir que la localización de las secciones de medición no corresponden exactamente, particularmente debido a que existen diferencias en la longitud de la zona de recirculación.

Las investigaciones de las estructuras coherentes relacionadas con las formas de fondo son más recientes. La técnica del cuadrante se usa frecuentemente para clasificar el tipo de eventos turbulentos. En esta técnica se dibujan las fluctuaciones de velocidad horizontal y vertical alrededor de la media y de acuerdo con su signo se pueden definir cuatro cuadrantes de la siguiente manera cuadrante 1 ( $v' +, u' +$ ) define un evento de interacción de fluido hacia afuera de la pared, cuadrante 2 ( $v' +, u' -$ ) describe un evento de eyección de fluido desde la pared hacia el flujo externo, cuadrante 4 ( $v' -, u' +$ ) evento de barrido o *sweep*, describe un movimiento del fluido de la región externa hacia la pared, cuadrante 3 ( $v' -, u' -$ ) interacción del fluido hacia la pared (Lu y Willmarth 1973). Una de las investigaciones más completas de las estructuras coherentes relacionadas con las formas de fondo es la de Bennett y Best (1996) estos autores asociaron los eventos de eyección con la capa cortante en los rizos. Estos eventos se disipaban rápidamente por lo que se limitaron a las regiones cercanas a la pared. En contraste, observaron que en las dunas los eventos del cuadrante 2 (eyecciones de gran magnitud sucedieron a lo largo de la capa cortante,

a)

$x/L=0$      $x/L=0.25$      $x/L=0.5$      $x/L=0.75$



b)

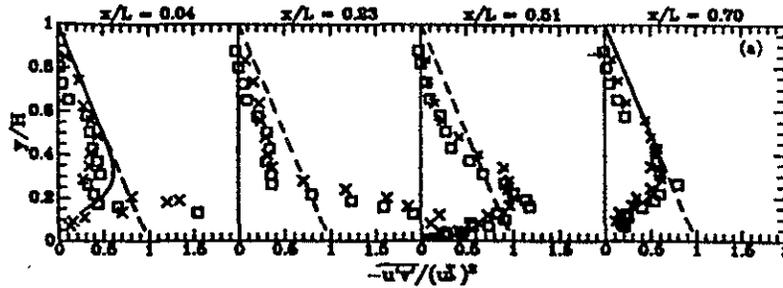


Lámina 5.18. Esfuerzos de Reynolds. a)  $\diamond$  Caso 2 de Lyn (1993); b) Experimentos de Delft (1988).

se extendieron hasta  $0.6H$  y alcanzando a tener interacción con la superficie libre del agua. A estos eventos de mayor magnitud se les denominó boils y se debieron al mayor gradiente de velocidad en la zona de separación de la capa cortante y ocurrieron con mayores frecuencias. Los eventos del cuadrante 4 (sweeps o barridos) fueron identificados a partir de la cresta de la duna, en toda la zona de recirculación de flujo hasta el punto donde esta zona se termina. Best presentó un modelo esquemático del flujo y las estructuras de la turbulencia para formas de fondo (rizos, transición rizo-dunas y dunas donde localizó el tipo de eventos y el porcentaje de estos (ver lámina 5.19).

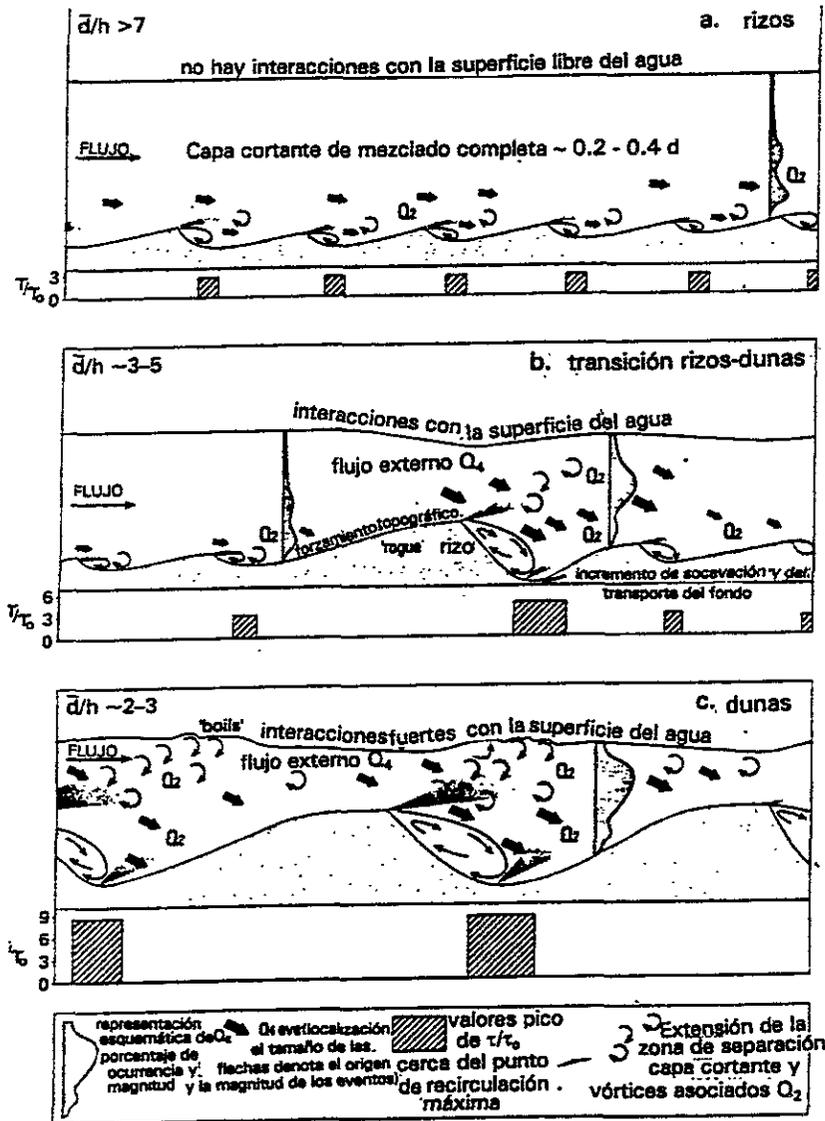


Lámina 5.19. Modelo esquemático de las estructuras turbulentas para rizados, transición y dunas, Best (1995).

#### 5.4 Visualización del flujo y Clasificación de estructuras turbulentas.

##### 5.4.1 Detección y clasificación de estructuras coherentes con inyección de tinta.

En esta sección se presenta una clasificación de las estructuras coherentes observadas en el flujo sobre formas de fondo fijas, y se hace una descripción general de sus características. Posteriormente en el capítulo 7 se analizan en forma más detallada las estructuras turbulentas clasificadas, haciendo referencia a investigaciones previas, y se da una explicación, de acuerdo con la mecánica de fluidos, de los posibles mecanismos de generación.

Las técnicas usadas en la visualización de flujo fueron la inyección de tinta, la generación de burbujas de hidrógeno y la de partículas trazadoras. Con la primera técnica, se inyectó la tinta en tres puntos del fondo del canal, en el centro, a lo largo de la duna ( $x/h = 6.25$ ), en la pendiente a la mitad de la altura de la duna ( $x/h = 0$ ), en la cresta de la duna y, en el punto más bajo de la duna ( $x/h = 1.0$ ), lo que permitió identificar diferentes tipos de estructuras coherentes en cada zona. Se utilizó azul de metileno como trazador y el mismo sistema para la grabación de imágenes que en el caso del canal con fondo fijo liso, (ver lámina 3.5 ). Con la técnica de generación de burbujas de hidrógeno, los hilos se ubicaron en cuatro secciones  $x/h = 0$ ,  $x/h = 1$ ,  $x/h = 2.5$ ,  $x/h = 6.25$ . Para la obtención de las imágenes, en este caso se usó la cámara de alta velocidad colocada de manera de obtener el plano que forma la dirección de la corriente con la vertical, el cual se considera el de mayor interés. Las partículas trazadoras utilizadas fueron de sal, estas se agregaron aguas arriba de la sección de observación, se desplazaron con la velocidad de la corriente, mostrando sus trayectorias.

Las estructuras coherentes se caracterizan por un esqueleto consistente de tubos vorticosos donde se concentra la vorticidad, y por las dimensiones que ocupan el espacio y por su tiempo de duración. Estas estructuras son casi periódicas en el tiempo. En el estudio de estas estructuras es de importancia conocer el origen, evolución y decaimiento o rompimiento, así como su velocidad de convección en el flujo. Del análisis de las imágenes de vídeo se pudieron distinguir cinco tipos de estructuras diferentes a lo largo de la duna.

- 1) Estructuras coherentes generadas en la capa cortante, aguas abajo, detrás de la cresta de la duna, del tipo *ondas de Kelvin Helholz*.
- 2) Generación de vórtices de mayor tamaño *boils*
- 3) *Vórtices verticales semejantes a pequeños tornados* generados en la línea donde se inicia la forma siguiente.

- 4) Vórtices que se desprenden en la pendiente detrás de la cresta y que se estiran en dirección de la corriente. Estos vórtices son semejantes a los vórtices *tipo embudo o funnel* descritos por Kaftori *et al* (1995) en una capa límite sobre fondo plano.
- 5) *Remolinos en forma de ojo*, que se forman detrás de la cresta, cerrando la zona de recirculación de flujo.

Algunas de las estructuras identificadas, como son el vórtice en forma de ojo, las ondas de Kelvin Helmholtz y los boils ya habían sido reportadas en investigaciones anteriores. Los vórtices en forma de cono habían sido observadas en un flujo sobre una placa plana pero no se habían reportado en flujos sobre formas de fondo y de las estructuras en forma de pequeños tornados que se observaron a inyectar tinta en el punto más bajo (en  $x/h = 1.0$ ) no se tienen antecedentes.

1- *Ondas de Kelvin-Helmholtz*, generadas en la región de fuerte cortante en la cresta de la duna Inmediatamente después de la cresta de la duna el flujo medio interactuó con el flujo estacionario generando una capa de fuerte cortante donde se presentan inestabilidades del tipo Kelvin-Helholz. Estas ondas fueron identificadas por diferentes investigadores entre ellos Simpson, 1989, Bennett y Best 1996, y Muller (1985) en condiciones semejantes a las de este experimento. En la presente investigación se observó que si se introduce tinta en la cresta de la duna se generan ondulaciones tanto en la dirección vertical como en planta o transversal, lo cual comprobó que las estructuras son tridimensionales. Se pudo observar que estas estructuras se separaban del borde de la duna, crecían, se hacían inestables y se rompían arrastrando fluido hacia la pared en la parte de la pendiente aguas abajo de la duna. Esto se pudo observar claramente en la película, tanto en corte como en perfil. Al incrementarse la velocidad, estas estructuras aumentan su frecuencia y los remolinos que se generan provocan que se levante sedimento. Se puede decir que es muy probable que las oscilaciones casi periódicas produzcan cambios en la longitud de la región de recirculación y sean las responsables del crecimiento de las formas de fondo. En la lámina 5.20 se muestra una imagen que se obtuvo al

inyectar tinta en  $x/h = 0$ , en esta imagen se muestra con claridad la presencia y desarrollo de este tipo de estructuras.

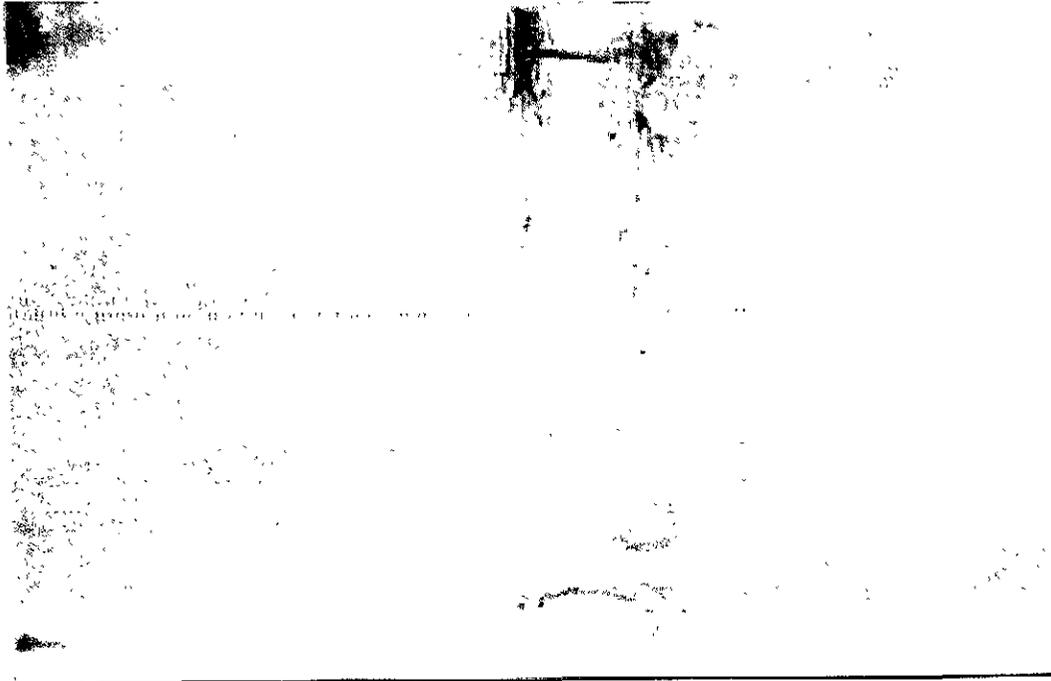


Lámina 5.20. Ondas de Kelvin-Helmholz en la cresta de la duna para  $Re = 18,400$ .

2. Boils o kolks, resultan de la interacción del flujo acelerado que proviene de la pendiente ascendente de la duna, y por las inestabilidades producidas en la zona de separación detrás de la misma lo que causa una desaceleración de flujo. Los boils observados con visualización de partículas se identificaron con el levantamiento de las partículas hacia la superficie del agua. Estas estructuras han sido observadas y descritas por diferentes autores; Coleman, 1969, Jackson, 1976. En la lámina 5.21 se muestra una imagen de la visualización con partículas.

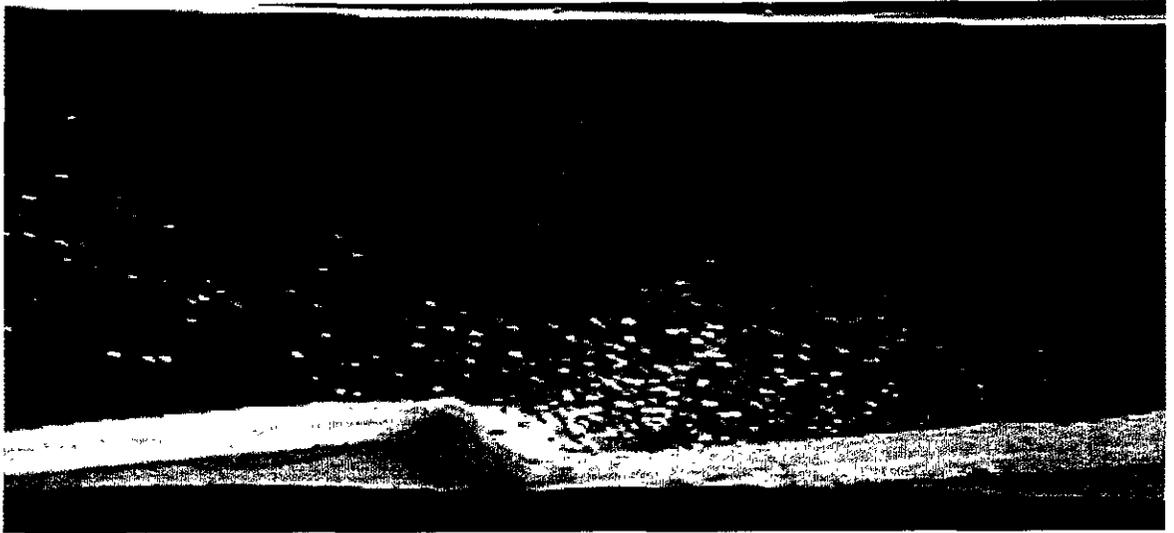


Lámina 5.21. Visualización con partículas, levantamiento de las partículas por los boils

3. *Vórtices verticales semejantes a pequeños tornados.* Al analizar las imágenes obtenidas al inyectar tinta en el punto más bajo detrás de la cresta, en  $x/h = 1$ , se observaron estructuras vorticosas semejantes a pequeños tornados que se originaban en este punto. El número de remolinos identificados varió a través del tiempo, apareciendo unos y desapareciendo otros intermitentemente. Estos remolinos crecieron hasta el nivel de la cresta de la forma, a partir de esa altura fueron barridos por el flujo. El movimiento de oscilación de estas estructuras fue relativamente rápido, lo cual hizo difícil apreciar con claridad el desarrollo y evolución de estas estructuras, sin embargo se pudieron apreciar sus características generales. Las estructuras oscilaron alrededor de un eje vertical, formando círculos en el plano X-Z con diámetros pequeños muy cerca del fondo y de mayor magnitud cerca de la cresta de la duna. En la lámina 5.22 se muestra una imagen de este tipo de estructuras.

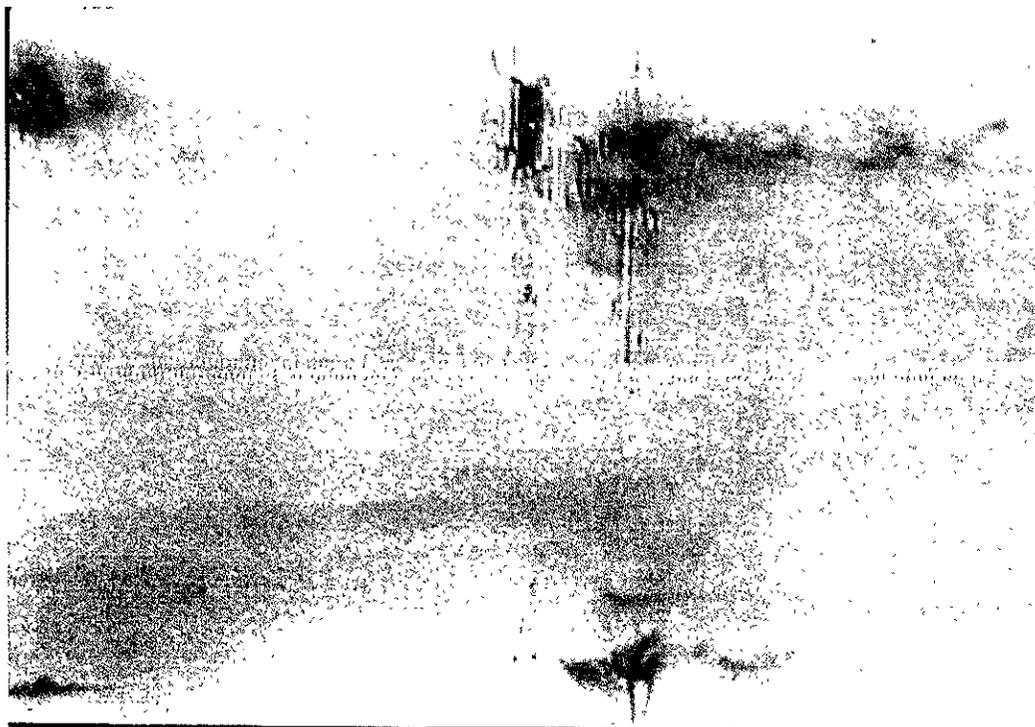


Lámina 5.22. Vórtices en forma de pequeños tornados que se originan en el punto más bajo detrás de la cresta de la duna.

4. *Vórtices longitudinales tipo cono funnel* que crecen como espiral en dirección de la corriente. Estos vórtices se originaron en la pendiente aguas abajo de la cresta y se mueven en la dirección de la corriente principal y a su vez hacia la superficie libre del agua. Estas estructuras se observaron con la visualización de burbujas de hidrógeno. Se observó que se pierden estas estructuras en el flujo medio. Este tipo de vórtices es semejante a los descritos por Kaftori *et al* (1995), aunque aquellos fueron visualizados en la región de la pared sobre un fondo plano. Lámina 5.23.

5. *Remolinos o vórtices tipo ojo*, transversales a la dirección del flujo, con un eje paralelo a la cresta de la duna. En la visualización de flujo se observó que la línea de separación de flujo se pega a la pendiente ascendente de la forma siguiente y se despegó casi periódicamente, la escala de estos remolinos es variable, ya que el punto en donde se cierra la zona de recirculación fluctuó intermitentemente. Cuando se despega la línea de separación, el remolino tipo ojo se rompe y se

forman remolinos transversales de escalas menores. En la lámina 5.24 se puede apreciar el desarrollo de este tipo de estructuras.

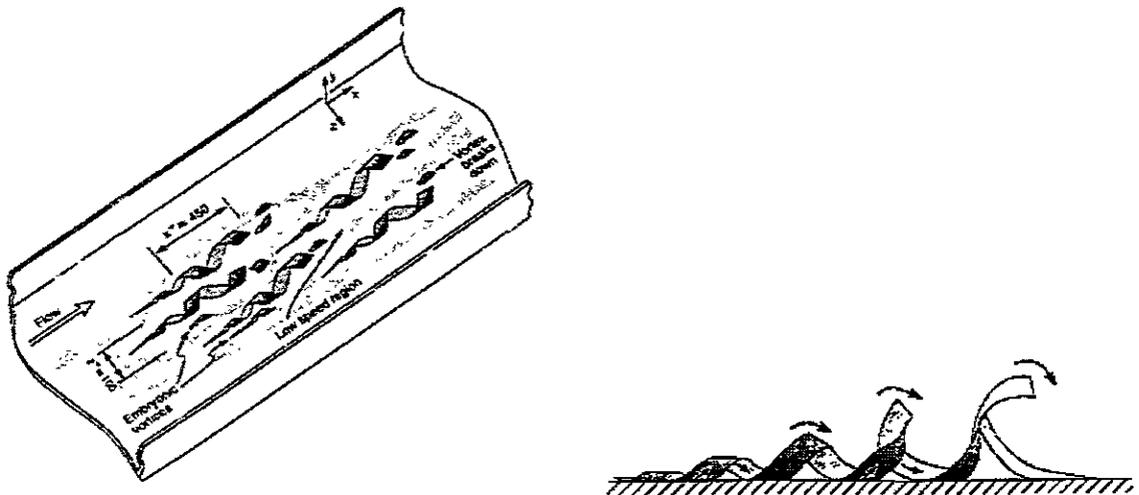


Lámina 5.23. Vórtices tipo cono, en un canal con fondo plano. Kaftori *et al* (1995)

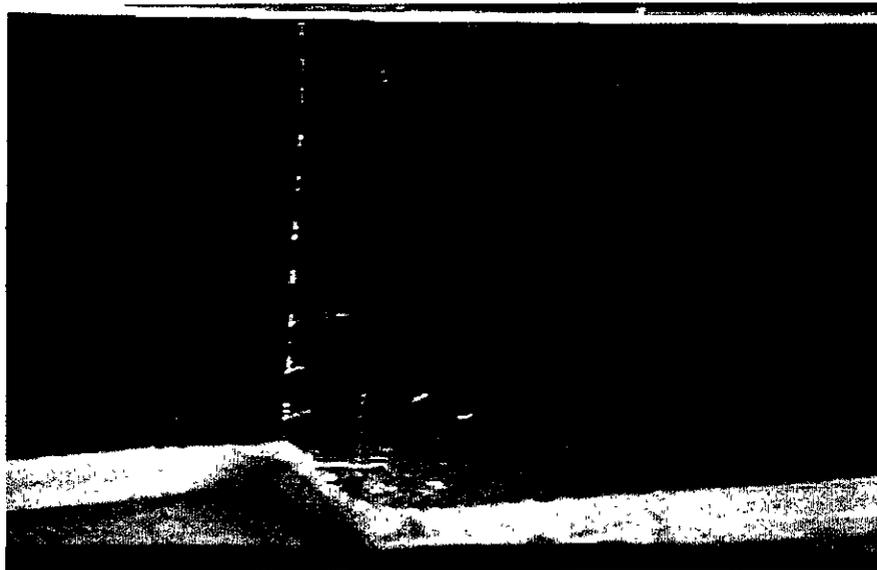


Lámina 5.24. Vórtice transversal tipo ojo, visualización con burbujas de hidrógeno

Aún con las técnicas usuales de grabación de imágenes en video, no se puede captar el movimiento de las estructuras tal como se ha observado en el experimento. Para que quede más claro el tipo de las estructuras observadas y su localización, se dibujaron esquemáticamente los diferentes tipos de estructuras en la lámina 5.25.

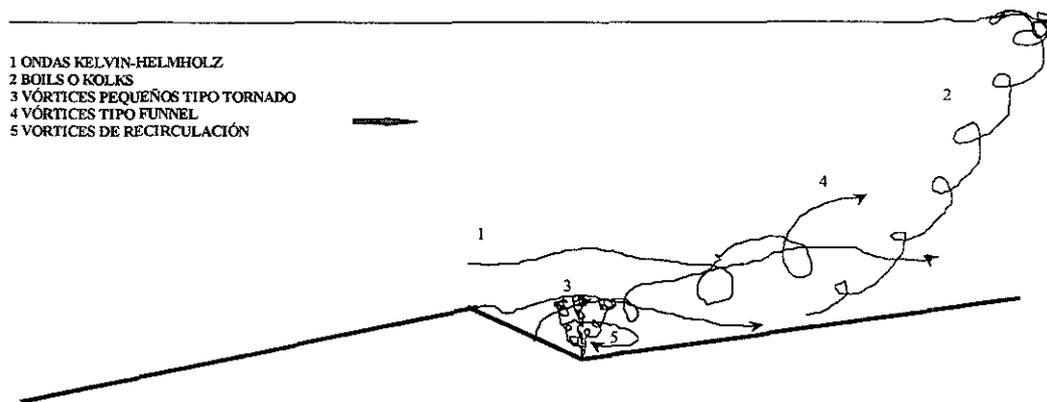


Lámina 5.25. Representación esquemática de los diferentes tipos de estructuras turbulentas generadas detrás de una forma de fondo en un canal de laboratorio.

#### 5.4.2. Generación de Burbujas de Hidrógeno para la obtención de velocidades instantáneas, campos de velocidad desde un punto de vista Lagrangiano.

La visualización con burbujas de hidrógeno se requirió con objeto de verificar el comportamiento de los perfiles de velocidad instantáneos y poder explicar la dinámica del flujo sobre las formas de fondo y en especial en la región de recirculación. También se utilizó como medio para conocer otros aspectos de las estructuras visualizadas anteriormente con la tinta.

En el caso de aplicación, el circuito se formó con un hilo muy fino, el cátodo fue una placa de cobre, colocada cerca de la región visualizada. El voltaje que se aplicó fue de 13 volts, el cual se proporcionó en forma de pulsos. El hilo se cubrió con una capa de pintura en intervalos conductores y no conductores, esto sirvió para identificar la primera burbuja de cada intervalo. Para mejorar el contraste se agregó sulfato de sodio en una concentración de 0.075 g/l. La trayectoria de las burbujas del frente hasta su desaparición se logró mediante el equipo de video Kodak Ektapro de alta velocidad y el software MAW (motion analysis.workstation). A partir de las trayectorias se estimaron las velocidades en el plano formado por la dirección de la corriente y la vertical, y con estas se calculó el vector velocidad y su dirección. El intervalo de tiempo entre dos vectores consecutivos de una línea de vectores fue de 0.008 s. en

cada una de las líneas se obtuvieron aproximadamente 30 vectores para los tiempos  $t = 0.008s, 0.016s, 0.024s, \dots, 0.032s$  hasta  $0.24s$ ). Los vectores se graficaron considerando el punto de origen de coordenadas de la burbuja para cada tiempo.

Para obtener los campos de velocidad sobre las formas de fondo, el hilo generador se ubicó en las secciones  $x/h = 0, x/h = 1, x/h = 2.5$  y  $x/h = 6.25$ . La generación de las burbujas en cada hilo se hizo de manera independiente en cada hilo, estudiando cada región del flujo. Para hacer el seguimiento de las burbujas, inicialmente se tomó una secuencia de las grabaciones hechas con la cámara Kodak- Ektapro. La grabación de las imágenes se hizo a una velocidad de 125 cuadros por segundo. El proceso descrito anteriormente para calcular las velocidades instantáneas se repitió cinco veces consecutivas en el tiempo, con lo que se lograron cinco o seis campos de velocidad completos. El intervalo de tiempo entre cada campo fue de  $0.24s$ . La secuencia de imágenes permite seguir la evolución de los campos de velocidad e identificar y seguir la evolución de las estructuras y su rompimiento.

-Descripción general de los campos de velocidad instantáneos con la generación de burbujas de hidrógeno.

En las láminas 5.26-5.29 se presentan los campos de velocidad instantáneos, en donde los vectores velocidad están representados por flechas cuya magnitud es proporcional a la velocidad y su escala se presenta en el cuadro superior.

En términos generales la estructura de las distribuciones de velocidad fue semejante a la obtenida con anemometría de película caliente, mostrando velocidades más altas en la parte superior del flujo del orden de 2 a 3 veces las velocidades de la región cercana a la pared. Se observó que el proceso de separación de flujo está relacionado con una reducción de las velocidades especialmente en la zona  $x/h = 0, x/h = 1, x/h = 2.5$  y cerca del fondo. De estos campos de velocidad se observó, la existencia de un flujo muy complejo cerca del punto de separación y donde se cierra la región de recirculación de flujo. La circulación en general fue positiva, es decir en la dirección de

las manecillas del reloj. Se pudieron detectar las oscilaciones en la ubicación del punto de cierre de la burbuja de recirculación, las que están relacionadas con las macroestructuras que se forman detrás de la cresta. Fue muy importante seguir las trayectorias de las burbujas sobre todo en las secciones  $x/h=0$  y  $x/h=1.0$  ya que además de obtener los recorridos de las burbujas, permitió conocer los signos de los vectores velocidad en esa región tan compleja y a partir de esto poder intuir la dinámica del flujo.

En las láminas 5.26 a)-f), se presenta una secuencia de los campos de velocidad obtenidos para el caso cuando el hilo se colocó en la sección  $x/h=0$  (en la cresta de la forma). En la lámina 5.26a), se observó que los vectores velocidad mostraron cambios de dirección presentando una configuración de ondas. En la región cerca a la frontera inferior, los vectores velocidad disminuyeron y mostraron un comportamiento más complejo. Se puede apreciar que se forman estructuras de tipo vórtice ojo, detrás de la duna en la región de recirculación.

En la lámina 5.26b). Se observó que en la parte superior los vectores velocidad se orientaron hacia la superficie del agua, presentando un incremento de velocidad. Por otra parte cerca de la cresta de la forma, los vectores velocidad convergen. Las dos líneas de vectores más cercanas al fondo, no cierran la zona de separación, terminan con una dirección hacia el fondo.

En la lámina 5.26c), se muestra un campo de velocidades, donde los vectores se orientaron en forma más estable en una dirección casi horizontal. Cerca del fondo los vectores son de menor dimensión y aguas abajo su dirección es hacia la pared. Es posible que en ese momento la zona de recirculación este cerrada, en general se muestra un patrón muy estable.

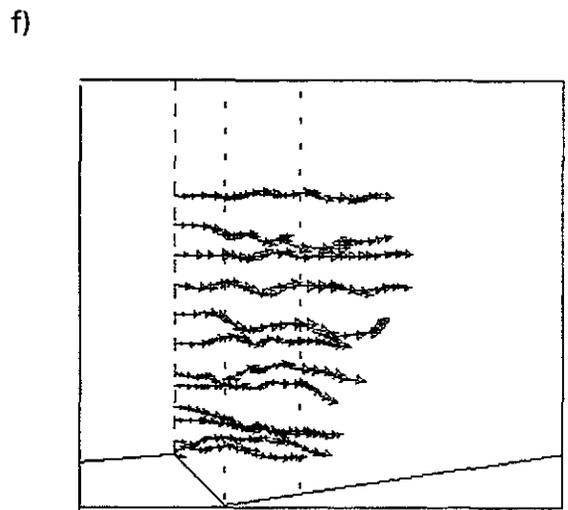
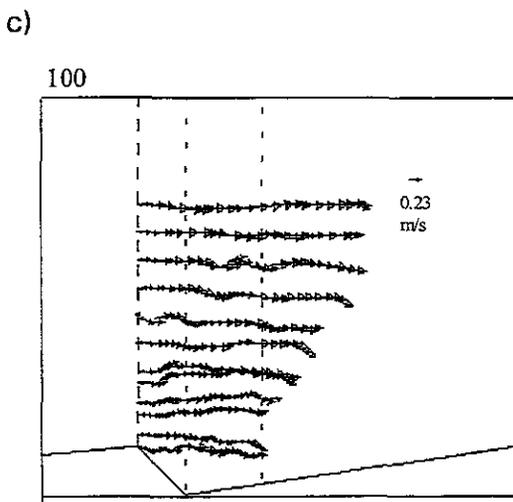
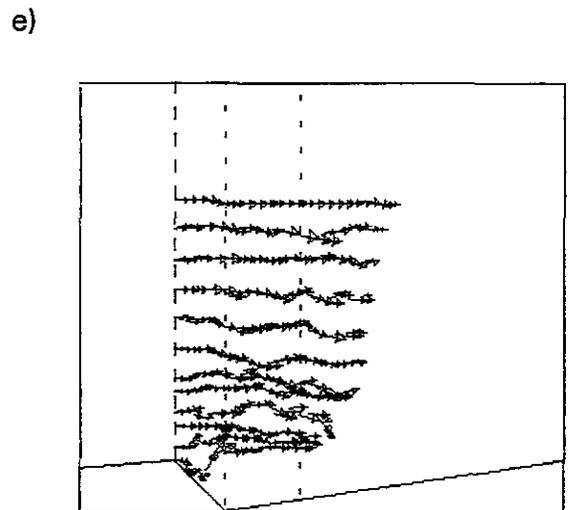
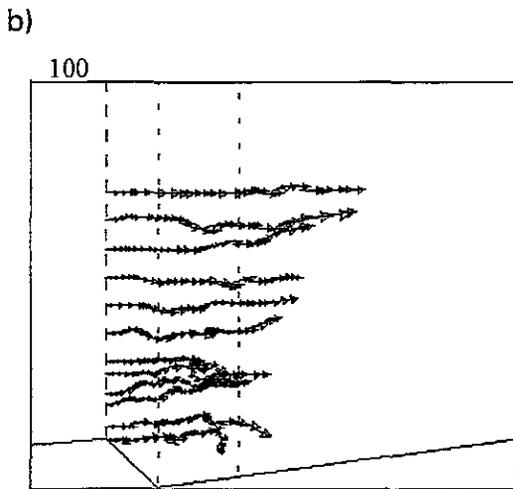
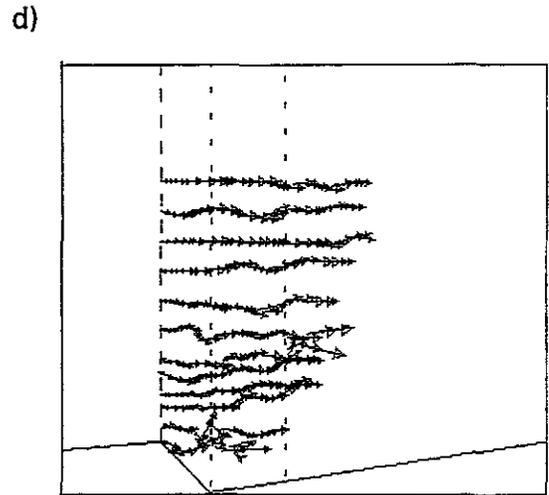
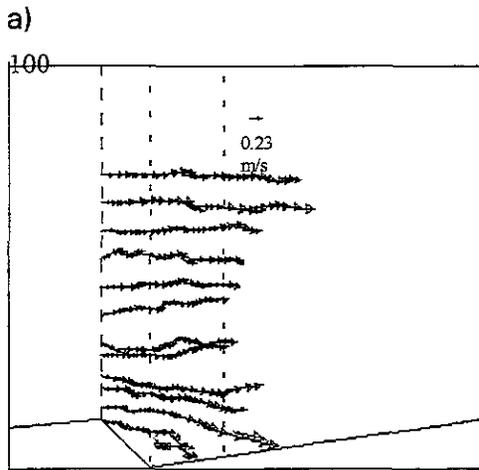


Lámina 5.26. Secuencia de distribuciones de velocidad con burbujas de hidrógeno, en la sección  $x/h=0$ , para  $H=0.08\text{m}$  y  $Re=18,400$ .  $\Delta t$  (entre campos) =  $0.24\text{s}$ .

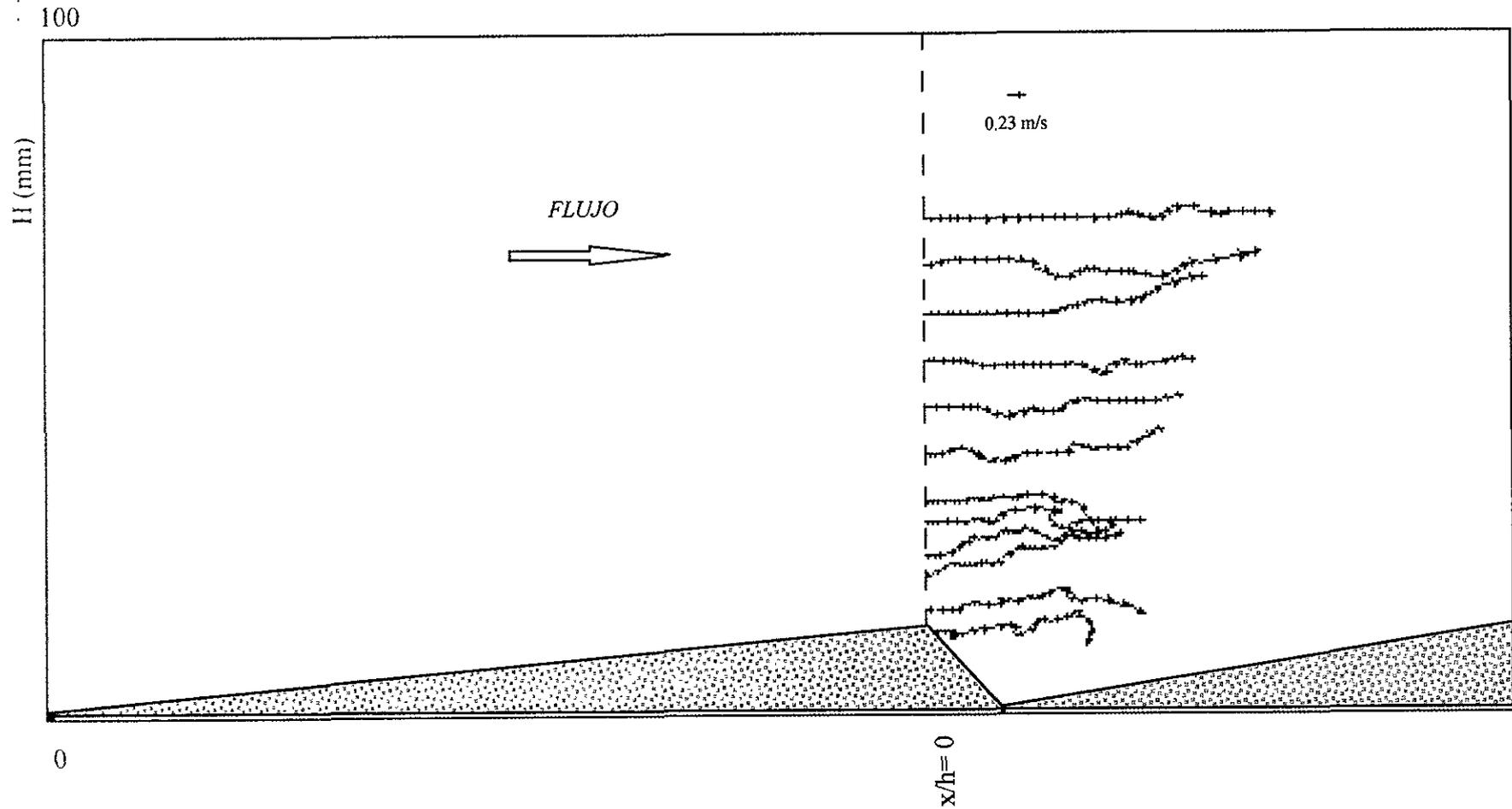


Lámina 5.26b). Perfiles de velocidad instantáneos medidos con la técnica de generación de burbujas de hidrógeno en la sección  $x/h=0$  en otro intervalo  $\Delta t$  de la secuencia de eventos registrados para  $H=0.08\text{m}$  y  $Re=18,400$

En la lámina 5.26d), se observó un campo de velocidad más complejo, con ondulaciones debidas al cambio en la dirección de los vectores velocidad, esto se observó en toda la región. En esta se puede decir que hay un colapso del vórtice ojo, lo que produce una tendencia del flujo a subir hacia la superficie.

En la lámina 5.26e). Aún se observó un comportamiento bastante complejo que hace pensar en el rompimiento de una estructura o vórtice por los cambios de dirección en los vectores velocidad, en la cuarta línea a partir de la pared. La estructura en forma de vórtice ojo se cierra nuevamente. Se observan fuertes interacciones entre el flujo medio y el flujo cerca del fondo. En esta lámina es interesante notar una sobre-elevación en los vectores de la línea 4 (a partir del fondo) enseguida cambia de dirección y los vectores velocidad cierran la región de recirculación. En las visualizaciones con tinta también se observaron estas sobre-elevaciones.

En la lámina 5.26f), se notan nuevamente las interacciones del flujo a diferentes distancias de la pared, los cambios de dirección presentando estructuras en forma de onda. El movimiento en la parte inferior del flujo  $0 < y/H < 0.5$  la dirección de las velocidades, en un gran porcentaje de área, es hacia el fondo, pero no es posible saber si se cierra la burbuja de recirculación.

En las láminas 5.27 a)-f), se presenta la secuencia de campos de velocidad para el caso en que el hilo se colocó en la sección  $x/h = 1$ , en el punto más bajo de la forma.

En la lámina 5.27a). Se observa claramente que cerca del fondo se cierra la estructura en forma de vórtice ojo, con otro vórtice concéntrico dentro de él. En la parte superior del campo de velocidades, los vectores muestran un comportamiento con trayectorias casi horizontales y el campo de flujo es en general bastante estable.

En la lámina 5.27b). El comportamiento es más complejo, se observa como si la estructura hubiera colapsado, y los vectores velocidad se separan de la pared. Cabe

mencionar que en la línea 4 a partir del fondo se observó un abrupto levantamiento, lo que hace pensar en una fuerte oscilación de la capa cortante la cual esta relacionada con la separación o colapso de la estructura en forma de ojo. No obstante, cerca de la pared se observó una pequeña circulación. En la parte superior del campo de flujo las distribuciones de velocidad son aún casi horizontales.

Lámina 5.27c). Se observa que nuevamente se formó el vórtice ojo. En el campo de velocidades en la parte inferior del flujo, las velocidades se hacen casi horizontales, en la parte superior se presenta una convergencia de vectores; se puede decir que en esta región el flujo esta afectado por las inestabilidades observadas en el campo de velocidades anterior (las cuales se observaron en la parte inferior) que se propagaron hacia la superficie libre.

Lámina 5.27d). En la parte superior, las distribuciones de velocidad son casi horizontales, en la región central se observa flujo hacia la pared. En la región más próxima a la cresta los vectores son casi horizontales pero con una pequeña inclinación hacia la pared. Sin embargo la tercera línea de vectores muestra un fuerte cambio en la dirección de las velocidades hacia la pared, pero que no llega hasta ella sino que sube abruptamente y luego se hace horizontal, esto es semejante a lo que ocurrió cuando se visualizó con tinta. Solo la primera línea de vectores se pega a la pared y siguen el contorno de la forma.

Lámina 5.27e). Los vectores velocidad de la línea 4 (a partir del fondo), se observa claramente el fuerte cambio de velocidades hacia el fondo; en ésta aparece el punto de cierre corrido aguas abajo, como si la estructura que colapsó anteriormente lo hubiera arrastrado. En todo el campo de velocidades se muestran inestabilidades, como puede observarse por los cambios de signo de los vectores velocidad. Una observación importante es que en esta lámina los vectores velocidad llegan hasta la superficie de la forma de fondo siguiente y de ahí se observa una dirección ascendente de los vectores. No obstante que la línea cuatro por ejemplo muestra una

fuerte tendencia hacia la pared, cruza las líneas 1,2 y 3 del campo de velocidad, llega hasta la pared y luego continua siguiendo el contorno de la pared y cambia su dirección hacia arriba. El campo de flujo cerca de la forma es bastante complejo, pero en general sus direcciones son hacia el fondo. En este campo no se observaron velocidades horizontales negativas ni circulación de flujo.

En la lámina 5.27f). Las direcciones de los vectores en el campo de velocidades tienen una cierta tendencia, hacia la pared. En las dos primeras líneas de vectores ya se observó una región más definida de recirculación, y direcciones de velocidad negativas dentro de la burbuja de recirculación.

**En las láminas 5.28a)-d). Se presentan los campos de velocidad cuando se colocó el hilo en la sección  $x/h = 2.5$**

En la lámina 5.28a). Se observó cerca del fondo la existencia de flujo inverso, con vectores velocidad negativos, y aparece la zona de recirculación cerrada casi en la sección  $x/h = 2.5$ . En la parte superior del flujo las distribuciones mostraron direcciones hacia la superficie del agua. En las tres líneas de vectores ubicadas a la altura de la cresta, se observa flujo desacelerado, por las magnitudes de los vectores.

En la lámina 5.28b). Los vectores velocidad en las dos primeras líneas a partir del fondo, muestran un cierre de la burbuja de recirculación, sin embargo la tercera línea muestra un comportamiento hacia la superficie libre. Por otro lado, las perturbaciones observadas en el campo de velocidad anterior se desplazaron hacia la región intermedia.

En la lámina 5.28c). En las líneas 2 y 3 los vectores presentan fuertes cambios de dirección, hacia la pared y hacia fuera, dando la apariencia de una onda y se presenta un corrimiento del punto de cierre de la burbuja de circulación.

Lámina 5.28d). Cerca del fondo los vectores inicialmente son negativos y posteriormente se vuelven positivos, en dirección de la corriente, sobre la forma de fondo y en dirección hacia la superficie, al igual que en la lámina 5.28c), parece como si la burbuja de circulación no se ha cerrado. En las líneas 4,5 y 6 se observa que las perturbaciones de la región de la pared se propagan hacia la región intermedia. En la parte superior las distribuciones de velocidad son casi horizontales.

En la lámina 5.29, se presenta el campo de velocidad instantáneo cuando se colocó el hilo en la sección  $x/h=6.35$ . En esta lámina se puede observar una distribución de velocidades más uniforme, no obstante en la primera línea de vectores, hay cambios de dirección en las velocidades y enseguida, los vectores se alinean con el contorno de la forma.

En 1985 Müller describió eventos relativamente raros, los boils que alcanzaron a llegar hasta la superficie libre. Según las observaciones de Müller, estos iniciaron con un movimiento del flujo hacia atrás, debido a una fuerte y rebuscada estructura. Luego la capa cortante se levanta hacia arriba, y el fluido de la zona de recirculación es transportado hacia la superficie. En la lámina 5.30 se presenta una famosa fotografía tomada por Müller. En ésta se puede observar claramente la sobre elevación de la capa cortante justamente sobre la parte más baja de la forma, lo cual concuerda con lo observado en la visualización con inyección de tinta del presente trabajo, en el que esta sobre elevación se observó sobre los vórtices verticales, (ver lámina 5.22). En

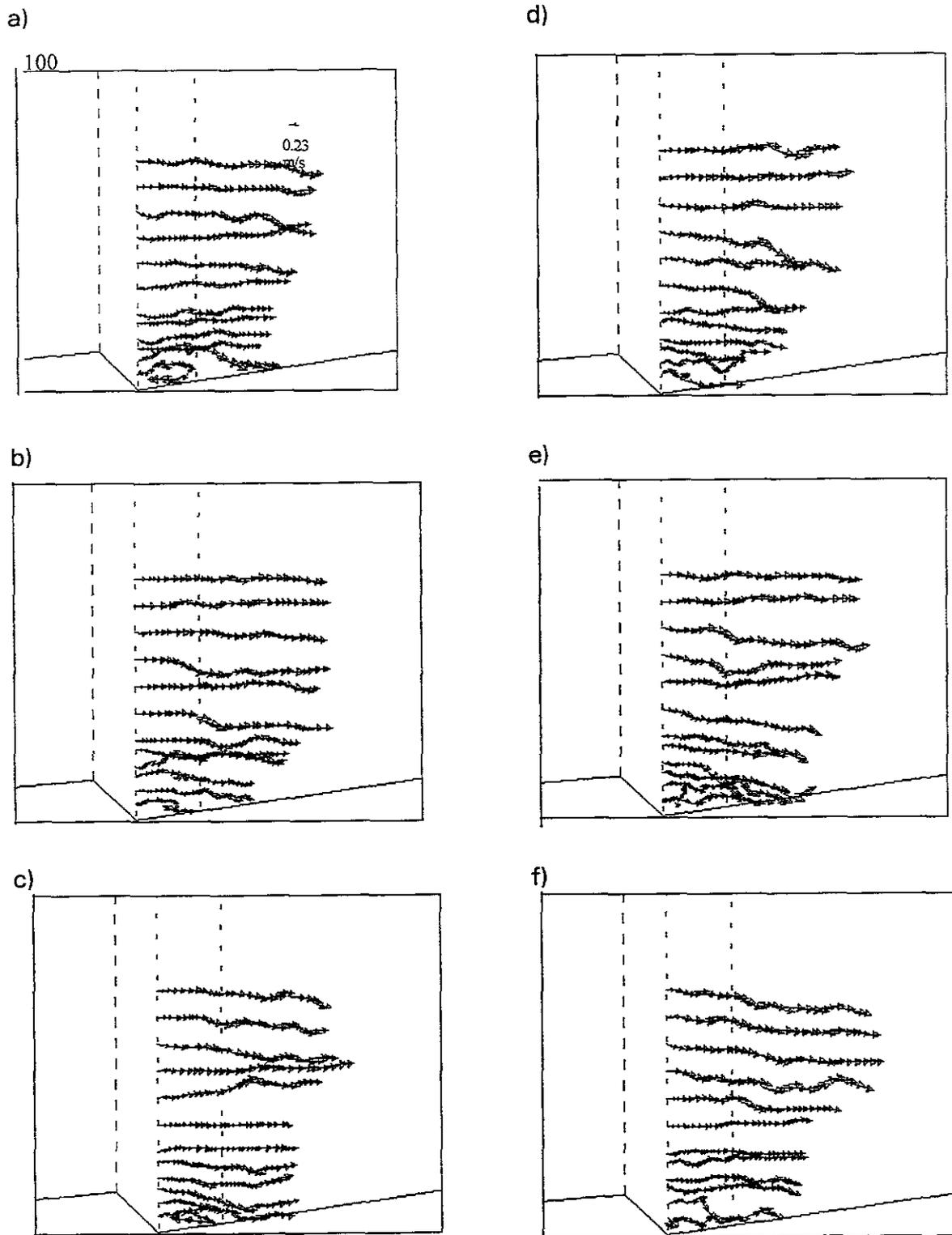


Lámina 5.27. Secuencia de distribuciones de velocidad con burbujas de hidrógeno, en la sección  $x/h = 1.0$ , para  $H = 0.08\text{m}$  y  $Re = 18,400$ .  $\Delta t$  (entre campos) =  $0.24\text{s}$ .

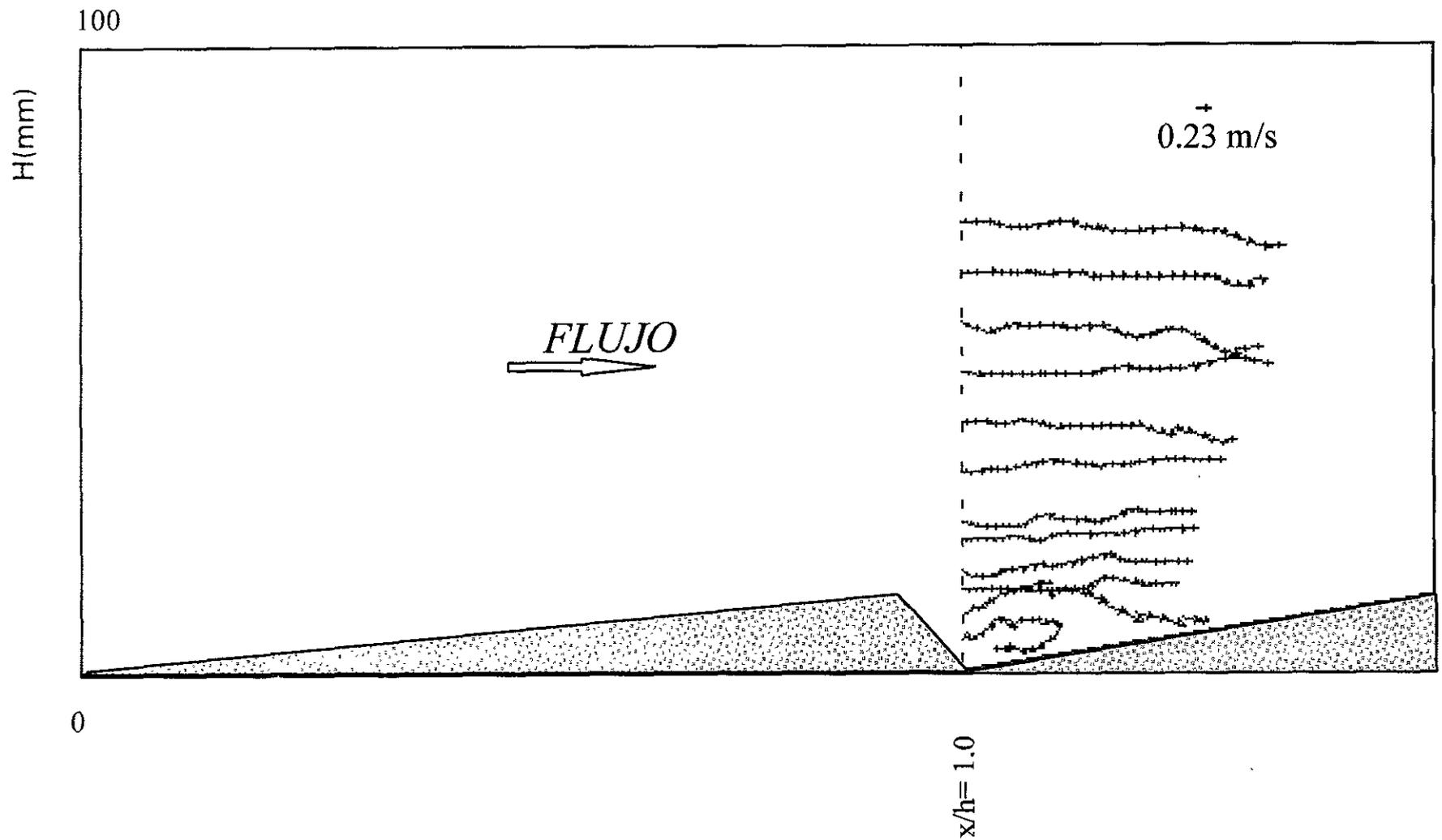
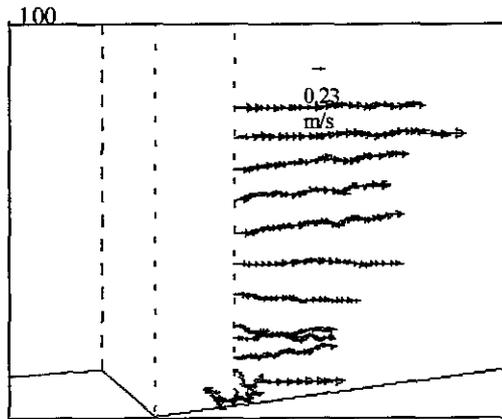
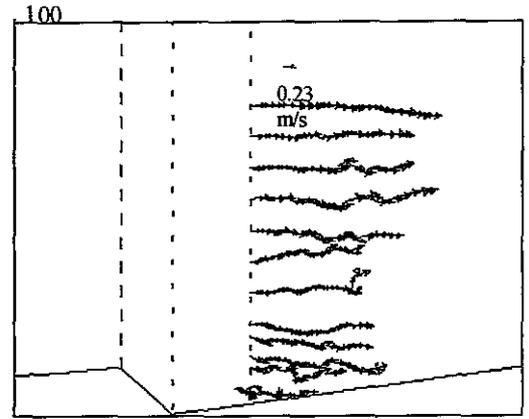


Lámina 5.27.a) Perfiles de velocidad instantáneos generados con la técnica de burbujas de hidrógeno en la sección  $x/h = 1.0$ . En ésta lámina se muestran las velocidades en la zona de recirculación para  $H = 0.08 \text{ m}$  y  $Re = 18,400$ .

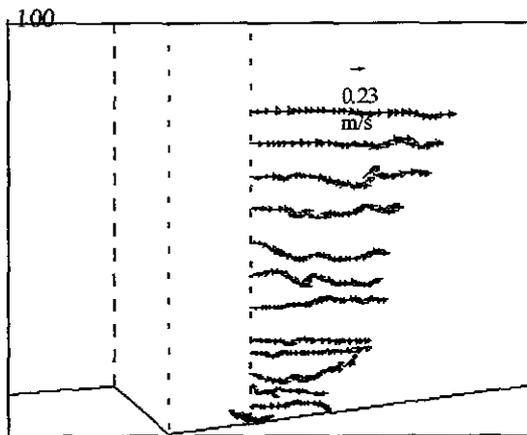
a)



c)



b)



d)

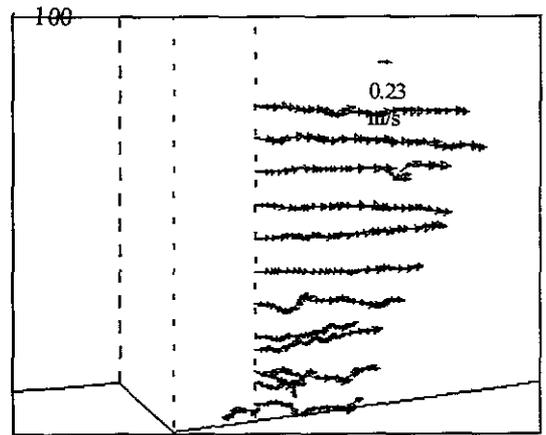


Lámina 5.28. Secuencia de distribuciones de velocidad con la técnica de burbujas de hidrógeno del presente estudio en la sección  $x/h = 2.5$ , para  $H = 0.08\text{m}$  y  $Re = 18,400$ .  $\Delta t(\text{entre campos}) = 0.24\text{s}$ .

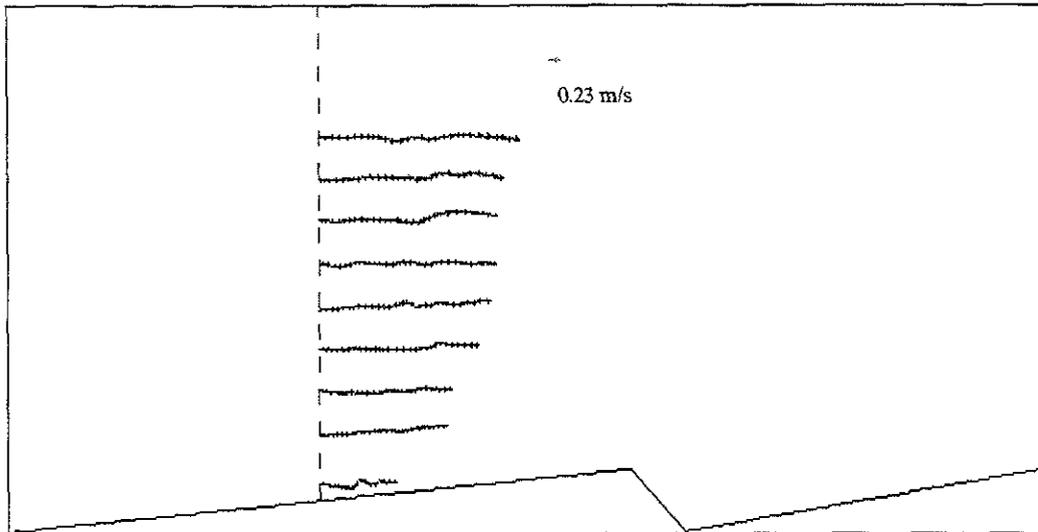


Lámina 5.29. Secuencia de distribuciones de velocidad con la técnica de burbujas de hidrógeno en la sección  $x/h=6.25$ , para  $H=0.08\text{m}$  y  $Re=18,400$ .

los perfiles instantáneos logrados con la técnica de generación de burbujas de hidrógeno, también se observaron sobre-elevaciones en las trayectorias de los vectores en la línea 4 de vectores cerca del fondo, como se puede apreciar en las láminas 5.26e) y 5.27b).

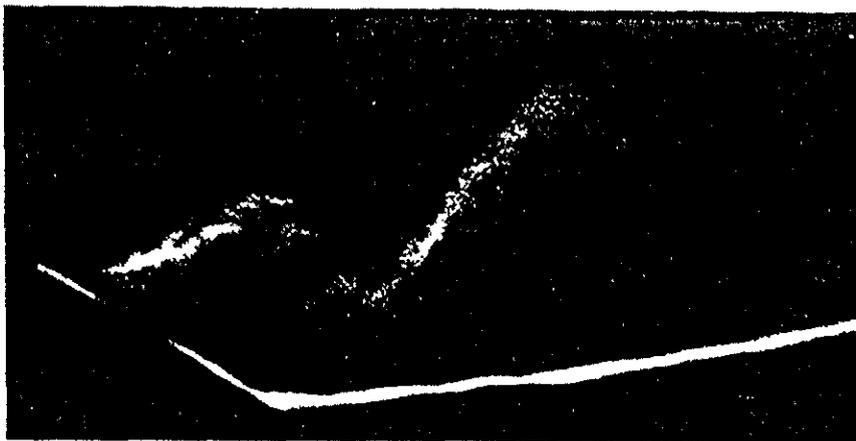


Lámina 5.30. Fotografía de un boil, formado fuera de la región de mezclado y que alcanza la superficie libre, Müller,(1986)

De acuerdo con las observaciones, cuando el vórtice ojo esta cerrado, los perfiles de velocidad son cercanos a la horizontal y son más estables. En las mediciones realizadas por Müller, elaboró una secuencia de perfiles de tinta en proyección en el tiempo. (Müller inyectó tinta en la cresta para diferenciar la zona de recirculación de la zona de corriente libre), en la sección  $x/h = 2$ ,  $y=0$ , cercana a la cresta de la duna, como se muestra en la lámina 5.31. En esta se pueden apreciar un ciclo completo entre dos estados en los que la línea de tinta es casi horizontal, iniciando en el tiempo 123.55 s y cerrando el ciclo en el tiempo 124.77 s. En el tiempo restante los perfiles de tinta muestran fuertes inestabilidades. Estos perfiles de tinta presentados en perspectiva a través del tiempo, son muy semejantes a los observados en la visualizaciones de tinta de la presente investigación, y en las secuencias de campos de velocidad instantáneos, las trayectorias de las burbuja confirman la evolución temporal de las configuraciones observadas.

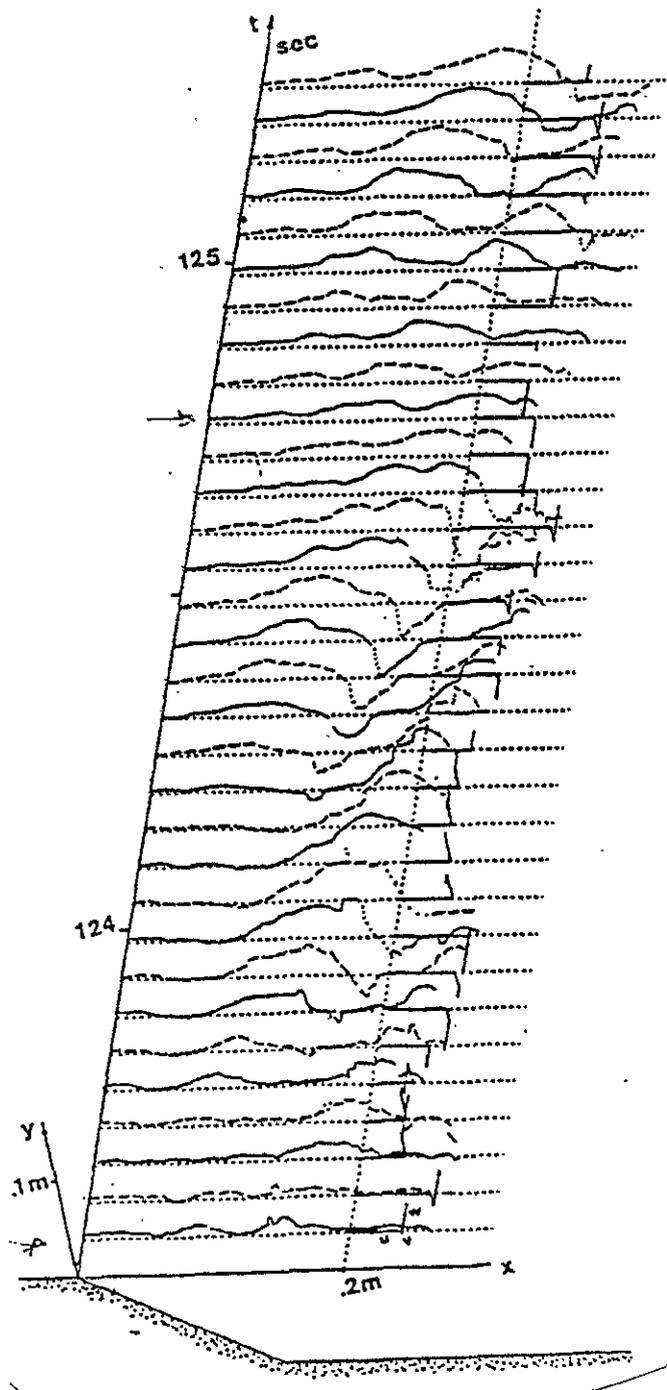


Lámina 5.31. Desarrollo a través del tiempo de la línea marcada con tinta entre la región de recirculación de flujo y la corriente principal, Müller y Gyr, 1986. Las flechas indican el tiempo en el que la línea es casi horizontal. En la presente investigación se observó este comportamiento corresponde al tiempo en el que el vórtice ojo se cierra completamente.

En la lámina 5.32 se presentan las trayectorias obtenidas con burbujas de hidrógeno por Utami y Ueno(1987) para el caso de flujo en un canal con fondo liso. En esta lámina las regiones de flujo acelerado se encierran en círculos. En estas regiones se juntan dos o más líneas y que se corren hacia atrás debido a desaceleración local del flujo. En esta lámina se observa que aún cuando el fondo sea liso se presentan

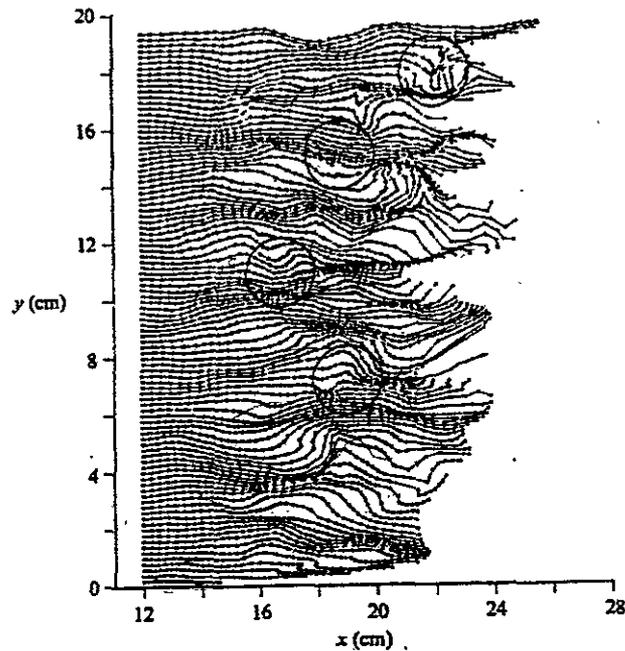


Lámina 5.32. Estrías obtenidas con la técnica de burbujas de hidrógeno, para el flujo en un canal con fondo plano. Utami y Ueno (1987)

perturbaciones en el flujo y que estas se transmiten hacia la superficie libre.

- Distribuciones de velocidad medias temporales, a partir de los campos de velocidad instantáneos.

Para obtener los perfiles medios temporales se realizaron promedios de una secuencia de 5 perfiles instantáneos correspondientes en el tiempo, el  $\Delta t$  fue de 0.24 s. Los promedios se hicieron en 140 perfiles instantáneos. En la lámina 5.33 se muestran los

perfiles medios para diferentes  $t$ . En este caso es muy importante aclarar que los perfiles son promedios temporales, y es importante considerar que las observaciones en cada hilo son independientes por lo que la reconstrucción del campo de velocidades sobre toda la forma no corresponde a una vista instantánea de todo el campo de flujo, sino a una distribución de perfiles de velocidad medios obtenidos por el seguimiento de las burbujas (consideración lagrangiana), y como una aproximación por el uso de los promedios temporales.

En la lámina 5.33. Se presenta la reconstrucción del campo de velocidades medias temporales. Se puede apreciar que la magnitud de las velocidades en la parte superior del flujo es más del doble en magnitud que las velocidades cercanas al fondo, lo que confirma los resultados obtenidos con la técnica de anemometría de película caliente. En estas distribuciones medias temporales los vectores cerca de la cresta mostraron un comportamiento casi horizontal, y después cambiaron de dirección hacia la pared. Aproximadamente a la mitad de la pendiente descendente de la forma, los vectores de velocidad se inclinaron hacia la pared, formando una onda con su cresta o punto más alto sobre la región de mayor profundidad. Esto concordó muy bien con lo observado en la visualización por inyección de tinta lo cual se relacionó con la presencia de los vórtices verticales. Enseguida, a una distancia de  $2h$  medida a partir de la cresta, el vector velocidad cambia de nuevo su dirección hacia abajo. Las ondulaciones observadas detrás de la cresta, se observaron tanto en las distribuciones de velocidad, como en la visualización con tinta. Estas perturbaciones, se propagan hacia arriba, a través del tirante hasta una región de  $y/H=0.8$ . La región de mayor inestabilidad quedó comprendida entre  $x/h=0$  y  $x/h=5$  y  $y/H = -0.1$  y  $y/H = 0.3$ . En este campo

de velocidades reconstruido, es interesante notar que aunque las secuencias son promedios temporales para cada hilo, se observa que los vectores velocidad se traslapan y en general las direcciones siguen un comportamiento semejante. En este campo de velocidades reconstruido con los promedios instantáneos en cada tiempo, se muestra como era de esperar un comportamiento más estable con menos perturbaciones. Para el caso de estudio de las estructuras coherentes, se obtuvo más información a partir de las velocidades instantáneas, con estas es posible detectar la dinámica de las estructuras.

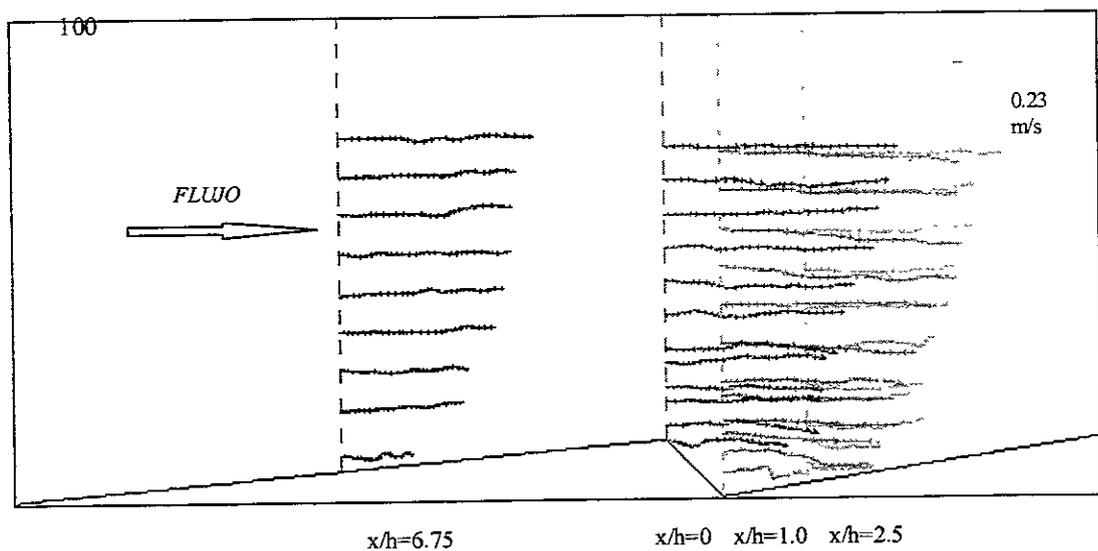


Lámina 5.33. Campos de velocidades obtenidos de lo promedios temporales de velocidad instantánea, técnica de burbujas de hidrógeno, para  $H=0.08\text{m}$ ,  $Re=18,400$ .

### 5.5. Visualización de las Trayectorias de las Partículas.

No hay duda que las estructuras vorticosas formadas en la vecindad de las formas de fondo juegan un papel muy importante en las configuraciones del flujo y de las propias

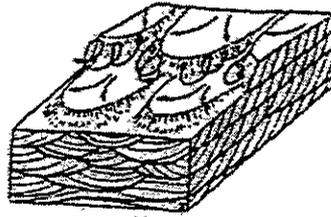
formas de fondo. Ikeda y Asaeda (1983) observaron que cuando se tiene una configuración de formas de fondo de rizos, el sedimento entra en suspensión sobre todo en el lado aguas debajo de la cresta (lee) debido a la acción vorticiosa. Aunque se ha reconocido que los sedimentos son levantados por las complejas interacciones vorticosas, hasta hace muy poco se no se había intentado relacionar la estructura del flujo con el transporte de sedimentos.

Los patrones de flujo sobre las formas de fondo son muy complejos, como ya se vió en los estudios de visualización en la presente investigación. Allen (1968) presentó un ejemplo típico de líneas de corriente sobre un fondo con rizos, donde se muestra la separación del flujo sobre la cresta y el cierre de la zona de separación, resultando una intensa actividad vorticiosa.

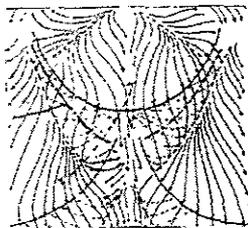
En la lámina 5.34a y b. Se presentan una vista en planta de las líneas de corriente obtenidas por Ikeda y Asaeda en 1983 y Asaeda *et al* 1989 respectivamente. Para obtener las trayectorias de la lámina estos investigadores usaron cal como trazador y la técnica de generación de burbujas de hidrógeno. En estas láminas se muestra la línea de cierre del flujo en la depresión de los rizos. Las líneas de corriente entre la línea de cierre y la orilla de la cresta, en la parte superior de la forma, siguen la pendiente lateral de la cresta. El flujo finalmente se incorpora al flujo medio. La estructura del flujo cerca de la pendiente lateral lo constituye un movimiento en espiral longitudinal el cual no cambió para el rango de experimentos que ellos efectuaron.



a)



b)



c) VISTA EN PLANTA

Lámina 5.34. Líneas de corriente vistas en planta para un rizo; a) Ikeda y Asaeda (1983), b) Asaeda *et al* (1989).

Onslow *et. al* (1993) visualizaron la región detrás de la cresta de la duna en un flujo con partículas de arena. En la lámina 5.35 se muestra una secuencia de imágenes tomadas cada 0.35s en donde se observa que la estela es barrida de la cresta mostrando restos de la burbuja de recirculación en la 3era imagen. En la lámina 5.36, se presentan eventos de suspensión de sedimentos en la pendiente descendente (lado lee), estos fueron vistos cada 0.5 a 2s. De acuerdo con las observaciones se ha propuesto que la recirculación del flujo es la que mantiene la pendiente de la duna.

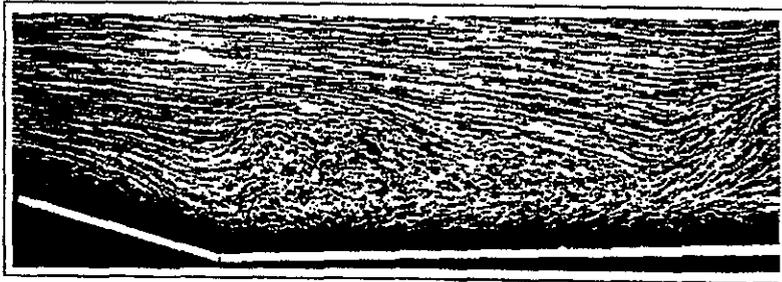
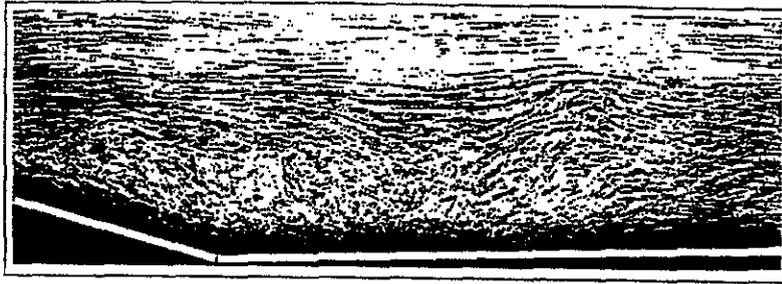
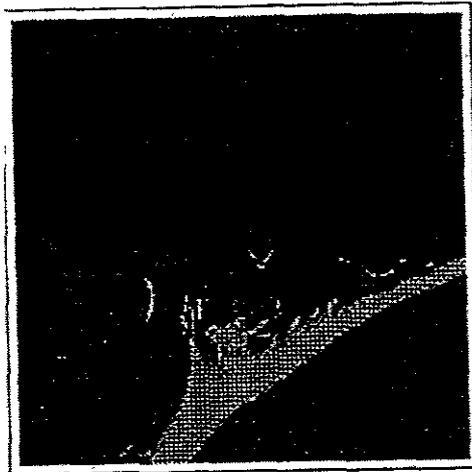


Lámina 5.35. Secuencia de fotografías de la región de recirculación en un estudio experimental con partículas de arena. Las fotografías son cada 0.35s y se observa claramente el barrido de la región turbulenta, corriéndose el punto de cierre de la región de recirculación, Onslow *et al* (1993).



B

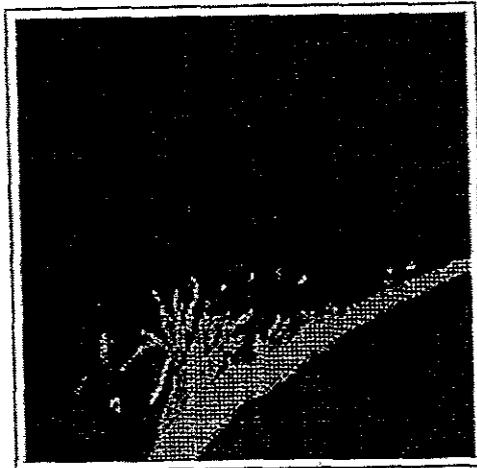


Lámina 5.36. Suspensión de arena fina por eventos turbulentos en la pendiente descendente de la forma de fondo, tomados cada 0.4s. Onslow *et al* (1993).

En el caso de estudio, se usó la técnica de visualización de burbujas de hidrógeno y la de partículas de sal para obtener las trayectorias seguidas por las partículas. En las lámina 5.37, se presenta una secuencia de imágenes del flujo con partículas de sal tomadas cada 0.033s. En la lámina 5.38, se presenta una secuencia de imágenes en las que se muestran las trayectorias de las burbujas de hidrógeno

En las láminas 5.39, 5.40, 5.41, se presentan esquemáticamente las trayectorias observadas en el caso de flujo sobre formas de fondo bidimensionales, fijas, de la presente investigación. Estas pudieron obtenerse a partir de las grabaciones de video,

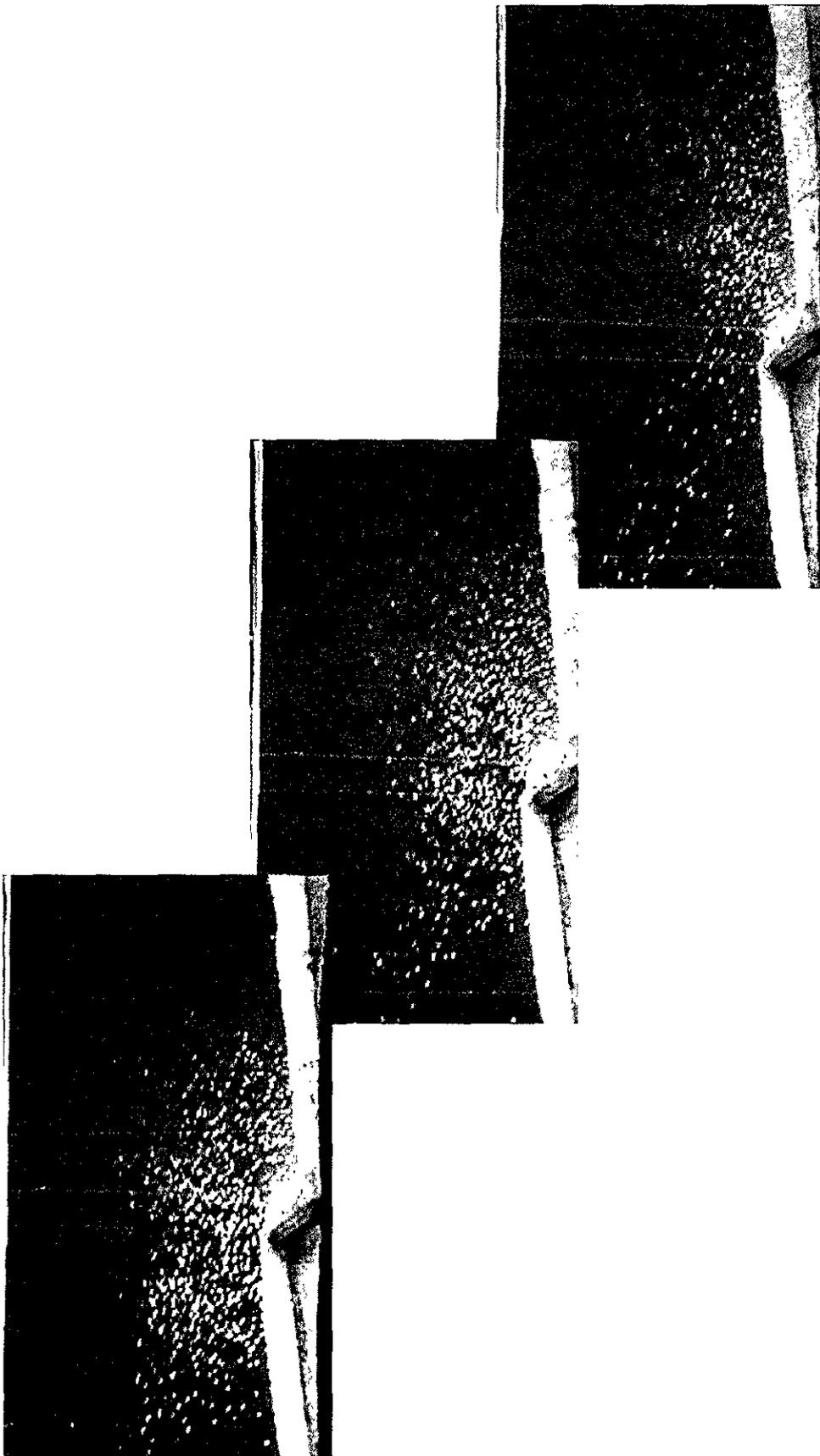


Lámina 5.37. Secuencia de fotografías que muestra el movimiento de las partículas.

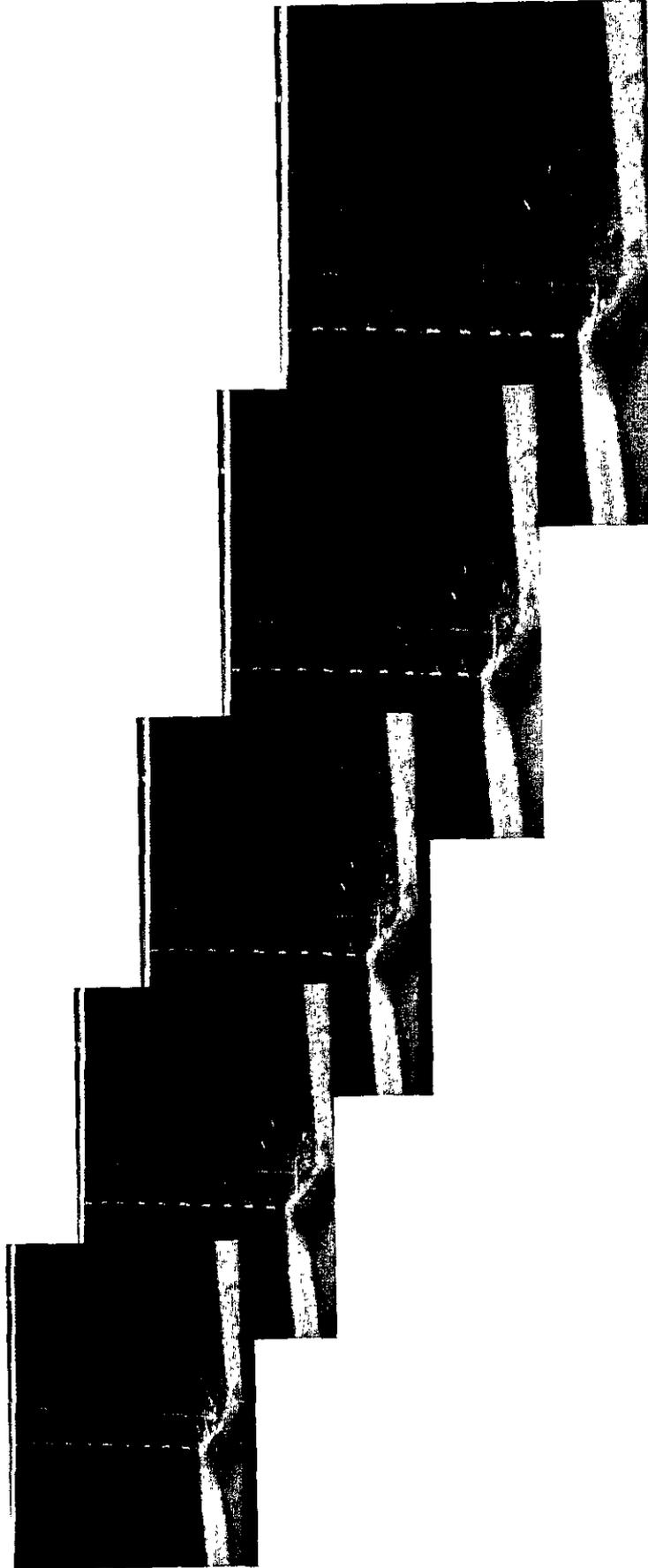


Lámina 5.38. Secuencia de imágenes con burbujas de hidrógeno que muestran el desarrollo de la estructura del flujo detrás de una duna. ( intervalo de tiempo 1/30 s)

considerando las observaciones con las técnicas de burbujas de hidrógeno y seguimiento de partículas.

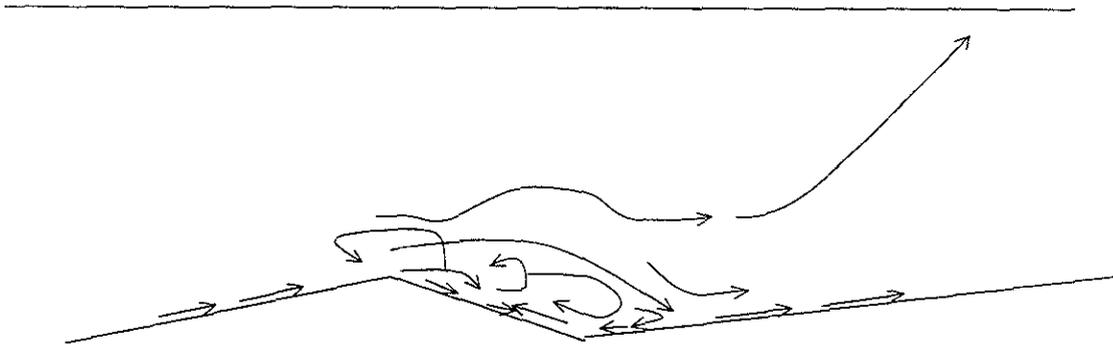


Lámina 5.39. Trayectorias de partículas observadas en video.

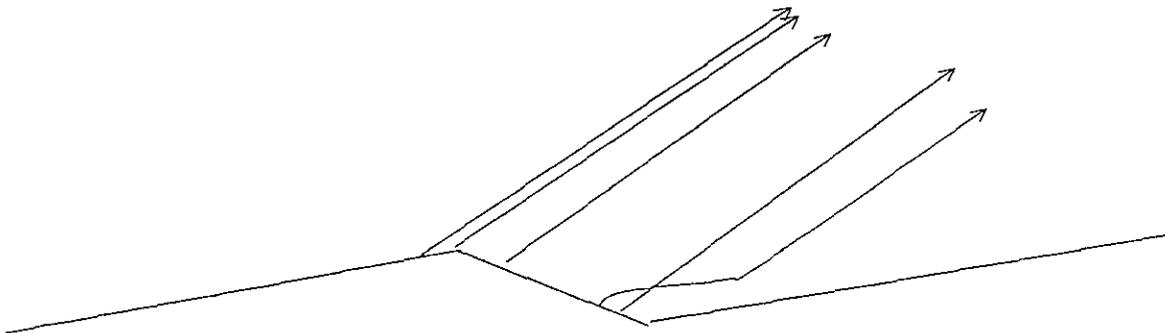


Lámina 5.40. Trayectorias de partículas que se desprenden de la pared hacia la superficie libre.

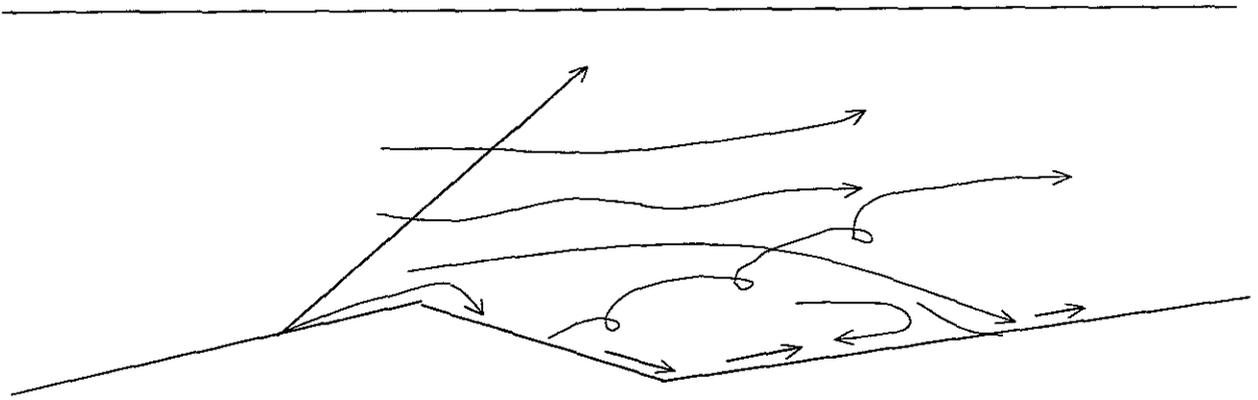


Lámina 5.41. Trayectorias de las partículas mostrando la zona de recirculación definida.

Las trayectorias de las partículas fueron consistentes con las estructuras observadas en la visualización de tinta, y con las distribuciones de perfiles de velocidad instantáneos obtenidos en la visualización de burbujas de hidrógeno, se confirmó la hipótesis de que estas estructuras son responsables del transporte de sedimento.

El movimiento de las partículas está relacionado con la estructura del flujo y la geometría de las formas, en el capítulo siguiente se hará un estudio más detallado de las configuraciones del flujo, usando conceptos de topología de flujo. Se analizará la dinámica entre los patrones observados. En el último capítulo se estudia con mayor detalle los mecanismos de transporte de sedimentos.

## 5.6. Conclusiones

Se efectuó un estudio experimental de formas de fondo artificiales con anemometría de película caliente. Las formas de fondo fueron formas triangulares con relaciones  $h/H = 0.08$  y  $h/L = 0.15$ . Los perfiles de velocidad media fueron consistentes con los presentados por McCorquodale (1973), Nelson (1993) y Best (1996). Los perfiles de déficit de velocidad se ajustaron bien en la región externa ( $y/H > 0.4$ ) en todas las secciones de medición. Los efectos de geometría de las formas se reflejaron en el cambio del coeficiente de la estela  $W_o = 0.1$ .

Los perfiles de intensidad de turbulencia adimensionalizados con  $u$ , presentan un decaimiento en la región externa. Los máximos se observaron en las secciones de la

cresta y región de recirculación en la zona del 20% cerca del fondo; a partir de ese punto mostraron una variación lineal pequeña con la distancia al fondo.

El análisis de los resultados de Lyn, Delft, McCorquodale, Nelson, Bennett y Best y los del presente estudio mostraron tendencias semejantes en los perfiles de intensidad de turbulencia y esfuerzos de Reynolds; sin embargo se observaron discrepancias en las magnitudes esto en alguna forma se debió a que los parámetros no son exactamente los mismos)

La tendencia observada en la distribución vertical de los esfuerzos de Reynolds fue la siguiente: cerca de la pared los esfuerzos de Reynolds son pequeños, después se incrementan hasta alcanzar un máximo a una cierta distancia de la pared y luego decaen hasta aproximarse a un perfil lineal. De manera semejante a las distribuciones de intensidad de turbulencia los máximos esfuerzos de Reynolds se registraron aguas abajo de la cresta en la sección  $x/h = 2.5$  en el porcentaje de elevación afectado por la cresta de la forma y sus efectos se notaron en las secciones de medición localizadas en la región de recirculación de flujo. Después se mostraron muy cercanos a cero en todo el perfil.

Del análisis de visualización de flujo se identificaron cinco tipos de estructuras coherentes asociadas con el flujo sobre formas de fondo: 1. *Ondas de Kelvin-Helmholz* generadas en la capa cortante en la cresta de la duna., 2. *Boils*, eyecciones de flujo de mayor intensidad aguas abajo de la cresta de la duna. Estos boils se sugiere que se forman de manera semejante a los burst pero son de mayor tamaño y llegan a interactuar con la superficie libre del agua. 3. *Vórtices verticales semejantes a pequeños tornados* en la línea donde se inicia la nueva forma de fondo. 4. *Vórtice tipo cono* en la dirección del flujo, 5 *vórtices tipo ojo* transversales al flujo, que cierran la zona de recirculación.

La visualización con burbujas de hidrógeno y en particular los campos de velocidad instantáneos en secuencias, permitió conocer la evolución de las estructuras en forma de vórtice ojo y como el cierre de estas estructuras, se relaciona con campos de

velocidad más uniformes y casi horizontales, esto también se observó en los perfiles reportados por Müller(1985). Cuando no se cierra el vórtice ojo, se muestra un campo de velocidades muy inestable con fuertes cambios de velocidad y que se relaciona con la transmisión de flujo de la región de la pared hacia la superficie en especial con el fenómeno denominado *boil*. Es importante hacer notar que la sobre elevación justo sobre la parte más profunda de la forma de fondo fue observado tanto en la visualización con tinta, como en los campos de velocidad instantáneos, se relacionó con los *vórtices verticales en forma de tornado*.

Se logró identificar casi tridimensionalmente los patrones típicos de flujo, su relación con el movimiento de las partículas y las trayectorias de estas.

## 6. TOPOLOGÍA DEL FLUJO SOBRE FORMAS DE FONDO FIJAS Y DINÁMICA DEL SISTEMA

### 6.1 *Introducción*

La visualización de flujo provee los medios más eficientes para detectar estructuras coherentes; si se inyecta un trazador se pueden obtener los detalles de puntos con mayor concentración de tinta en el plano seleccionado (generalmente, se elige el plano de mayor cortante) para examinarse posteriormente. En un campo de referencia moviéndose con la velocidad de convección apropiada, los patrones de flujo tienden a ser muy organizados y se pueden obtener ciclos completos de la vida de las estructuras marcadas por el trazador. En particular en este campo de referencia, las líneas de corriente, estrías y trayectorias de partículas exhiben puntos críticos, o puntos donde la velocidad es cero y la pendiente de la línea de corriente es indeterminada. Topológicamente los puntos críticos definen la forma de una función, de ahí su importancia, consecuentemente los puntos críticos son las características más importantes de un patrón de flujo, dada una distribución de tales puntos, y su tipo, se puede deducir todo el campo de flujo, su geometría y su topología obteniendo de esa manera una descripción física más precisa del flujo. No obstante que el campo de flujo sea transitorio, los patrones instantáneos de las líneas de corriente dan una idea de las propiedades de un cierto orden de los vórtices en chorros, estelas o flujos más complicados como los de separación tridimensional.

Se requiere de una comprensión detallada de la física de la turbulencia en términos de la dinámica de las estructuras coherentes, de los varios tipos de estructuras coherentes, su generación e interacciones, los detalles topológicos de las estructuras en sus fases de evolución.

## 6.2 Antecedentes

### 6.2.1 Clasificación de puntos críticos

La teoría de puntos críticos, también conocida como teoría del espacio-fase, se usa para examinar soluciones de sistemas de ecuaciones diferenciales. Si se consideran las ecuaciones de Navier-Stokes y de continuidad en forma de tensor cartesiano para flujo incompresible de densidad uniforme:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (6.1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (6.2)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del fluido,  $p$  es la presión, y  $\nu$  es la viscosidad cinemática. Se supone que las soluciones de las ecuaciones de Navier-Stokes para un flujo de densidad uniforme e incompresible son regulares en todos los puntos. Si se escoge un punto arbitrario  $O$  en el campo de flujo y se expande la velocidad  $u_i$ , en series de Taylor en términos de coordenadas espaciales  $x_j$ , con el origen de  $x_j$  localizado en  $O$  resulta:

$$u_i = \dot{x}_i = A_i + A_{ij}x_j + A_{ijk}x_jx_k + A_{ijkl}x_jx_kx_l + \dots \quad (6.3)$$

Los coeficientes  $A_i$ ,  $A_{ij}$ , etc., son funciones del tiempo si el flujo es transitorio, y son tensores simétricos en todos los índices excepto en el primero. Si  $O$  se localiza en un punto crítico, como la pendiente de una línea de corriente es indeterminada, entonces:

$$\frac{u_i}{u_j} = \frac{0}{0} \quad \text{para } i \neq j \quad (6.4)$$

Esto significa que los términos de orden cero de  $A_i$  son igual a cero. Hay dos tipos de puntos críticos que se consideran. El primero es el llamado de no deslizamiento tal como un punto de separación en una frontera que no se desliza. La condición de no-deslizamiento significa que  $A_{ij} = 0$  y  $A_{ijk}$  es finita si  $j=3$  o  $k=3$ , pero igual a cero para todos los demás casos, dado que  $x_3$  es el espacio coordenado normal a la frontera no deslizable. Esto permite truncar (6.3) después de los términos de segundo orden y sustituyendo en (6.1) y (6.2) obtener relaciones entre los coeficientes  $A_{i3k}$  y  $A_{ij3}$ . Esta expansión truncada es una solución asintóticamente exacta de (6.1) y (6.2) alrededor del punto 0.

El segundo tipo de puntos críticos es el llamado de deslizamiento libre (Horhung y Perry 1984), ocurre dentro del fluido lejos de las fronteras fijas por ejemplo, en burbujas de separación, en chorros y estelas. Este tipo de puntos fue considerado inicialmente por Perry y Farlie (1974). El coeficiente  $A_i$  es otra vez cero pero  $A_{ij}$  es finito. Se puede obtener una solución local asintóticamente exacta de (6.1) y (6.2) con términos de orden superior al 3er orden. Los términos de orden mayor, que introducen en las soluciones los efectos de viscosidad, tienen influencia en las relaciones entre los coeficientes de primer orden de  $A_{ij}$ . En general, este procedimiento es válido solo para ecuaciones de Euler o flujos donde la vorticidad es uniforme espacialmente, y esto incluye flujo irrotacional.

Para entender la geometría y topología del flujo inmediatamente alrededor de los puntos críticos, los patrones tridimensionales de líneas de corriente o *trayectorias solución*, se obtienen integrando el campo de velocidades; sólo se requieren los términos de menor orden. Por lo tanto, el campo de velocidad de la condición punto crítico sin deslizamiento puede expresarse de la forma:

$$\frac{u_i}{x_\gamma} = B_{i\alpha} x_\alpha \quad (6.5)$$

Donde  $B_{i\alpha}$  se relaciona linealmente a  $A_{i3k}$  y  $A_{ij3}$ . Para el límite  $x_3 \rightarrow 0$ , se obtienen las líneas de corriente límite o superficies de esfuerzos cortantes que pueden expresarse como:

$$\frac{\partial x_i}{\partial \tau} = B_{i\alpha} x_\alpha \quad (6.6)$$

Donde la  $d\tau = x_3 dt$ , y  $t$  es el tiempo real. Para puntos críticos con deslizamiento, se tiene:

$$u_i = \frac{\partial x_i}{\partial t} = A_{i\alpha} x_\alpha \quad (6.7)$$

Para flujo transitorio los elementos  $B_{i\alpha}$  y  $A_{i\alpha}$  son funciones del tiempo, y puesto que  $u_i$  es una velocidad instantánea, las trayectorias solución son líneas de corriente instantáneas.

La clasificación y propiedades de todos los patrones posibles de flujo se obtienen examinando los elementos de la matriz de 3x3 elementos representada por  $A_{i\alpha}$  o  $B_{i\alpha}$ . Estos elementos pueden relacionarse con propiedades locales del flujo tales como gradientes de presión, de vorticidad, coeficientes de esfuerzo, etc. Las propiedades importantes de estas matrices son los eigenvalores y eigenvectores. Si los eigenvalores son reales y los eigenvectores son reales, se pueden definir tres planos referidos como planos eigenvectores. Estos planos no son necesariamente ortogonales entre sí, en general son planos que contienen trayectorias solución. Si los eigenvalores y eigenvectores son complejos, existirá solo un plano que contenga trayectorias solución. En estos planos, se usan los métodos simples como el plano-fase para clasificar patrones de puntos críticos. Si se define un sistema coordenado nuevo cada plano

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} \quad \text{o} \quad \dot{y} = Fy \quad (6.8)$$

Aquí el punto arriba de la  $y$  denota diferenciación con respecto a  $\tau$  en el caso de puntos críticos fijos, o  $t$  en el caso de puntos críticos de libre deslizamiento. Las cantidades importantes son:

$$p = - (a + d) = -\text{traza } F \tag{6.9}$$

$$q = (ad - bc) = \det F$$

La clasificación de puntos críticos se presenta en forma gráfica con ejes  $p$ - $q$  en la lámina 6.1 tomada de Perry y Chong (1987). En ella, dependiendo de los valores que tome  $p$  y  $q$  se tendrán configuraciones de nodos, focos o sillas.

### 6.2.2 Estabilidad estructural.

Si un punto crítico se encuentra infinitesimalmente cercano al eje  $p$  (ver lámina 6.1) en el plano  $p$ - $q$ , por un pequeño cambio en cualquiera de los parámetros relevantes este podrá cambiarse de silla a nodo o viceversa. Cuando ha ocurrido un cambio de topología, ningún estiramiento puede restaurar la topología original. Lo mismo ocurre para puntos infinitesimalmente cercanos a la parte positiva del eje  $q$ . Aquí el foco en espiral hacia adentro puede cambiar a foco en espiral hacia fuera por un cambio en algún parámetro.

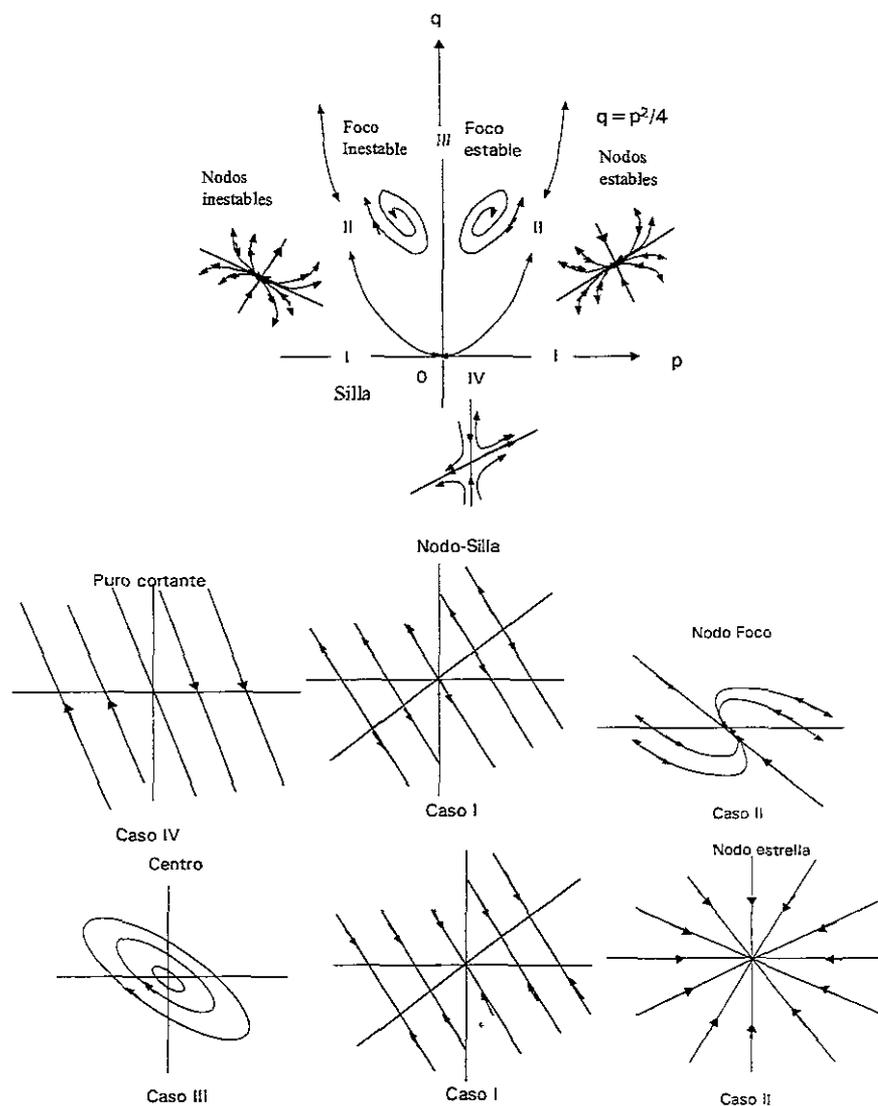


Lámina 6.1. Clasificación de puntos críticos. a) en un plano  $p$ - $q$ . b) Puntos críticos en los límites I,II,III y en el origen, IV. (Perry y Chong, 1987).

Tales puntos se dice que son estructuralmente inestables. Todos los puntos críticos degenerados (puntos en cualquiera de los límites de la carta  $p$ - $q$ ) o conexiones silla-silla son raros, en la práctica, solo ocurren en un instante durante procesos de bifurcaciones.

Los cambios en la topología del flujo van unidos a fuertes cambios en las propiedades de transporte del flujo, las cuales están ligadas con pequeños cambios en alguno de los parámetros relevantes.

### 6.2.3 Topologías - casos típicos.

Los puntos singulares, se presentan solos o en combinación, cumpliendo con las funciones características que determinan en gran medida la distribución de líneas de fricción sobre la superficie. Un punto nodal de unión (attachment), es un punto estacionario sobre una cara del frente de la superficie tal como la nariz de un cuerpo, donde el flujo externo de aguas arriba alcanza la superficie. El punto nodal de unión actúa como una fuente de líneas de fricción superficial. En sentido opuesto un punto nodal de separación se localiza típicamente en la parte posterior de la superficie y actúa como un sumidero donde las líneas de fricción que han circunscrito el cuerpo pueden desaparecer. El punto silla comúnmente actúa para separar las líneas de fricción de nodos adyacentes, por ejemplo, de nodos de unión adyacentes, ver lámina 6.2, Lighthill (1963) llamó a una línea particular línea de separación y definió la existencia de un punto silla del cual la línea emerge como una condición necesaria para la separación del flujo. En la lámina 6.3 se muestran algunos casos típicos de flujo y su topología, (Antonia 1988). En estos casos, C denota los nodos o centros y S los puntos silla. Los puntos C se identifican en la visualización de flujo como áreas con mayor concentración de tinta. En ellos se espera que se tenga un máximo de vorticidad local. Los puntos silla se presentan en la intersección de separatrices convergentes o divergentes en este caso se usan líneas punteadas para las separatrices convergentes y líneas continuas para las separatrices divergentes. Estas líneas se presentan a  $\pm 45^\circ$  de la dirección del flujo principal. Las separatrices divergentes caen en la dirección del esfuerzo (Tobak y Peake, 1982). En esta dirección ocurren cambios repentinos de velocidad o temperatura.

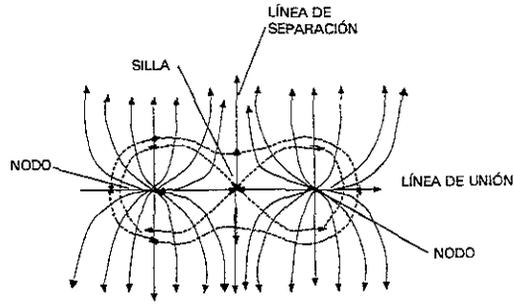


Lámina 6.2. Nodos adyacentes y punto silla, Lighthill (1963).

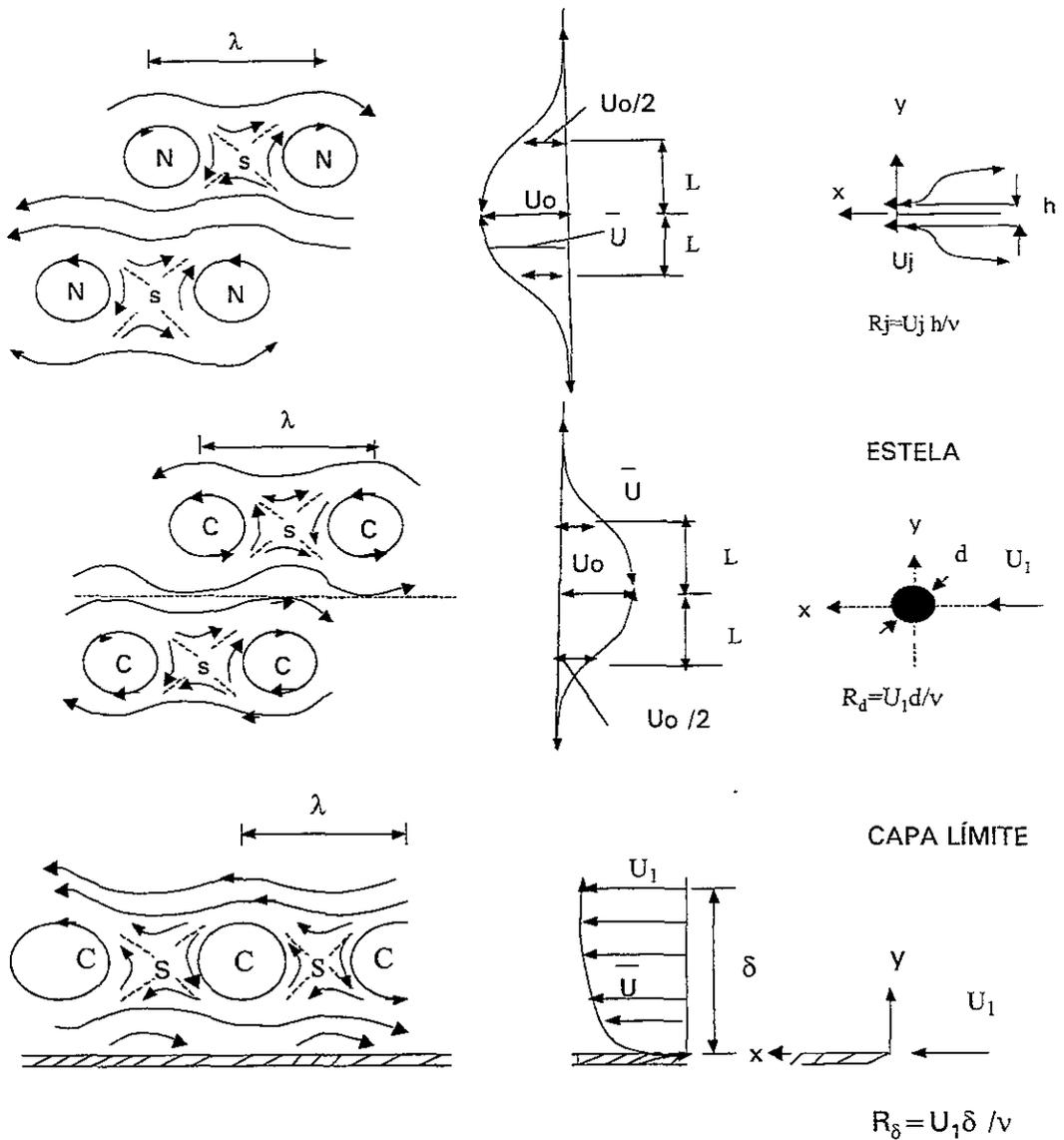


Lámina 6.3. Topologías de flujos típicos para el plano de mayor cortante, Nodos N, sillan S. (Antonia, 1988)

#### 6.2.4 Bifurcaciones, simetría, rompimientos.

Sattinger, *et al.* (1980), suponen que los movimientos del fluido evolucionan de acuerdo a las ecuaciones dependientes del tiempo que se pueden escribir en forma general como:

$$u_t = G(u, \lambda) \quad (6.10)$$

donde  $\lambda$  es un parámetro. Las soluciones de  $G(u, \lambda) = 0$ , representan flujos medios estables. Un flujo medio  $U_0$  es asintóticamente estable si las pequeñas perturbaciones decaen cuando  $t \rightarrow \infty$ . Si se varía  $\lambda$ , el flujo medio puede persistir (en sentido matemático persiste la solución  $G(u, \lambda) = 0$ ) pero se hace inestable a pequeñas perturbaciones conforme  $\lambda$  cruza un valor crítico. En tal punto de transición, se bifurca en un nuevo flujo medio a partir del primero. El comportamiento descrito se puede representar esquemáticamente por medio de un diagrama de bifurcación como el de la lámina 6.4. El flujo que se bifurca de un flujo conocido se representa por la ordenada  $\psi$  que puede ser cualquier parámetro que caracterice el flujo de bifurcación. En la lámina 6.4 los flujos estables se representan por líneas continuas y el flujo inestable por líneas punteadas. El flujo se hace inestable para  $\lambda > \lambda_c$  nuevos flujos medios se bifurcan de  $\lambda = \lambda_c$  tanto subcríticamente como supercríticamente. La bifurcación supercrítica conforme el parámetro  $\lambda$  se incrementa más allá de  $\lambda_c$ , el flujo de bifurcación que reemplaza al flujo inestable conocido puede diferir sólo infinitesimalmente de él. La bifurcación rompe la simetría del flujo conocido, adoptando una forma de menor simetría en la que las estructuras disipativas que aparecen absorben el exceso de energía disponible. Debido a que la bifurcación del flujo inicialmente se diferencia solo infinitesimalmente del flujo inestable conocido, la estabilidad estructural de la superficie inicial de esfuerzos cortantes no se afecta. Sin embargo, conforme  $\lambda$  continúa incrementándose más que  $\lambda_c$ , la bifurcación se diferencia más

significativamente del flujo inestable conocido y empieza a afectar la estabilidad estructural de la superficie de esfuerzos cortantes, y se hace estructuralmente inestable; esto se evidencia porque uno de los puntos singulares de la fase principal se transforma en un punto singular de múltiple

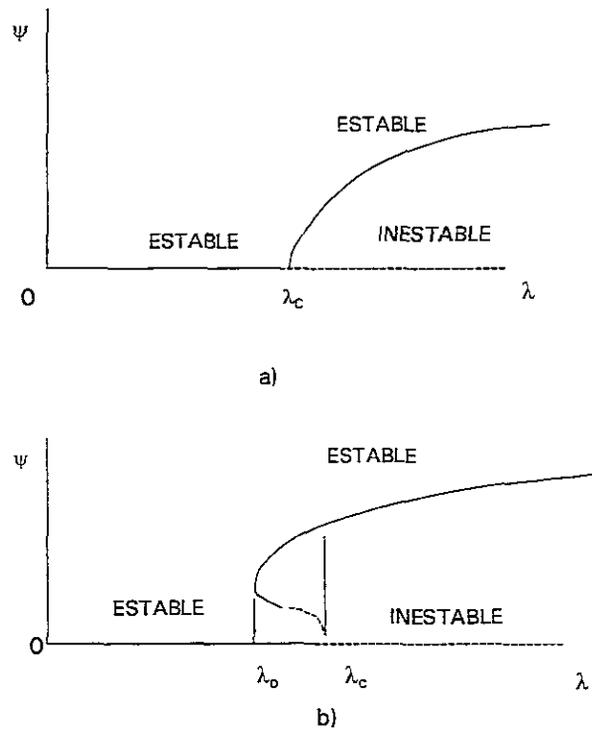


Lámina 6.4. Diagrama de la bifurcación, a) bifurcación supercrítica, b) bifurcación subcrítica. (Tobak y Peake, 1982)

orden. En cada caso, es común considerar el punto singular de múltiple orden como la coalescencia o la aparición de un nuevo punto singular múltiple de un número de puntos singulares elementales.

En el caso de una bifurcación subcrítica la estructura vorticosa dominante captura la mayor parte del flujo alimentando las estructuras, por lo que esta crece mientras que las estructuras adyacentes disminuyen y se dibujan dentro de la estructura dominante. El número de estructuras vorticosas cercanas a la estructura dominante disminuye mientras la estructura dominante crece rápidamente. En contraste con las bifurcaciones subcríticas, que son eventos comúnmente benignos empezado como deben con la aparición de estructuras

disipativas infinitesimales, las bifurcaciones subcríticas pueden ser eventos energéticos, que involucran cambios repentinos y drásticos en la estructura del flujo. Además cuando el flujo adquiere un nuevo estado, un decremento de  $\lambda$  cercano a  $\lambda_c$  no retornará el flujo a su estado inicial estable conocido. Solamente cuando  $\lambda$  decrezca suficientemente abajo de  $\lambda_c$  se recobrará el estado estable inicial. Las bifurcaciones subcríticas siempre implican que el flujo de bifurcación exhibirá efectos de histéresis. Un caso de una bifurcación subcrítica sería el rompimiento de vórtices que ocurre en las alas de un avión con altos ángulos de ataque. Se dice que dos patrones son topológicamente equivalentes si pueden intercambiarse uno en otro por un proceso de estiramiento. Esto completa el campo de trabajo en los términos y nociones necesarias para describir el origen de la estructura de los flujos en la separación y la evolución de las estructuras del flujo desde el punto de vista de la topología. Teniendo en cuenta la noción de que las líneas de fricción superficial y líneas de corriente externas reflejan las propiedades de un campo vectorial continuo se pueden caracterizar los patrones sobre la superficie y en particular las proyecciones, por un número restringido de punto singulares (nodos, sillars y focos).

#### 6.2.5 Sistemas dinámicos.

Estos sistemas se caracterizan por la recurrencia de patrones o estructuras que se repiten en su evolución temporal. Pueden representarse apropiadamente como la suma de esos patrones característicos, que ocurren a tiempos estadísticamente independientes. La presencia de estas estructuras implica que un conjunto limitado de patrones localizados espacial y temporalmente son recurrentes continuamente en el flujo, no obstante su irregularidad en el espacio y tiempo. El sistema se encuentra en un estado estacionario en la vecindad de un punto fijo por algún tiempo. La duración de este estado depende de la influencia de ruido u otra perturbación sobre el sistema,

eventualmente, el ruido es suficiente para sacar del estado de punto fijo o estado-fase, tiene influencia en la distribución de los tiempos en los que el sistema deja los puntos fijos y determina cuando cambian los patrones característicos. Por conveniencia, el estudio de flujos y el mapeo se hace en forma paralela en términos de sistemas con menor número de dimensiones. Desde el punto de vista físico hay que tratar con flujos, pero el análisis algunas veces es más conveniente llevarlo a cabo en términos de mapas. En el caso de flujo bidimensional periódico se necesitarían tres dimensiones pero en términos de mapeo sólo dos.

#### 6.2.5.1 Elementos de la teoría de sistemas dinámicos.

Si se considera el flujo o movimiento  $x = \Phi_t(\mathbf{X})$ . En la práctica el flujo se genera en un campo de velocidad Euleriano

$$dx/dt = v(x,t)$$

con la condición inicial  $x = \mathbf{X}$  para  $t = 0$ .

El movimiento de las partículas de fluido es un sistema dinámico. En general se considera que un sistema dinámico continuo es un sistema de ecuaciones diferenciales:

$$\frac{dx}{dt} = f(x,t) \tag{6.11}$$

Donde el término del lado derecho es arbitrario y  $x \in \mathbb{R}^n$ . Un caso especial sucede cuando  $f$  es periódico en el tiempo.

$$f(x,t) = f(x,t+T)$$

Al espacio  $x$  con  $t$  como parámetro o con  $x$  con incrementos de  $t$  (espacio  $R^n \times R$  si se le suma el tiempo como uno de los ejes), se llama espacio fase del flujo. En general se trata con sistemas autónomos o sistemas periódicos en el tiempo.

Si se denota  $dV \equiv dX_1 dX_2 \dots dX_N$  como el volumen para las condiciones iniciales, y por  $dv \equiv dx_1, dx_2, \dots dx_N$  como el volumen para las condiciones iniciales para el tiempo  $t$ .

$$dv = \det (Dx \Phi_t(\mathbf{X})) dV$$

donde

$$[ Dx \Phi_t(\mathbf{X}) ]_{ij} = \partial(\Phi_t(\mathbf{X}))_i / \partial X_j$$

Es el gradiente de deformación en  $N$  dimensiones. En particular, si  $G \equiv$  constante en el teorema de transporte, se obtiene el teorema de Liouville (ver Ottino 1997):

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} dv = \int_{V(0)} \nabla \cdot dv = \int_{V(0)} \frac{D}{Dt} [\det Dx(\Phi_t(\mathbf{X}))] dV(0)$$

Donde  $V(0)$  el volumen de las condiciones iniciales,  $\{\mathbf{X}\}$ , y  $V(t)$  denota el volumen de las condiciones iniciales en el tiempo  $t$ ,  $ej \{x\} = \Phi_t\{\mathbf{X}\}$ .

Si  $\nabla \cdot f < 0$  el sistema es disipativo. Los sistemas disipativos contraen su volumen en el espacio fase. Los sistemas Hamiltonianos, conservan su volumen en el espacio fase, estos sistemas tienen la estructura:

$$\frac{dq_k}{dt} = \frac{\partial H}{\partial p_k} ; \quad \frac{dp_k}{dt} = - \frac{\partial H}{\partial q_k}$$

Donde  $H$  se le denomina el Hamiltoniano y es función de  $p_k$ s y  $q_k$ s, y en algunos casos es una función explícita del tiempo. En particular los problemas relacionados con la ley de movimiento de Newton pueden formularse en esta estructura.

Para condiciones claramente no-restrictivas, la solución del sistema dinámico da por resultado un flujo  $x = \Phi_t(X)$ , por ej., la condición inicial  $X$  se encuentra en  $x$  para el tiempo  $t$ . Dado cualquier punto  $x_0$  perteneciente al espacio fase  $R^n \times R$  en un tiempo arbitrario designado como cero, la órbita o trayectoria basada en  $x_0$  esta dada por  $\Phi_t(x_0)$  para todos los tiempos  $t$ . Así  $\Phi_{t > 0}(x_0)$  denota la órbita de  $x_0$  para  $t > 0$  (tiempos futuros) y  $\Phi_{t < 0}(x_0)$  (tiempos pasados). El sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias ecuación 6.11 y su flujo asociado son un sistema dinámico continuo. En algunas circunstancias no es necesario o posible seguir la trayectoria del flujo de cada condición inicial continuamente en el tiempo a través del espacio fase y es más conveniente grabar sus posiciones en tiempos específicos. Considérese por ejemplo, que la posición inicial de la condición inicial  $X = x_0$  se graba para  $t = T$  y se denota por  $x_1$ , para el tiempo  $t = 2T$  se denota  $x_2$ , y así sucesivamente, se tiene:

$$\begin{aligned} x_1 &= \Phi_T(x_0) \\ x_2 &= \Phi_T(\Phi_T(x_0)) \\ &\cdot \\ &\cdot \\ x_n &= \Phi_T \{ (\Phi_T [ \dots (x_0) ] ) \} \end{aligned}$$

En notación mas compacta:

$$x_n = \Phi_T^n x_0 \tag{6.12}$$

donde  $\Phi_T^n(\cdot)$  denota la composición de  $n$  mapas  $\Phi_T$ . Otras alternativas para expresar el mismo concepto son:

$$\mathbf{x}_n \rightarrow \Phi_T(\mathbf{x}_n) \quad (6.13)$$

$$\mathbf{x}_{n+1} = \Phi_T(\mathbf{x}_n) \quad (6.14)$$

Tales mapas contienen información del flujo original y en algunos casos es más conveniente tratar con los mapas que con todo el flujo. Los mapas de las ec. 6.13 y 6.14 se refieren a sistemas dinámicos discretos.

#### 6.2.6 Puntos fijos y puntos periódicos.

Dado un flujo  $\mathbf{x} = \Phi_t(\mathbf{X})$ ,  $\mathbf{P}$  es un punto fijo del flujo sí

$$\mathbf{P} = \Phi_t(\mathbf{P})$$

Para todo tiempo  $t$  (por ejemplo la partícula localizada en la posición  $\mathbf{P}$  permanece en  $\mathbf{P}$ ), Por ejemplo los puntos de estancamiento en un campo de velocidades. Otro punto  $\mathbf{P}$  es un punto periódico de periodo  $T$  perteneciente a una órbita periódica cerrada sí

$$\mathbf{P} = \Phi_T(\mathbf{P})$$

Por ejemplo la partícula localizada en la posición  $\mathbf{P}$  con órbita  $\mathbf{x} = \Phi_t(\mathbf{P})$  regresa a su posición inicial después del tiempo  $T$  ( $\Phi_t(\mathbf{P}) \neq \mathbf{P}$  para cualquier  $t < T$  como por ejemplo las órbitas circulares del flujo de Couette. En un sistema dinámico discreto

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_n)$$

Un punto  $\mathbf{P}$  es un punto fijo del mapeo  $\mathbf{f}(\cdot)$  sí

$$\mathbf{P} = \mathbf{f}^n(\mathbf{P})$$

Para toda  $n$ . Un punto fijo de un flujo y su correspondiente mapeo no son en general lo mismo. Generalmente, un punto fijo de un mapeo corresponde a un punto periódico del flujo, ver lámina 6.5.

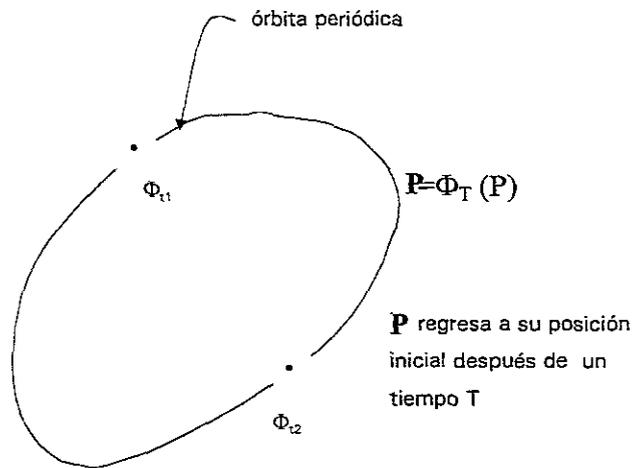


Lámina 6. 5. Puntos fijos de un mapa y periódicos de un flujo.  $P$  es un punto periódico del flujo  $\mathbf{x} = \Phi t(\mathbf{X})$  y un punto fijo del mapa  $\mathbf{x}_{n+1} = \Phi_T(\mathbf{x}_n)$ . En el tiempo  $t = 0$  el punto se localiza en  $P$ ,  $\Phi_{t1}(P)$  denota la posición en  $t_1$ ,  $\Phi_{t2}(P)$  denota la posición en  $t_2$ . (Ottino, 1997)

### 6.2.7 Secciones de Poincaré

Los métodos de secciones o superficies de Poincaré permiten una reducción en la complejidad de los problemas por medio de una reducción en el número de dimensiones (ver Hirsch y Smale, 1974) ya que convierte el flujo en un mapa. El concepto fue introducido por Poincaré y Birkhoff. Como un ejemplo de esta idea considérese un sistema dinámico autónomo continuo  $dx/dt = f(x)$  con  $x \in \mathbb{R}^3$  y una órbita de periodo  $T$ . Cortando la órbita transversalmente con un pequeño plano y denotando las intersecciones como  $P$ , ver lámina 6.6. Considere las intersecciones sucesivas de las órbitas desde un punto  $x_1$  cerca de  $P$ . Las intersecciones sucesivas definen un mapa  $x_{n+1} = \Phi(x_n)$ , el punto  $x_1$  es mapeado en  $x_2 = \Phi(x_1)$ , el punto  $x_2$  es mapeado en  $x_3 = \Phi(x_2) = \Phi^2(x_1)$  y así... Nótese que los tiempos entre intersecciones sucesivas no necesitan ser iguales a  $T$ . En la lámina 6.6 se muestra la idea gráficamente en tres dimensiones. La trayectoria periódica en el espacio fase corresponde a un punto fijo del mapa

$$P = \Phi(P)$$

De la misma forma una trayectoria periódica de periodo 2 corresponde a un mapa tal que

$$P_2 = \Phi(P_1), P_1 = \Phi(P_2)$$

$$P_1 = \Phi^2(P_1)$$

Y así sucesivamente, ver lámina 6.7. Estas ideas pueden generalizarse; por ejemplo si  $dx/dt = f(x)$  con  $x \in \mathbb{R}^N$  consideremos una superficie de dimensión  $N-1$ ,  $\Sigma(x) = 0$ , tal que el flujo en cualquier lugar es transversal a  $\Sigma$ , por ejemplo,

$$\nabla \Sigma(x) \cdot f(x) \neq 0$$

Para todas las  $x \in \Sigma(x)$ . Define un mapa  $\mathbb{R}^{N-1} \rightarrow \mathbb{R}^{N-1}$ . Ocasionalmente es posible definir otra sección o superficie y construir otro mapeo  $\mathbb{R}^{N-2} \rightarrow \mathbb{R}^{N-2}$ , y así.

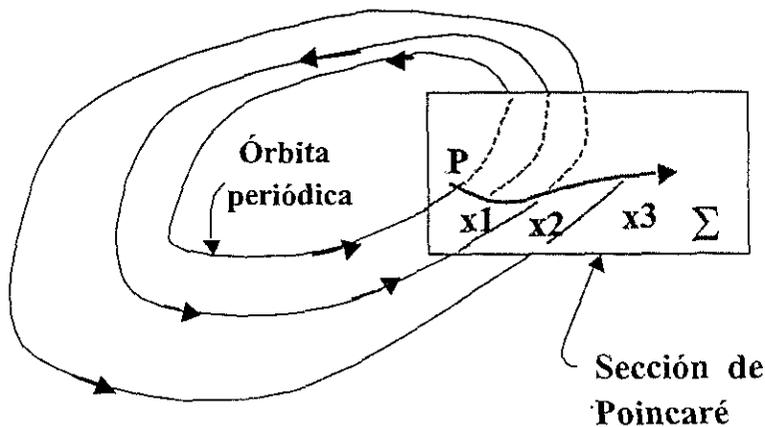


Lámina 6.6. Sección de Poincaré. Órbitas cercanas a  $P$  muestra la intersección con el plano  $\Sigma$  ortogonal a la órbita que pasa por  $P$ . (Ottino 1997).

Las secciones de Poincaré se usan en dos maneras: globalmente, cuando el sistema es periódico espacial y temporalmente, o localmente cerca de órbitas periódicas. En el caso de sistemas periódicos en el tiempo la técnica equivale a sumar las fotografías estroboscópicas de las condiciones iniciales en el plano

$\Sigma(x)$  a intervalos  $T, 2T, 3T, \dots$ , etc. En estas superficies de Poincaré, se grafican en un plano las características de las soluciones para todas las condiciones posibles, considerando este punto de vista, se comprenden mejor las propiedades más importantes de los sistemas dinámicos. Las secciones de Poincaré son de mayor importancia en el caso de sistemas Hamiltonianos periódicos.

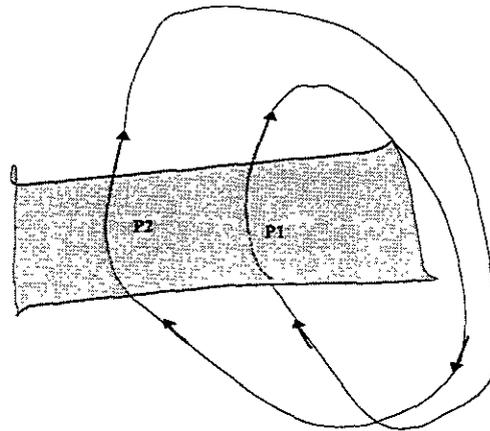


Lámina 6.7. Trayectoria periódica de periodo 2.

#### 6.2.8 Sistemas Hamiltonianos.

Las ecuaciones que describen la trayectoria de una partícula de fluido en un flujo bidimensional isocrónico (caracterizado por intervalos iguales de tiempo) son un sistema Hamiltoniano (Ottino, 1997), un caso especial de un sistema dinámico que conserva su volumen. Las ecuaciones que describen la trayectoria de una partícula de fluido en un campo de velocidades bidimensional isocrónico son:

$$\frac{dx_1}{dt} = \frac{\partial \psi}{\partial x_2}, \quad \frac{dx_2}{dt} = -\frac{\partial \psi}{\partial x_1}$$

Donde  $\psi$  es la función de corriente. Se dice que el sistema tiene un grado de libertad si el flujo es permanente,  $\psi = \psi(x_1, x_2)$ , y dos si no es permanente,  $\psi = \psi(x_1, x_2, t)$ . Si  $\psi$  es periódico en el tiempo se dice que el sistema tiene un

grado y medio de libertad. Los sistemas Hamiltonianos con un grado de libertad son integrables. Por otro lado los sistemas con un grado y medio o dos grados de libertad difícilmente son integrables. En sistemas Hamiltonianos el concepto de integrabilidad no significa el cálculo de la solución en términos de funciones conocidas sino la capacidad de encontrar suficientes constantes de movimiento de manera que con el sistema de ecuaciones, sea posible predecir cualitativamente el movimiento en el espacio fase.

Un sistema Hamiltoniano tiene la estructura dada por  $2N$  ecuaciones diferenciales de primer orden

$$\frac{dq_k}{dt} = \frac{\partial H}{\partial p_k} ; \quad \frac{dp_k}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial q_k} \quad (6.15)$$

Donde  $q_{k,s}$  son las componentes del vector  $\mathbf{q} = (q_1, \dots, q_N)$ , de *posición*, y las  $p_{k,s}$ , las componentes de,  $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_N)$ , del *momentum*, y  $\mathbf{H}$  es el Hamiltoniano, que es una función escalar de  $\mathbf{p}$  y  $\mathbf{q}$ , en algunos casos una función explícita del tiempo.

En sistemas mecánicos  $\mathbf{q}$  puede representar la *posición* y  $\mathbf{p}$  el *momentum*. En otras aplicaciones  $\mathbf{p}$  y  $\mathbf{q}$  toman diferentes significados. Si  $\mathbf{p}$  y  $\mathbf{q}$  tienen  $N$  componentes cada una, se dice que el sistema Hamiltoniano tiene  $N$  grados de libertad. El caso más simple de un sistema Hamiltoniano con  $H = H(\mathbf{p}, \mathbf{q})$  es un sistema con un grado de libertad. El sistema linealizado alrededor de un punto fijo,  $dq/dt = dp/dt = 0$ , admite solo tres clases de puntos fijos: hiperbólicos o silla, elípticos o centros o nodos, y parabólicos o degenerados, ver el ejemplo de la lámina 6.8.

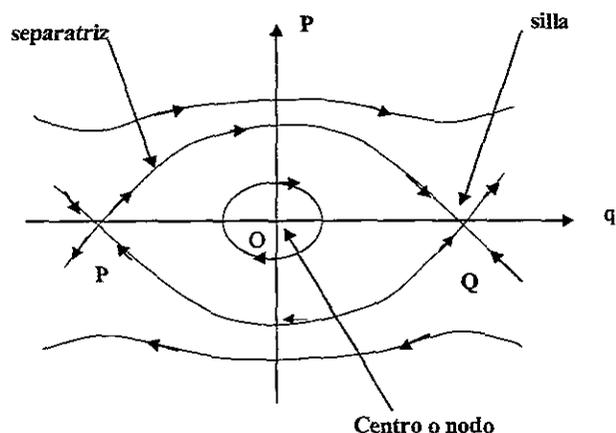


Lámina 6.8. Esquema general de un sistema Hamiltoniano integrable, admite tres clases de puntos fijos: silla, centros o nodos y puntos degenerados o parabólicos, ver lámina 6.1.

### 6.3. Topología del flujo detrás de un obstáculo.

El flujo detrás de un escalón es uno de los flujos recirculantes más simples, no obstante su campo de flujo es muy complejo. En la orilla se despega la capa límite formando una capa cortante. Esta se parece a una capa cortante plana al menos en la mitad de la región de separación de flujo. La línea de corriente que divide el flujo se curva un poco. Sin embargo la capa cortante en la región cercana al reattachment donde se pega difiere de una capa de mezclado sobre una placa plana en un aspecto muy importante: El flujo en el lado del estancamiento (flujo de menor velocidad) de la capa cortante es muy turbulento, esto es completamente opuesto a lo que sucede en una capa plana de mezclado. La capa cortante ondula fuertemente aguas abajo en la zona de recirculación y se pega a la pared. Parte del fluido de la capa cortante se deflecta aguas arriba dentro del flujo recirculante debido a un fuerte gradiente de presión. En la zona de recirculación la capa cortante, interactúa con un gradiente de presión adverso y con la presencia de la pared. El flujo es altamente inestable, estructuras turbulentas de escalas comparables a la altura del escalón pasan a través de la región de recirculación. La visualización mostró que la longitud de separación fluctuó de manera que la capa cortante

se movió hacia arriba y hacia abajo fluctuando en una región definida. Mediciones cuantitativas confirmaron que la longitud de la zona de recirculación se desvió de la longitud media de recirculación hasta por  $\pm 2h$  ( $h$  = altura del escalón), ver lámina 6.9. La frecuencia adimensional de este movimiento es  $fX_R/U_0 \approx 0.6-0.8$ , de acuerdo con resultados de Driver *et al.* (1987). Para estas frecuencias ocurren los máximos de energía contenidos en las fluctuaciones de presión. Donde  $X_R$  es la distancia media a partir de la cresta del escalón hasta el punto donde se pega la lámina de cortante, considerando un periodo grande de tiempo, y  $U_0$  es la velocidad media del flujo aguas arriba del escalón. El periodo entre flujos invertidos en la región de recirculación parece aleatorio sin correlación aparente entre el flujo cerca de la pared y el flujo aguas abajo del punto donde se pega. Sin embargo el tiempo  $T$  entre flujos invertidos es tal que  $X_R/TU_0 \approx 0.09$ , estos flujos invertidos son de corta duración  $t$ , con  $X_R/tU_0 \approx 0.6$  (Driver *et al.* 1987)

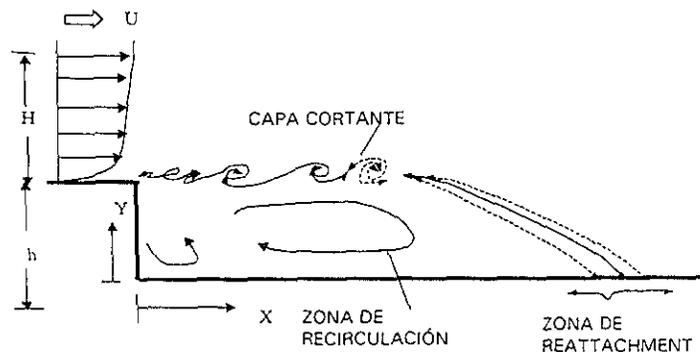


Lámina 6.9. Separación y reattachment, características del flujo detrás de un escalón (Driver *et al.* 1987).

### 6.3.1 Separación

Se entiende como el proceso completo de inicio o rompimiento de una capa límite. Para obtener el punto de separación un criterio muy grueso sería considerar el punto donde se invierte la dirección del flujo (flujo inverso) lo cual es válido solamente en el caso de flujo bidimensional permanente. En flujos bidimensionales no permanentes la superficie cortante puede cambiar de signo

sin flujo inverso y sin separación. Es decir en flujo tridimensional el flujo rotacional puede separarse sin que la superficie de esfuerzos cortantes sea cero. Para capas límites turbulentas permanentes, Simpson (1981) propuso las siguientes definiciones basadas en la fracción de tiempo que el flujo se mueve aguas abajo; Separación incipiente (SI) ocurre con flujo inverso instantáneo 1% de tiempo  $\gamma=99$  (donde  $\gamma$  es la intermitencia). Separación intermitente transitoria (SIT) ocurre con flujo invertido el 20% de tiempo,  $\gamma=80$ , Separación transitoria (ST) con flujo invertido 50% del tiempo y Separación S ocurre cuando en promedio los esfuerzos cortantes son cero. Datos disponibles indican que ST y S ocurren en el mismo punto.

Gyr (1992) describe la separación bidimensional y tridimensional. En la separación bidimensional, la línea de corriente se bifurca en el punto de separación S y en el punto de reattachment R ver lámina 6.10. La línea de corriente de separación encierra un dominio con flujo invertido.

En la separación tridimensional, la línea de separación no es la misma ni coincide con el punto de reattachment R. Si se conserva continuidad, el fluido que alimenta el dominio dentro de la separación tiene que salir en una tercera dimensión, ver lámina 6.11. En la visualización, puede observarse que la tinta entra en la región de deseparación, pero no se observa su salida. Esta es la razón por la que algunos observadores creen que la separación puede tratarse aproximadamente como una separación bidimensional.

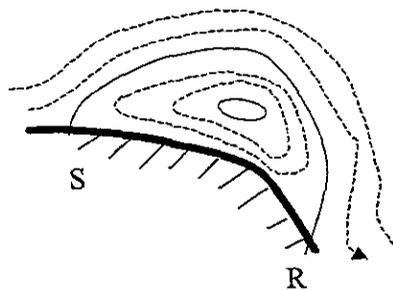


Lámina 6.10. Separación bidimensional (Gyr, 1992)

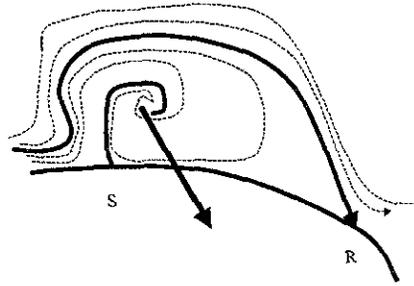


Lámina 6.11. Separación tridimensional (Gyr, 1992)

### 6.3.2 Estructuras vorticosas detrás de un obstáculo

De acuerdo con Smits(1982) después de las ondas de Kelvin-Helmholtz que producen una serie de vórtices, estos se hacen dobles, triples, y a veces cuádruples los cuales se mueven en conjunto. Este parece ser el mecanismo para el rápido crecimiento de la capa cortante y muestra mucha similitud con la estructura de una capa de mezclado simple. La estructura que resulta de un número de vórtices agrupados se comporta como un solo vórtice. La tridimensionalidad de las estructuras se incrementa aguas abajo pero las características esenciales del flujo todavía se pueden identificar cerca del punto donde se pega nuevamente

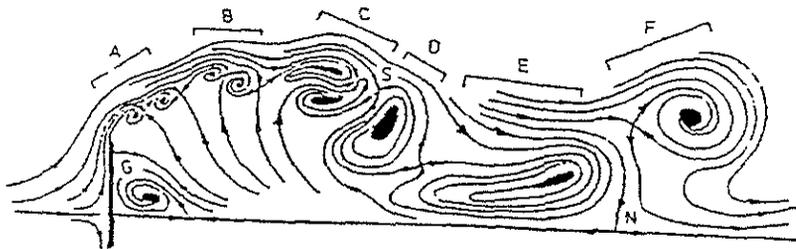


Lámina 6.12. Vista instantánea de líneas de corriente para el flujo detrás de una placa u obstáculo (Smits 1982).

(reattachment). En la lámina 6.12 por simplicidad sólo se muestran vórtices pares. Debido al gradiente de velocidad, las pequeñas diferencias en las condiciones iniciales de los vórtices pares A hacen que permanezcan juntos como el par B. Estos inician a enrollarse uno alrededor del otro y se deforman

en respuesta a esfuerzos causados por su velocidad inducida (par C). La viscosidad difunde la vorticidad, los vórtices pares actúan como un solo vórtice, dos pares se enrollan uno en el otro, lo que fuerza a que se presente un punto silla cerca de la frontera. El vórtice E entra en la burbuja de separación mientras que el F prosigue aguas abajo. Nótese que todos los vórtices se muestran como focos esto significa que el flujo es hacia los vórtices, que son tridimensionales. En otra burbuja de separación secundaria G, el fluido es transportado lateralmente y expelido dentro del flujo en la unión de la pared lateral y la placa disipadora o divisora; en este punto se produce un punto crítico. Hornung y Perry (1984) observaron y clasificaron varios patrones de separación tridimensional de flujo. Estos investigadores que estudiaron patrones medios para el flujo sobre un cuerpo u obstáculo, propusieron que la producción de turbulencia se origina predominantemente en los puntos silla y se transmite a través de los nodos. Hunt *et al* (1978) estudiaron el flujo alrededor de un obstáculo aplicando topología a la visualización del flujo y propusieron las configuraciones siguientes para el flujo sobre un obstáculo con un eje de simetría para flujo laminar y turbulento. En el caso de flujo laminar sólo hay puntos de separación en la superficie, no hay líneas de corriente cerradas, ver lámina 6.13a. Estas observaciones se obtuvieron con visualización de humo así como en observaciones con agua como fluido. En la lámina 6.13b se presenta la topología para el caso de flujo turbulento para  $Re \approx 10^4$ .

Müller y Gyr (1996) realizaron observaciones de la evolución temporal de un vórtice inicialmente bidimensional. Visualizaron el flujo con ayuda de una sustancia fotocromática que se convierte en tinta al iluminarse con una fuente de luz láser ultravioleta. En la fase 1, no hubo sillas ni nodos, y el flujo aún no se separó, lámina 6.14. En la fase 2 en la cresta de la duna o punto de separación se formó una media silla S1, ver lámina 6.15a y en el punto de recirculación se formó una segunda media silla S2, que se movió aguas abajo.

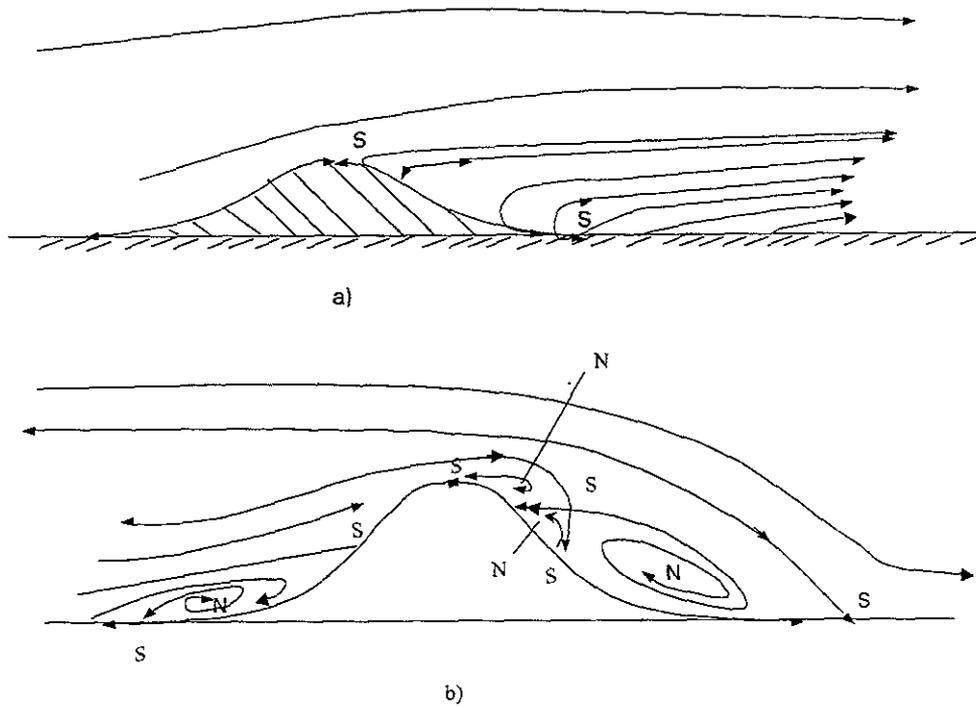


Lámina 6.13. Líneas de corriente medias y puntos singulares en el eje central de un obstáculo con simetría axial. a) flujo laminar. b) flujo turbulento. (Hunt *et al.* 1978)

El nodo N1, del vórtice incipiente compensó las dos medias sillas. En la fase 3, lámina 6.15b, el flujo recirculante empezó a separarse, lo que dio por resultado

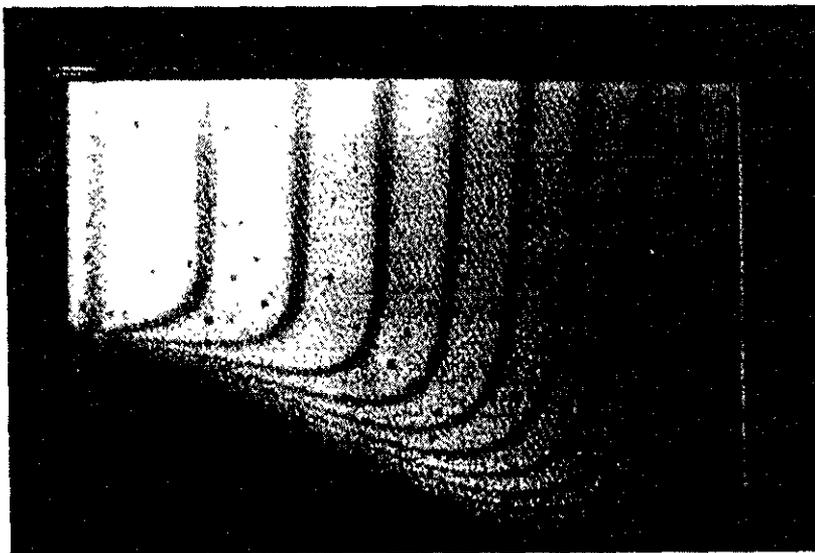


Lámina 6.14. Fase 1 de la evolución de estructuras coherentes detrás de una duna; crecimiento de la capa límite (Müller, 1996).

las medias sillas S4 y S5, un nodo N2, y una silla, S3. Las reglas de topología requieren un nodo adicional, que aparece como, N3, y conecta la capa de pared con la región de vorticidad concentrada.

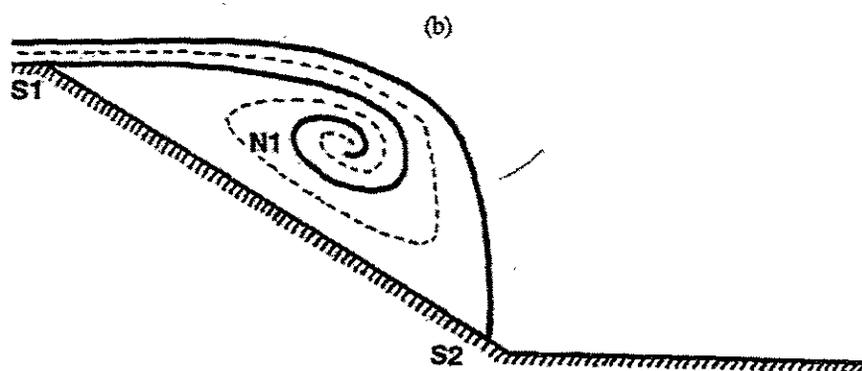
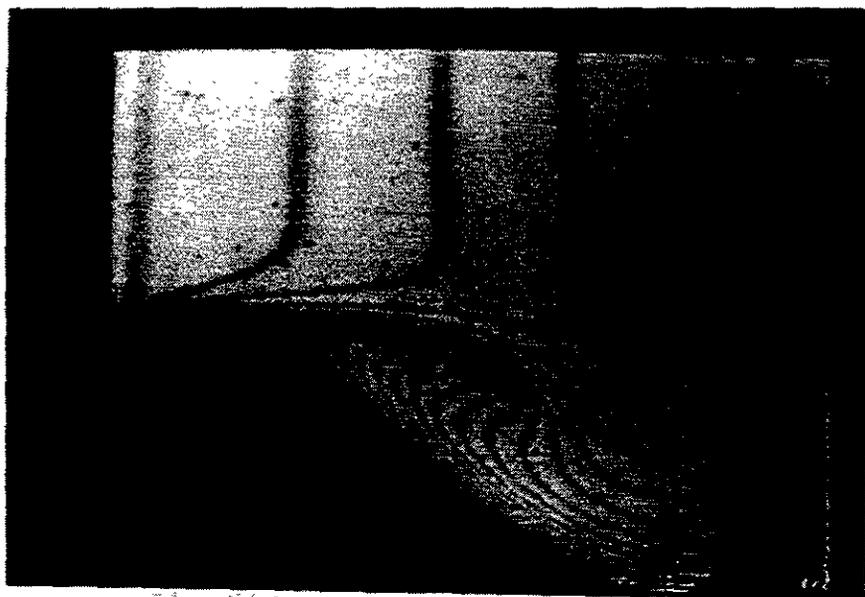


Lámina 6.15. Fase 2 de la evolución de estructuras coherentes detrás de una duna: a) separación y formación del primer vórtice; b) patrón topológico de líneas de corriente de la fase2. (Müller,1996).

#### **6.4 Dinámica de los estados-fase del flujo sobre formas de fondo fijas; Análisis del caso en estudio.**

El análisis de la dinámica de los patrones de líneas de corriente del flujo se hizo en el plano x-y el cual es el de mayor cortante, para el caso 3 del presente estudio, con un tirante de 0.08 m y un número de Reynolds de 18,400. En el análisis se tomaron en cuenta las investigaciones previas en particular las de Hunt *et al* (1978), Müller y Gyr (1995). Las técnicas para la definición de los patrones de flujo fueron la visualización de flujo con inyección de tinta, generación de burbujas de hidrógeno y agregando partículas trazadoras, también se usaron las distribuciones instantáneas de velocidad obtenidas a partir de las trayectorias de las burbujas de hidrógeno, estas distribuciones sirvieron para confirmar cinemáticamente la validez de los patrones topológicos obtenidos.

##### **6.4.1. Topologías de los patrones de flujo sobre las formas de fondo fijas.**

A partir de la visualización se observaron cuatro configuraciones o patrones de líneas de corriente del flujo los cuales se repitieron casi periódicamente estos espacios-fases se representan esquemáticamente en la lámina 6.16.

Fase 1, ver la lámina 6.16 a). Se observaron ondas de Kelvin-Helmholz las cuales produjeron una serie de vórtices en similitud a lo que ocurre en una capa de mezclado, estas ondas fueron inicialmente casi horizontales. De manera semejante a lo descrito en el caso de estructuras coherentes detrás de un obstáculo, estos vórtices evolucionaron con el tiempo, interactuaron, enrollándose unos en otros hasta que formaron un solo vórtice, el cual comúnmente se conoce como vórtice ojo y que en este trabajo denominamos Fase 2. En la visualización con inyección de tinta se observaron en forma muy clara las ondas tanto en el plano x-y como en el plano x-z, ver lámina 5.20. En

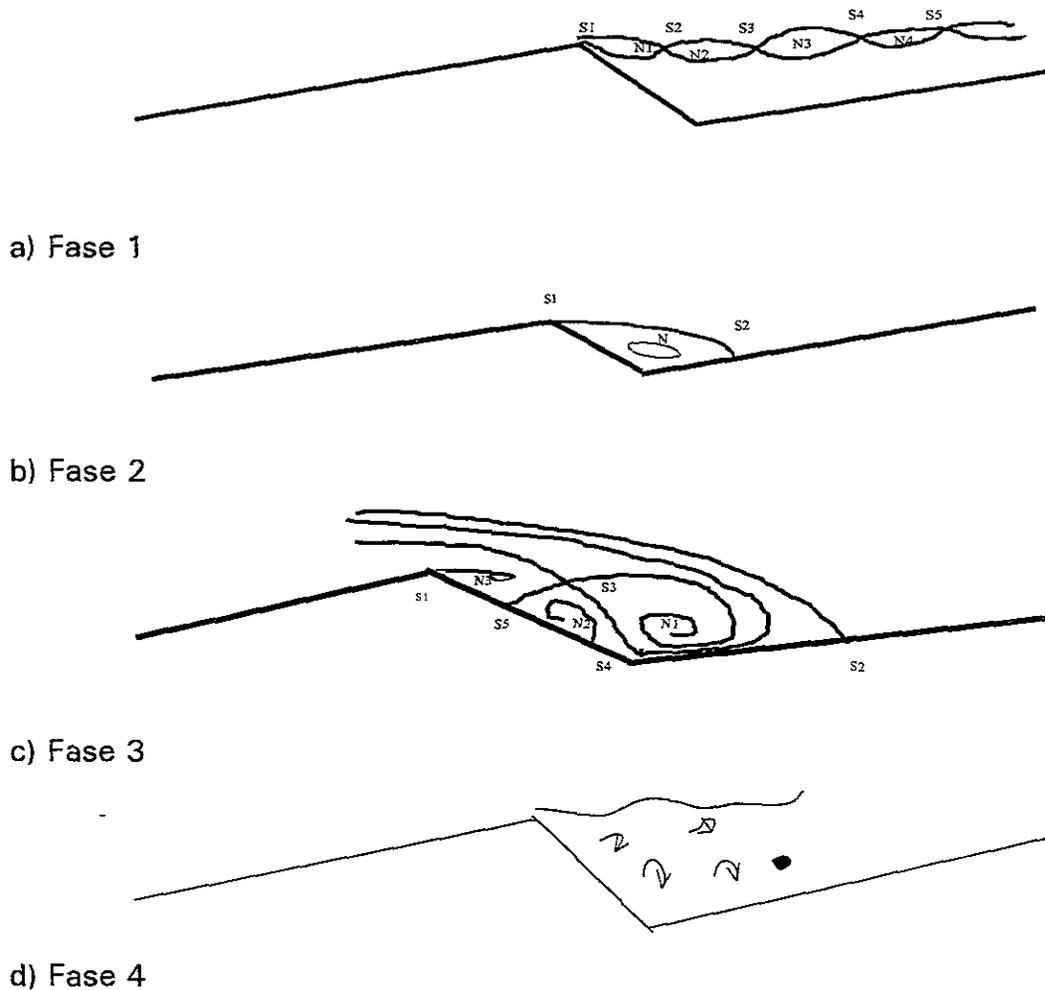


Lámina 6.16. Estados-fase observados en la visualización del flujo sobre formas de fondo fijas bidimensionales del caso de estudio.

esta región, Bennett y Best (1995) con la técnica del cuadrante, detectaron eventos tipo 2 (eyecciones de flujo) en una extensión de  $\approx h$  (altura de la forma). En esta zona hay intercambio de flujo hacia la región externa y hacia la zona de recirculación. La consistencia de la descripción topológica con el campo de velocidades instantáneas se observa en la lámina 5.26c y 5.26d .

Fase 2. Ver lámina 6.16 b). En esta fase la estructura de vórtice ojo es un vórtice transversal de gran tamaño, el cual esta definido por la línea de

corriente de separación, a partir de la cresta de la duna y se cierra en el punto de reattachment en la pendiente de la duna siguiente. Esta fase se reporta por una gran cantidad de investigaciones por ejemplo las de Mercer y Haque, 1973; Asaeda *et al.* 1989; Ikeda y Asaeda, 1983, Müller y Gyr 1996. En el punto de separación se forma una media silla S1 y otra media silla en el punto de reattachment S2, el vórtice cerrado compensa las dos medias sillas N. En las grabaciones de la visualización con tinta es muy difícil apreciar el cierre de la capa cortante formando el vórtice ojo, lo que ocurre instantáneamente. Esta fase se observó con mayor claridad cuando se usó la técnica de generación de burbujas de hidrógeno en el flujo (ver lámina 5.27a). En los campos de velocidad instantánea se observó claramente la estructura de vórtice ojo, una estructura de gran tamaño, la cual está definida por la distancia al punto de recirculación. En la visualización con burbujas de hidrógeno se observaron otras órbitas concéntricas cerradas dentro del vórtice ojo ver lámina 5.27a. Una observación importante de las distribuciones de velocidad instantánea fue que en esta fase<sup>2</sup>, a una distancia del orden de la altura de la cresta, las velocidades instantáneas permanecieron casi horizontales, y la configuración del campo de velocidades se mostró más estable (sin cambios fuertes de dirección de las velocidades instantáneas, ver lámina 5.27a y 5.27c. En la zona de recirculación Bennett y Best detectaron eventos tipo 4 (barridos de flujo hacia la pared).

Fase 3. Ver lámina 6.16 c. Dentro del vórtice ojo se forman otros vórtices, se presentan las medias sillas S4 y S5 un nodo N2, una silla S3, y un nodo N3, esta topología fue observada claramente por Müller y Gyr.

Fase 4. Ver lámina 6.16d. El desprendimiento de la línea de corriente de separación del punto de reattachment por inestabilidades muy fuertes produce la ruptura de las estructuras observadas en la fase anterior en una gran cantidad de vórtices de menor escala los cuales a su vez se rompen en otros

pequeños vórtices, disipando la energía (ver lámina 6.17). Las características de estas estructuras pequeñas dependen de las interacciones entre los vórtices que se generan y por ser una gran cantidad de ellos, es muy difícil advertir las transformaciones instantáneas, simultáneamente al rompimiento se forman nuevamente las ondas de Kelvin-Helmholz a partir de la cresta de la duna. El desprendimiento de la línea de corriente se relaciona con los eventos denominados *boils* en los que el fluido atrapado en la región de recirculación se desprende violentamente hacia el flujo medio y en ocasiones interactúa con la superficie libre del agua. En el presente estudio se identificaron otros dos puntos de separación los cuales se relacionaron con los puntos de separación presentados en la fase 3, ubicados en la pendiente del lado lee. Onslow *et al* (1993) observaron desprendimientos de sedimento en forma de pluma en la pendiente del lado lee de la duna, inducidos por la intensa interacción de vórtices primarios y secundarios. Las fuertes interacciones entre el flujo encerrado por la línea de separación y el flujo externo, producen eyecciones violentas de flujo, en las que parte de este flujo viaja hacia atrás, sobre la cresta de la duna y genera corrimientos del punto de separación aguas arriba y otra parte del flujo avanza sobre la forma siguiente produciendo a su vez corrimientos en el punto de reattachment aguas abajo.

De acuerdo con la visualización se puede describir el funcionamiento dinámico del sistema como un sistema en evolución continua entre las configuraciones descritas en las fases 1 a 4. Las fluctuaciones de la capa cortante juegan un papel esencial en la dinámica del flujo detrás de las formas de fondo, pues cualquier perturbación o ruidos originan las transiciones del flujo y los cambios en la duración de cada fase. Esto afecta la periodicidad del flujo y la transición a la fase consecutiva. Los estados-fase o planos fase, son casi periódicos, su duración no es siempre la misma y depende de las condiciones instantáneas del flujo.

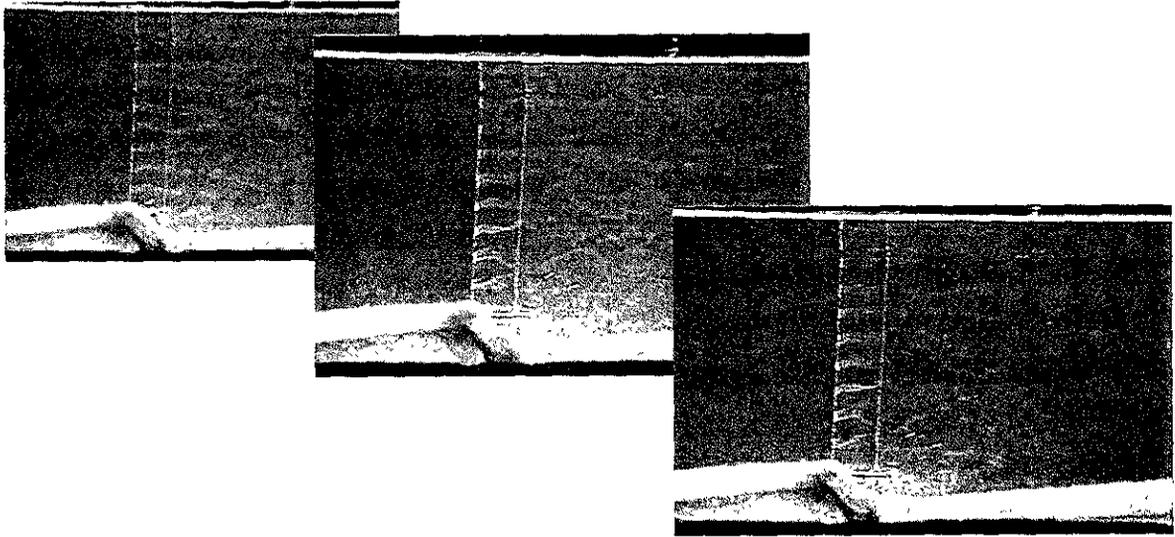


Lámina 6.17. Visualización con burbujas de hidrógeno, formación y rompimiento de la estructura del vórtice ojo.

Los esfuerzos turbulentos más fuertes ocurren en la parte media de la capa cortante y se deben principalmente a estructuras de gran tamaño. Las fluctuaciones de presión producidas por estas estructuras son relativamente grandes e influyen la zona de estancamiento. Existe una fuerte interacción entre el flujo externo que viaja hacia la pared, se bifurca y parte de él se introduce en la región de circulación, la otra parte avanza sobre la forma siguiente. El flujo que alimenta la región de circulación tiene que salir. Las fuertes interacciones entre el flujo encerrado por la línea de separación y el flujo externo producen las eyecciones violentas de flujo, en las que parte de este flujo viaja hacia atrás, sobre la cresta de la duna, lo que ocasiona corrimientos del punto de separación aguas arriba y a su vez corrimientos en el punto de reattachment aguas abajo. Existen fuertes interacciones de momentum y energía del flujo medio hacia la pared y a su vez de la región de recirculación hacia el flujo medio.

#### 6.4.2 Modelación de los estados fase de flujo sobre formas de fondo fijas.

La modelación de la fase1 se podría hacer si se considera un flujo dado por la función de corriente:

$$\psi(x_1, x_2, t) = Ux_2 + [\Delta U h / 2] \ln \{ \cosh(x_2/h) + A \cos [x_1 - Ut]/h \}$$

la cual representa un tren de vórtices moviéndose en la dirección  $x_1$  a una velocidad  $U$ . El parámetro adimensional  $A$ , representa la concentración de vorticidad. El valor  $A=0$  corresponde a un flujo paralelo con un perfil de velocidad hiperbólico.  $\Delta U$  es la diferencia de velocidades a través de la capa cortante y  $h$  es proporcional a la distancia entre vórtices (ver Stuart, 1967). Roberts (1985) usó esta expresión para modelar el estiramiento de líneas o estrías y el enrollamiento en las capas cortantes. La evolución de las estrías y líneas de material (de tinta) corresponden a la solución de:

$$\frac{dx_1}{dt} = \frac{\partial \psi}{\partial x_2}, \quad \frac{dx_2}{dt} = -\frac{\partial \psi}{\partial x_1}$$

En un campo de referencia  $F'(x_1', x_2')$  moviéndose a velocidad  $U$  en la dirección  $x_1 > 0$  la función de corriente resulta:

$$\psi'(x_1', x_2') = (\Delta U h / 2) \ln [\cosh (x_2' / h) + A \cos (x_1' / h)] \quad (6.16)$$

En este campo el flujo es autónomo, y por lo tanto integrable, con un patrón o imagen congelada similar a la que se muestra en la lámina 6.18, este flujo frecuentemente se refiere como ojos de gato de Kelvin, ver Lamb (1932). Si se considera una sección de Poincaré para este problema, ésta consistiría en grabar las intersecciones de partículas designadas inicialmente en el plano  $x_1' - x_2'$  cada  $2\pi$  intervalos de tiempo.

La ecuación anterior simula el comportamiento de un tren de vórtices moviéndose en la dirección de la corriente, ésta tiene solución para el espacio fase1.

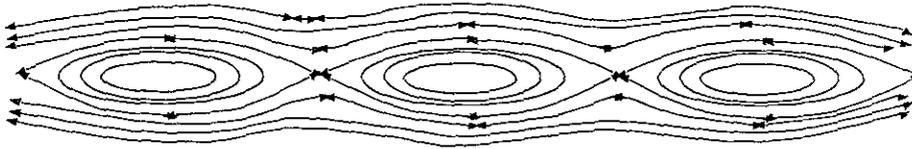


Lámina 6.18. Líneas de corriente correspondientes a la función de corriente de la ecuación 6.16, para  $A = 0.8$ . (La distancia entre vórtices es de  $2\pi$ ;  $\Delta\psi$  es constante entre líneas de corriente. (Ottino, 1997).

La modelación de las fases 2 a 4 en las que se observó que existen fuertes interacciones entre los vórtices detrás de la cresta se podría hacer con ecuaciones semejantes a las que se presentan a continuación. Si se considera un sistema dinámico Hamiltoniano (Batchelor, 1967), las ecuaciones de movimiento para vórtices puntuales de intensidad  $k_1, k_2, \dots, k_n$ , ubicados en las posiciones  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$  el valor instantáneo de la función corriente es:

$$\psi(x, y) = (-1/4\pi) \sum_i k_i \ln [(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2] \quad (6.17)$$

El movimiento de los vórtices de intensidad  $k_j$  es igual a la velocidad del fluido en el punto  $(x_j, y_j)$  debido a la interacción de todos los demás vórtices. El resultado es:

$$k_j \frac{dx_j}{dt} = \frac{\partial W}{\partial y_j}, \quad k_j \frac{dy_j}{dt} = -\frac{\partial W}{\partial x_j}$$

Donde

$$W = \left( \frac{-1}{4\pi} \right) \sum_i \sum_j [k_i k_j \ln(r_{ij})] \quad (i \neq j)$$

Con

$$r_{ij} = [(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2]^{1/2}$$

El sistema es Hamiltoniano con un número de grados de libertad igual al número de vórtices. En este caso el valor de  $W$  (Hamiltoniano) asociado con una partícula de fluido, en general es función del tiempo ya que depende de las posiciones instantáneas de todos los vórtices. En el caso de un vórtice (un grado de libertad) y de dos vórtices en el plano, las ecuaciones pueden integrarse, lo que ya se conoce desde hace tiempo. Recientemente se ha encontrado la solución para el caso de tres vórtices en un plano (Aref y Brons, 1998). Sin embargo para un sistema de cuatro o más vórtices en una región bidimensional no se ha encontrado la solución.

De acuerdo con lo anterior la función de corriente tiene solución para la fase 2 ya que puede integrarse. Para las fases 3 y 4 las ecuaciones no son integrables por el número de grados de libertad.

La simulación del sistema dinámico consideraría las ecuaciones de la función corriente para cada fase. La solución de cada fase es en sí mismo un problema muy complejo de resolver. Además de esto se tendrían que establecer las consideraciones requeridas para definir los criterios de estabilidad del flujo para determinar cuando se cambia de una fase a la siguiente.

En la actualidad, debido a la complejidad del flujo detrás de una forma de fondo, no se ha llegado a modelar completamente, es decir considerando las fases y sus transiciones. En las investigaciones del flujo sobre formas de fondo por lo general (Asaeda *et al.* 1989) se considera la simulación del flujo por medio de una función de corriente que representa sólo la fase 2, en la que se presenta el vórtice ojo. Esto se debe a que como se observó en las visualizaciones, en esta fase, de acuerdo con las distribuciones de velocidad instantánea se logra una cierta permanencia, y los patrones de velocidad son

bastante estables, las velocidades a partir de la altura de la cresta presentan una configuración casi horizontal.

De acuerdo con la definición de estabilidad estructural; se puede decir que la transición de la configuración de ojos de Kelvin con su tren de vórtices, a la configuración de un vórtice ojo ocurre como una transición subcrítica ya que el vórtice ojo engloba a los otros vórtices más pequeños, creciendo hasta su máximo tamaño. Después de esto, una pequeña perturbación provoca la transición supercrítica en la cual a partir de la estructura de mayor tamaño, en este caso el vórtice ojo, se producen rompimientos de las estructura mayores en estructuras disipativas. Posteriormente, se presenta nuevamente la fase 1 con la separación de flujo de la cresta, cerrándose el ciclo.

Los cambios de topología van unidos a un cambio en las propiedades de transporte del flujo, y se producen debido a la interacción de las fuerzas dominantes del flujo; fuerzas inerciales, viscosas, gravitacionales y sus combinaciones. En condiciones en que las fuerzas dominantes se aproximan al equilibrio, es importante su influencia como mecanismos responsables de la transformación de energía. Una pequeña perturbación provocará un cambio de estado el cual será cualitativa y cuantitativamente diferente al anterior y no es posible regresar de un estado al anterior, como se estableció al revisar los conceptos de estabilidad estructural. Puesto que cada cambio de fase esta ligado a un cambio de energía, su duración dependerá de que ocurran pequeños cambios que alteren las condiciones de equilibrio de cada fase. En el capítulo siguiente se analizará con detalle el comportamiento de las macroestructuras turbulentas (asociadas con las topologías analizadas) y los mecanismos de transporte de sedimentos.

### **6.5. Observaciones**

Se usaron los conceptos de puntos críticos para analizar los patrones observados en la visualización del flujo sobre formas de fondo bidimensionales fijas. Se presentó una breve introducción a los métodos matemáticos para el análisis de los flujos periódicos, y algunos ejemplos ilustrativos de su aplicación a casos semejantes al del presente estudio. Las topologías de las fases 2 y 3 del presente estudio concuerdan con las reportadas por Müller y Gyr (1996) ver lámina 6.15. Con apoyo en estas teorías matemáticas fue posible presentar las ecuaciones que podrían simular las topologías observadas en la visualización de flujo en cada fase identificada, pero no así de los procesos de evolución o cambio de estado.

El estado del conocimiento en esta área de las matemáticas es aún limitado, los primeros trabajos sobre puntos críticos aplicados al estudio de flujos, aparecieron en 1987 con Perry y Chong. La aplicación de estas herramientas al análisis del flujo es bastante compleja, la descripción del comportamiento de un flujo involucra una gran cantidad de variables a considerar lo que hace que las soluciones matemáticas sean muy difíciles y en la mayoría de los casos imposibles de resolver.

## **7. MECANISMOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.**

### ***7.1 Introducción***

En la suspensión de sedimentos en un flujo, el principal agente responsable es la turbulencia. Las dos aproximaciones más comunes para tratar los mecanismos relacionados con la suspensión de sedimentos por turbulencia son; en primer término, correlacionar la intensidad de la componente de velocidad vertical de los remolinos turbulentos con el levantamiento de las partículas, Lane (1939). Sin embargo la aproximación de mayor éxito es el modelo de difusión de Vanoni (1946). En este modelo de convección difusión, los parámetros más importantes son el coeficiente de difusión  $E$  y la velocidad de caída  $W$ . Dependiendo de los valores que tomen estos parámetros se obtienen una gran cantidad de soluciones matemáticas, sin embargo no todas las soluciones matemáticas son aceptables físicamente, Haque y Mahmood (1987), propusieron un gráfico donde se pueden elegir los valores de  $E$  y  $W$  con un sentido físico. Desafortunadamente, en rigor la aplicación de un método de difusión para flujos con formas de fondo no es apropiado porque supone una turbulencia estadísticamente homogénea. La depositación de partículas se relaciona con la difusión y la sedimentación por gravedad. Aunque ha habido intentos por ligar estos procesos a los efectos de las estructuras cercanas a la pared, la mayoría de los estudios se enfocan a estudiar las estructuras y su interacción con las partículas en canales con fondo plano. Aún no se conoce como se levantan las partículas de la pared y que tipos de estructuras se asocian con estos eventos, es decir se desconocen los efectos de las estructuras coherentes en el movimiento de las partículas; en el levantamiento y la depositación.

En flujos geofísicos, desde hace tiempo se reportaron estructuras macrotubulentas en ríos, lagos y en océanos, pero hasta recientemente se reconoce que existe una relación entre la macroturbulencia y la suspensión de sedimentos. Jackson (1976) reportó los boils observados en la superficie de los ríos como las estructuras más grandes y energéticas que se presentan aguas abajo de las dunas. La

macroturbulencia generalmente consiste de fuertes levantamientos de flujo de corta duración, en puntos aislados y rodeados de flujo más lento dirigido hacia la pared. La macroturbulencia es anisotrópica y no permanente.

Kaftori *et al* (1994) realizó estudios de flujo con partículas y visualización de burbujas de hidrógeno en un flujo sobre fondo plano, la visualización mostró que las estructuras turbulentas fueron los mecanismos dominantes en el levantamiento de partículas. Cuando un vórtice pasaba sobre una partícula, esta se levantaba hacia fuera de la pared, si el vórtice era suficientemente energético para el tamaño dado de la partícula. Estas estructuras turbulentas afectaron el movimiento de las partículas y los procesos de levantamiento y depositación.

Cuando se desarrolló un vórtice sobre una partícula, esta pudo ser arrastrada por el vórtice dentro de él, la partícula viajó con el vórtice una cierta distancia, hasta que eventualmente se desprendió debido a su inercia o debido a que el vórtice se disipó en el flujo. La velocidad media de la partícula dentro del vórtice fue mayor a la que tienen las partículas fuera del vórtice probablemente como resultado del movimiento rotacional dentro de él, consecuentemente, las partículas en los vórtices tienen una mayor probabilidad de alcanzar elevaciones mayores y ser esparcidas a través del flujo. Una vez liberadas las partículas se sedimentan por la acción de la gravedad. Una partícula puede descender hacia la pared, o puede ser capturada por otro vórtice y viajar dentro de él hasta ser liberada nuevamente.

Los estudios de estructuras del flujo sobre formas de fondo ya sean fijas o de fondo móvil son pocos, y la estructura interna de estos flujos ha sido poco documentada, excepto en lo que se refiere a recurrencia, periodicidad e histogramas. El problema del estudio experimental en un modelo físico de la formación de las formas de fondo es la movilidad de los granos, que no es función únicamente de los esfuerzos cortantes medios o de la velocidad media. Los granos pueden entrar en suspensión por agitación turbulenta y ser arrastrados por velocidades mucho menores a las críticas para el inicio de movimiento. El principal problema es como expresar el levantamiento de las partículas en términos de parámetros que describan la turbulencia en una forma que pueda ser manejada

analíticamente. En este capítulo se analizan los casos de mecanismos de transporte en un flujo sobre formas de fondo bidimensionales fijas y al flujo sobre formas de fondo tridimensionales sobre un fondo móvil en el cual se realizaron mediciones de concentración de sedimentos en la vertical. Asimismo se aportan conocimientos acerca de la estructura del flujo y los mecanismos de transporte de sedimentos.

## 7.2 Estructuras coherentes observadas en el flujo sobre formas de fondo bidimensionales fijas *Caso no canónico unifásico* y mecanismos de transporte.

Las diferentes regiones se caracterizaron por la dinámica de los vórtices típicos observados. En la lámina 7.1 se presenta un esquema con las diferentes regiones de una forma de fondo.

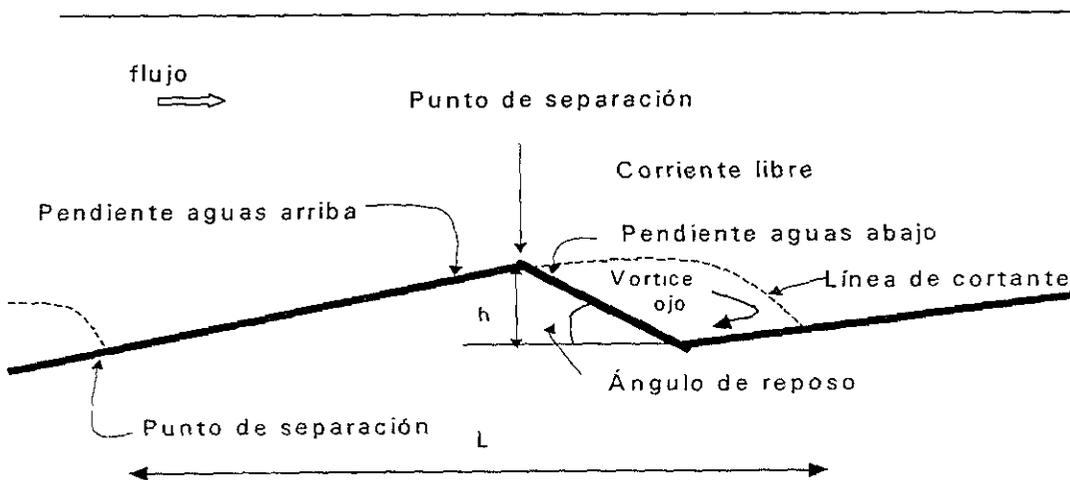


Lámina 7.1. Esquema descriptivo de las características de una duna.

### 7.2.1. Separación de flujo y ondas de Kelvin

En la región ubicada detrás de la cresta de la forma se observó que si se introduce tinta en la cresta se generan ondulaciones que se separan del borde de la duna. Estas crecen, se hacen inestables, y se rompen arrastrando fluido hacia la pared en la pendiente aguas abajo de la duna, lo que concuerda con observaciones previas

por otros investigadores, entre ellos Simpson (1989), Müller (1992 y 1995), Bennett y Best (1996). Los remolinos que se generaron provocaron el movimiento de las partículas, es muy probable que las oscilaciones casi periódicas producidas por estos remolinos produzcan cambios en la longitud de la región de recirculación y sean las responsables del crecimiento de las formas de fondo.

#### 7.2.1.1 Separación.

El flujo en la separación y en la capa de mezclado es tridimensional e intermitente. La separación sucede de diferentes maneras como se muestra en la lámina 7.1. De acuerdo con Müller y Gyr (1992) los modos de separación cambian de un modo a otro a lo largo de la cresta (en sentido transversal al flujo), y a través del tiempo.

Caso 1. Separación normal donde el flujo de recirculación sigue la pendiente aguas debajo de la cresta en sentido contrario al flujo y emerge con la corriente principal en la cresta.

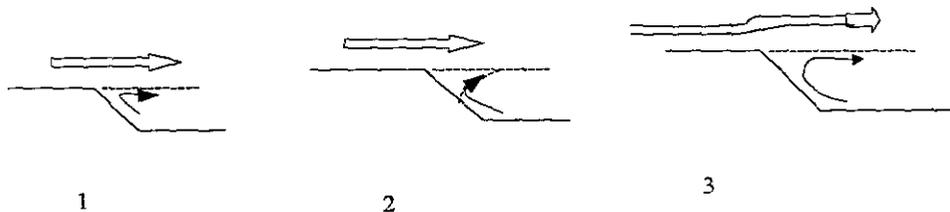


Lámina 7.2. Modos de separación observados por Muller, 1992.

Caso 2. El flujo de recirculación se separa (en la pendiente aguas abajo de la cresta) antes de que este alcance la cresta.

Caso 3. Observado en este estudio con inyección de tinta en la capa límite. El fluido se levantó desde la pared, en la pendiente aguas arriba de la cresta, antes de llegar a la cresta. Esto demuestra que existe una continua interacción de la capa límite aguas arriba con las estructuras de la zona de mezcla. La línea de separación de flujo sobre la cresta fue estirada y curvada intermitentemente. Las formas de separación del flujo fueron semejantes a las descritas por Müller.

En el caso 1. Se observó la separación normal, en donde el fluido se despegó siguiendo una trayectoria casi recta en su tramo inicial y más adelante se muestran ondulaciones en ambos sentidos (longitudinal y transversal).

Caso 2. La separación en la pendiente aguas abajo de la cresta ocurre tal, como se presentó en el estudio de la topología del flujo, cuando se empieza a romper la estructura de mayor tamaño en otras de menor escala se forman otros vórtices dentro de la estructura del vórtice ojo. En esta fase el material de la cresta de la duna fue arrastrado por esta separación y cierto material se levantó hacia el flujo medio como se explicará en la sección donde se traten los eventos denominados boils.

Caso 3. La separación ocurre antes de que el flujo llegue a la cresta de la duna, este evento se presentó por el rompimiento del vórtice ojo, que produjo flujo inverso en la cresta de la duna. En el caso de estudio se observó que la tinta se levantó en movimientos helicoidales, posteriormente, la corriente estiró estos vórtices y los arrastró. En planta se observaron igual que en casos anteriores, ondulaciones de la tinta.

#### 7.7.1.2 Capa cortante detrás de la cresta.

Sobre la cresta de la duna el flujo medio interactúa con el flujo de la zona de recirculación generando una capa cortante donde se presentaron inestabilidades del tipo Kelvin-Helmholz evolucionando las pequeñas perturbaciones que se manifestaron inicialmente como ondas en pequeños vórtices transversales al flujo (estas ondas fueron identificadas por Muller (1985)).

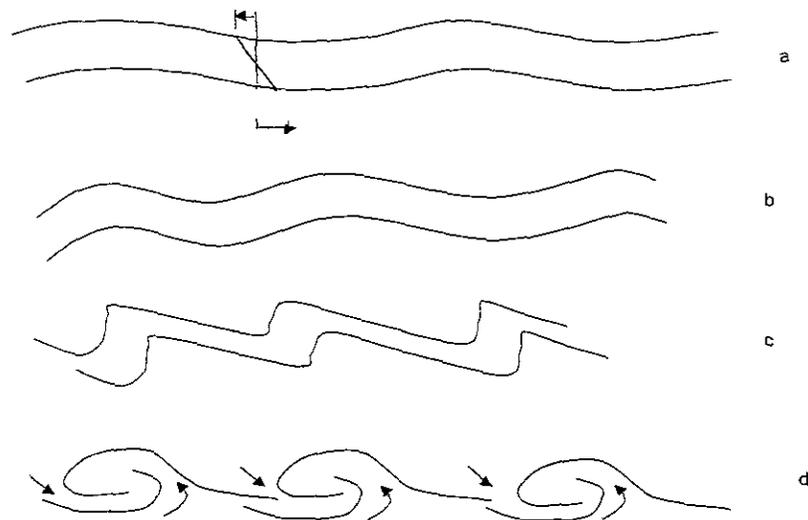


Lámina 7.3 Diagrama esquemático de la inestabilidad inicial de la capa cortante, y el enrollamiento en vórtices discretos.

La región entre dos corrientes paralelas moviéndose a diferentes velocidades es la forma más simple de una capa cortante, el control del movimiento se debe a la diferencia de velocidad a través de la capa cortante. La velocidad en un punto fijo es función del tiempo y tiene fuertes fluctuaciones de fase aleatoria. Estas propiedades aleatorias del campo turbulento hacen el problema muy difícil. En la actualidad no se tiene una teoría determinista que prediga el campo de flujo en forma detallada. No obstante que no se conozcan los detalles del desarrollo de la capa cortante, parece claro que estas estructuras toman energía de la diferencia de velocidades entre las dos capas. La capa de mezclado crece por un proceso de repetición de los llamados *vortex pairing*, en el que los vórtices adyacentes interactúan para formar un solo vórtice de mayor tamaño. En la lámina 7.3, se muestra esquemáticamente la evolución de las ondas en vórtices.

Los esfuerzos turbulentos más intensos ocurren en la parte media de la capa cortante y se deben principalmente a estructuras de tamaño grande. Las fluctuaciones de presión producidas por estas estructuras son fuertes e influyen la zona de baja velocidad. Debido a que el flujo detrás de la forma tiene que encontrar una salida hacia el flujo externo, existe una fuerte interacción entre las fluctuaciones de presión y velocidad. El proceso de separación esta fuertemente

relacionado con el transporte de momentum y energía hacia la pared. La energía que aporta el flujo externo hacia la pared divergente sobre una área que se incrementa, es lo que determina la localización del punto de separación y el comportamiento del flujo aguas abajo

Conforme se incrementa el tamaño de las formas de fondo la magnitud y la frecuencia de las eyecciones relacionadas con estructuras coherentes o vórtices que se desprenden en la capa cortante, se incrementa penetrando en la región externa e interactuando con la superficie libre del agua. Esto a su vez puede inducir mayores velocidades del fluido hacia la pared. En este punto se hace notar las fuertes inflexiones que se observaron en los perfiles de velocidad medidos en donde se apreció que existen dos regiones críticas, una cerca de la cresta de la forma o de la pared inferior y la otra a una altura  $y/H \approx 0.6$  en los dos casos se nota que los efectos de la superficie libre juegan un papel importante sobre todo para el caso de formas de fondo grandes en relación con el tirante y que en la mayoría de las investigaciones no se ha considerado.

### 7.2.2 Vórtices verticales semejantes a pequeños tornados.

Observados al inyectar tinta en un punto donde se inicia la forma siguiente, estos vórtices se generaron en número diferente, aparecieron y desaparecieron intermitentemente de manera que siempre se observaron algunos semejantes a tornados en miniatura que en su trayectoria vertical oscilaron, y su movimiento generó círculos en un plano x-z. Estos crecieron hasta el nivel de la cresta de la forma, y a partir de esa altura fueron barridos por el flujo sobre la cresta. Estos vórtices se contorsionaron fuertemente, rompiéndose y transformando la topología local del flujo. Fue muy difícil seguir el comportamiento de estos pequeños vórtices, por la rapidez de cambio, por su número y por los fuertes movimientos tridimensionales. La capa cortante interactuó fuertemente con el fluido en reposo detrás de la cresta y generó este tipo de estructuras que son importantes en el proceso de transporte de sedimentos.

El mecanismo de generación de estos vórtices se puede deber a la capa de agua que sale sobre la cresta a manera de un chorro y que produce fuertes cortantes en la masa de agua refrenada detrás de la cresta. Este mecanismo debe ser semejante al que genera los vórtices, huracanes y tornados (Levi, 1972). De acuerdo con Levi, se requieren dos elementos para su modelo de vórtices, una masa de fluido estática y un chorro sobre esta. Se puede establecer que los vórtices generados son vórtices sin fricción asociados a un chorro de agua acelerado o desacelerado, que en este caso sería un chorro de agua que se desacelera con el cambio de sección. Una característica de este tipo de vórtices es que su eje es normal a la intercara, y aparecen en condiciones de inestabilidad de flujo como es el caso de una corriente que se expande o converge entrando en contacto con una capa de fluido quieta o estancada. En este modelo una porción del exceso de momentum del chorro es transferida a la fuerza centrífuga de los vórtices. Detrás de las formas existen fuertes inestabilidades del flujo, asimismo el número de remolinos que se observó cambió continuamente. Esto se interpreta como el cambio continuo para lograr el equilibrio de energía y momentum.

### 7.2.3. Vórtices longitudinales tipo cono que crecen como espiral en dirección de la corriente.

Estos vórtices se originaron en la pendiente aguas abajo de la cresta y se movieron en la dirección de la corriente principal y a su vez hacia la superficie libre del agua. Estas estructuras se observaron en la visualización de burbujas de hidrógeno. En el caso de estudio se observó que estas estructuras fueron absorbidas por el flujo medio. Dichos vórtices arrastraron partículas hacia el flujo medio. Kaftori *et al* (1994), quien realizó estudios de estructuras turbulentas y del transporte de partículas, en una capa límite sobre un canal con fondo plano, observó estructuras semejantes a vórtices tipo cono. De acuerdo con sus observaciones y mediciones, propuso una estructura de gran tamaño en forma de vórtice longitudinal que se expande en dirección de la corriente como se ilustra en la lámina 7.4. Estas estructuras no necesariamente aparecían en parejas pero en promedio unas

mantenían la circulación en un sentido y la otra mitad en sentido contrario. Según Kaftori, las estrías de partículas se formaron por la acción de regiones de flujo de alta velocidad. Estas regiones de alta velocidad las identificó como vórtices tipo cono, las estructuras empujaron las partículas fuera de su camino, creando avenidas de partículas a ambos lados del patrón vorticoso. Cuando las partículas fueron pequeñas, y los vórtices fueron suficientemente energéticos para levantarlas, la mayoría de las partículas se levantaron mientras que unas cuantas fueron empujadas hacia los lados, consecuentemente las estrías que formaron no contenían muchas partículas. Cuando las partículas fueron suficientemente grandes para ser levantadas, pocas fueron levantadas, y la mayoría fueron empujadas a ambos lados, formando estrías cargadas de partículas.

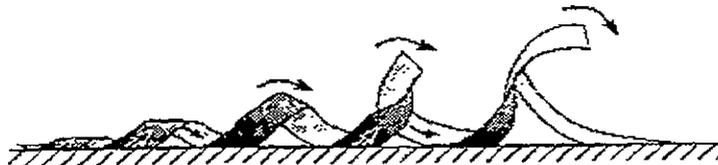


Lámina 7.4 Vórtices tipo cono.

Las partículas se dirigieron con un cierto ángulo con respecto al flujo principal por la rotación del vórtice cono. Las partículas pueden seguir diferentes caminos dependiendo de la combinación de diferentes efectos, por ejemplo la relación de densidades partículas-agua, trayectorias de otras partículas en el fluido, energía cinética y de inercia de la partícula y el fluido. Una opción es que la partícula sea levantada simplemente con el vórtice hacia la región de flujo externo, otra es que salga del vórtice debido a la gravedad, o inercia o simplemente sea levantada en suspensión cuando el vórtice se disipe en el flujo medio. Otra opción es que la partícula sea empujada a los lados hacia arriba, hacia fuera del vórtice que la levantó. Esta partícula podría sedimentarse o ser absorbida por un vórtice vecino. Otra posibilidad es que la partícula suspendida, complete un ciclo, y regrese con el mismo vórtice hacia la pared donde se deposite o entre en suspensión nuevamente.

#### 7.2.4 Remolinos o vórtices transversales a la dirección del flujo

con un eje paralelo a la cresta de la duna. Estos remolinos se originaron en la zona de estancamiento cuando la línea de separación de flujo se curvó y se pegó en la pendiente ascendente de la forma siguiente. Las partículas de sedimento entraron en suspensión por los vórtices detrás de la cresta. Cuando la fuerza de gravedad sobre las partículas fue mayor que la fuerza de arrastre de los remolinos las partículas cayeron y quedaron depositadas en la pendiente aguas abajo de la cresta. De lo contrario cuando el momentum ascendente fue mayor que la fuerza de gravedad, las partículas se suspendieron y formaron parte del transporte en suspensión. El material que entró en suspensión pudo seguir trayectorias circulares detrás de la cresta o ser arrastrada por la corriente u otras estructuras en el momento de cambio de fase.

El desprendimiento intermitente del vórtice que encierra la zona de recirculación está relacionado con las inestabilidades que se producen en la cresta, la cual es un punto crítico donde el comportamiento del flujo cambió debido al cambio en la pendiente de la forma en el fondo del canal. En el punto donde se pega nuevamente el flujo, hay una bifurcación de las líneas de corriente, unas se corrieron hacia la pendiente de la forma siguiente y otras se pegaron a la frontera y corrieron en dirección contraria a la del flujo. Esto produjo una socavación local que avanzó en la dirección de la corriente, ver lámina 7.5.

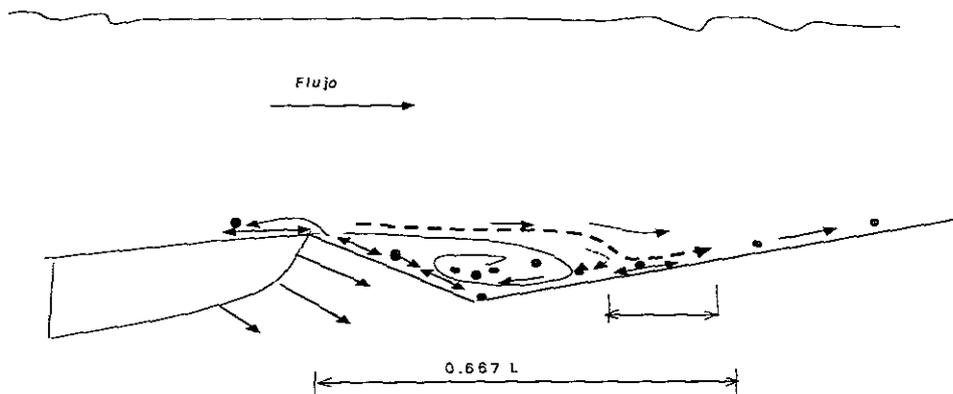


Lámina 7.5. Suspensión de partículas por el vórtice ojo transversal al flujo.

### 7.2.5 Boils.

Algunos investigadores relacionan la generación de boils con la presencia de dunas, entre ellos Lane,(1944); Matthes,(1947); y Coleman,(1969), otros sugieren que no es necesario que existan formas de fondo para la generación de boils como Jackson,(1976), y Allen (1986). Otros estudios como los de Dyer (1986), Muller y Gyr (1986) sugieren que los boils resultan de la separación del flujo en el lado aguas abajo del obstáculo (dunas) ver lámina 7.6. Levi (1983) dice que si una masa de fluido de espesor  $d$ , restringida en su movimiento es excitada por un flujo externo de velocidad,  $U$ , existe una tendencia a oscilar con frecuencia  $f$ , dada en forma aproximada por la ley universal de Strouhal

$$S_t = fd / U$$

Esta ley general de inestabilidad describe muchas características casi periódicas de la actividad turbulenta, incluyendo la generación de boils en ríos y estuarios. La escala del flujo restringido esta dada por la longitud de escala del obstáculo lo que puede ser la forma de fondo. El número de Strouhal,  $S$ , es una relación empírica entre la frecuencia de desprendimiento de vórtices,  $f$ , el diámetro del obstáculo,  $d$ , la velocidad de la corriente libre,  $U$ , y el número de Reynolds,  $Re$  y esta dado por:

$$S = fd / U = 0.198[1 - (19.7/Re)]$$

Esta relación fue formulada para el caso de desprendimiento de vórtices detrás de cilindros en una corriente libre, en este caso el número de Strouhal es un concepto de la medición de la frecuencia de desprendimiento de los vórtices en una forma cualitativa. Acular y Smith (1987) mostraron que  $S$  se incrementa linealmente con  $Re$  arriba de  $Re \approx 1600$ . Kirkbride, A., (1993) propone que los desprendimientos de vórtices se describen más apropiadamente como intermitentes que como periódicos. Kostaschuk y Church (1993) sugieren una relación de Strouhal para describir la periodicidad  $T$  de los boils como:

$$T = 2\pi d/U$$

Kostaschuck y Church (1993) arguyen que pueden existir muchos mecanismos de generación de los boils y que las escalas de longitud seleccionadas dependerán del mecanismo en particular. Las discrepancias que notaron entre los periodos de boils predichos y medidos las relacionaron con la incapacidad de conocer el lugar de origen de los boils. Lapointe (1989) notó que es necesario relacionar la frecuencia e intensidad de los eventos turbulentos en función de la geometría de las formas de fondo y los patrones de flujo.

Coleman (1969) encontró que había una conexión entre las bandas paralelas de actividad de boils producidas por celdas de circulación secundaria. En los estuarios los boils levantan grandes cantidades de sedimento, la localización de los sitios de producción cambia intermitentemente, por lo que hace pensar que el origen de los boils este más relacionada con los cambios locales por las formas de fondo que con el movimiento de las celdas de flujo secundario. La producción de boils observada en lugares estacionarios por investigadores como Lane(1944) y Coleman(1969) puede de hecho estar relacionada con parámetros de formas de fondo estables. Lapointe (1992) relacionó cualitativamente la intensidad de los boils a la rugosidad relativa, Babakaiff y Hickin (1996) observaron una relación inversa entre rugosidad relativa del fondo y la periodicidad del boil. Sin embargo para relaciones de RR (rugosidad relativa relativa H/h) mayores de 0.2 no observaron

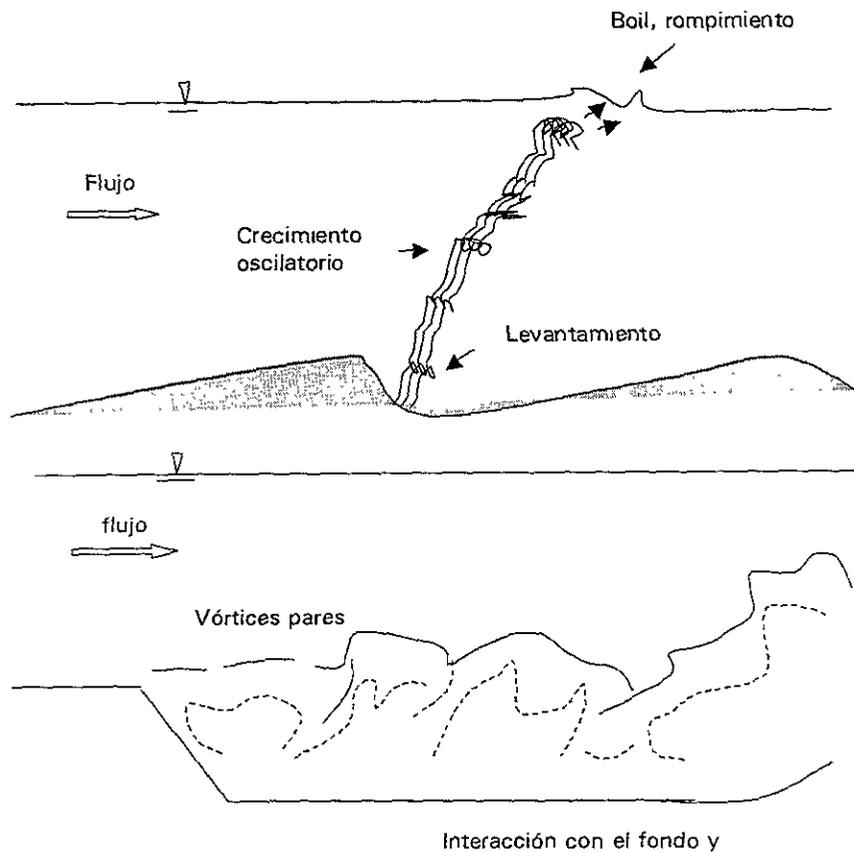


Lámina 7.6. Origen de los boils a partir de la pendiente aguas abajo de la duna. a) según Jackson (1976). b) flujo detrás de una duna, la visualización ilustra el desprendimiento de vórtices (Müller y Gyr 1986).

variación en la periodicidad de los boils por lo que Korchokha (1968) concluyó que el periodo no cambia (es invariante) con el tirante. Bobakaiff y Hickin de acuerdo con sus investigaciones indicaron que el parámetro crítico para explicar la intensidad y periodicidad de los boils es la rugosidad de la duna, sin embargo la pendiente de la duna también puede ser importante.

Como se sabe, el vórtice detrás de un rizo no existe en forma continua sino intermitentemente. Tanto en el tiempo como en el espacio la frecuencia de ocurrencia del vórtice satisface en promedio la siguiente relación:

$$f \cdot A_r = 1/T$$

donde  $f$  es la frecuencia de ocurrencia del vórtice; y  $A_v$  es el área representativa ocupada por el vórtice. Sin embargo, de acuerdo a Ikeda y Asaeda (1983):

$$UT/h = \text{cte}$$

Para confirmar esta relación y determinar el valor constante, Asaeda *et al* (1989) realizaron un experimento en un canal de 20 m de largo y 40 cm de ancho. El fondo lo cubrieron con cuatro centímetros de arena uniforme para investigar el periodo de formación de los vórtices en el flujo. Encontraron una variación del parámetro  $UT/h$  como función del número de Reynolds.

La estructura del flujo turbulento comprende un espectro de frecuencias superpuestas causadas por una multitud de vórtices de varios tamaños. Los vórtices formados de la inestabilidad causada por el cortante de las capas de fluido moviéndose a diferentes velocidades y por la fricción entre la pared del fluido. El tamaño de los vórtices  $\lambda$  puede variar desde escalas de Kolmogorov del orden  $\nu/U_*$ , al espesor del tirante de agua  $H$ .

$$\nu/U_* \leq \lambda \leq H$$

donde  $\nu$  es la viscosidad cinemática y  $U_*$  es la velocidad cortante, estas escalas pueden transformarse en escalas temporales aplicando la hipótesis de Taylor  $T = \lambda/U$ , donde  $T$  es el periodo  $U$  es la velocidad media local aguas abajo. En términos de la velocidad de la corriente libre  $U_0$ , los periodos de los vórtices verticales  $T_v$  pueden quedar comprendidos en los siguientes rangos (Yalin 1992)

$$\alpha[\nu/U_*]/U_0 \leq T_v \leq \beta H/U_0$$

donde  $\alpha, \beta$  son coeficientes.  $\beta$  varía entre 3 y 7 con una media de 6 (Yalin 1992). Los rangos más altos representan las macro-escalas-turbulentas propuestas por Rao *et al.* (1971). Levi (1983) propuso que el mayor rango seguía la Ley de Strouhal y que  $\beta = 2\pi$ . Estos representan vórtices turbulentos cuyo eje de rotación es perpendicular al eje  $x$  (aguas abajo), y plano (vertical). En flujo en canales los

vórtices también se forman con su eje de rotación perpendicular a la horizontal  $x, z$ . La escala de tiempos  $T_h$  de estos vórtices horizontales según Yalin es :

$$T_h = \beta B/U_0$$

donde  $B$  es el ancho del canal. Yokosi (1967), basado en mediciones en el río Uji, encontró que  $\beta$  fue del orden de 9. De acuerdo con un estudio de correlaciones espacio-temporales de vórtices boils-kolks; Nezu *et al* (1997) explicaron el mecanismo de producción de estos vórtices como la interacción entre el flujo aguas arriba del desprendimiento de vórtices detrás de la cresta y los efectos de aceleración-desaceleración causados por la inestabilidad como se muestra en la lámina 7.7.

El objetivo principal fue estudiar la actividad turbulenta llamada boil, a partir de visualización de flujo con técnica de inyección de tinta y seguimiento de burbujas de hidrógeno. La filmación simultánea en video de la visualización en dos planos (en planta y en corte) identificar estas estructuras, su origen, características como son; sus escalas espacio temporales, su velocidad de convección, ángulo de levantamiento y dar una explicación del fenómeno; el origen, la evolución y dinámica. Relacionar propiedades de la actividad boil con las formas de fondo y los parámetros hidráulicos del flujo.

1. ACELERACIÓN DEL FLUJO
2. VORTICES SEPARADOS DE LA CRESTA DE LA DUNA
3. FLUJO INTERMITENTE HACIA ARRIBA
4. FLUJO INTERMITENTE HACIA ABAJO (REATTACHMENT)
5. VORTICES INCLINADOS KOLKS
6. VORTICES CIRCULARES BOILS

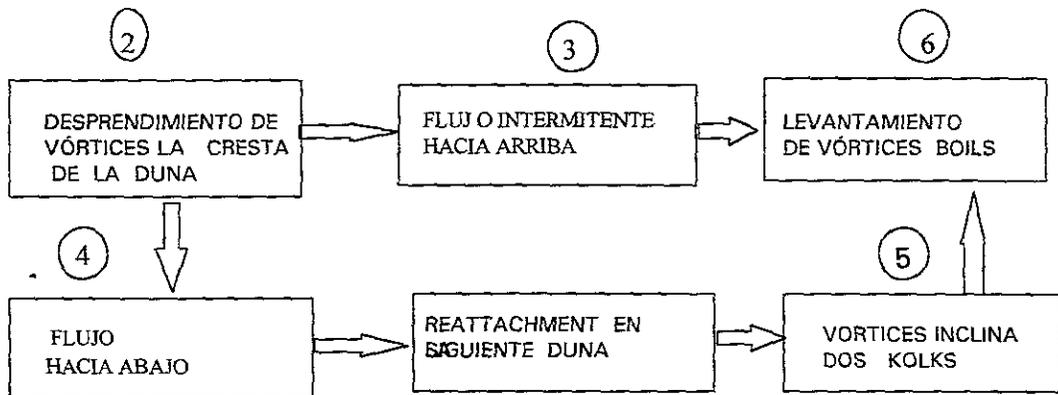
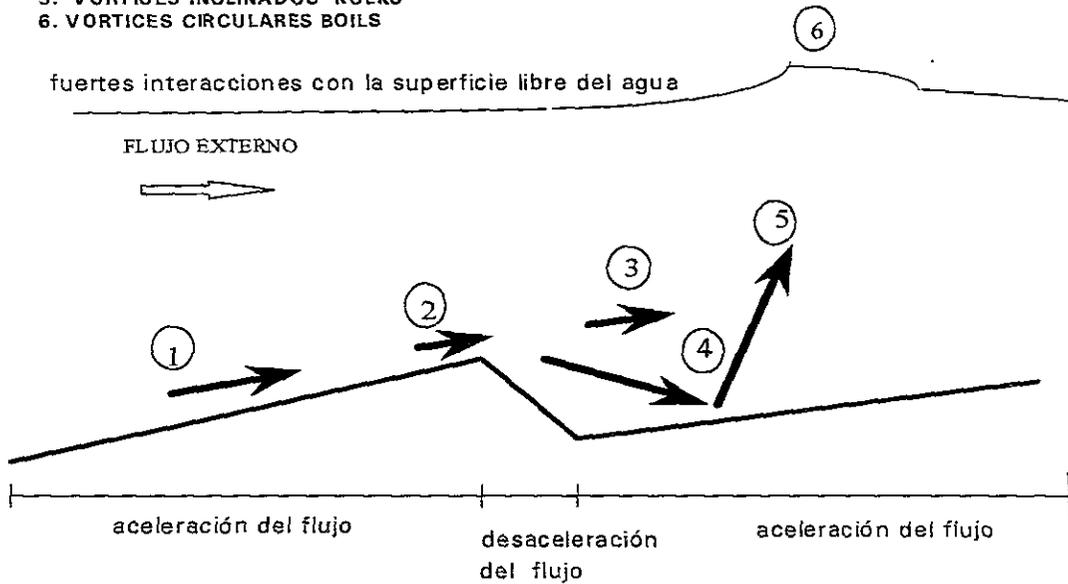


Lámina 7.7 Mecanismo de producción de boils, Nezu *et al* 1997.

#### 7.2.5.1 Detección de eventos Boils.

El estudio de las macro-estructuras turbulentas denominadas boils se realizó a partir de los videos de un experimento típico con los datos que se especifican a continuación:

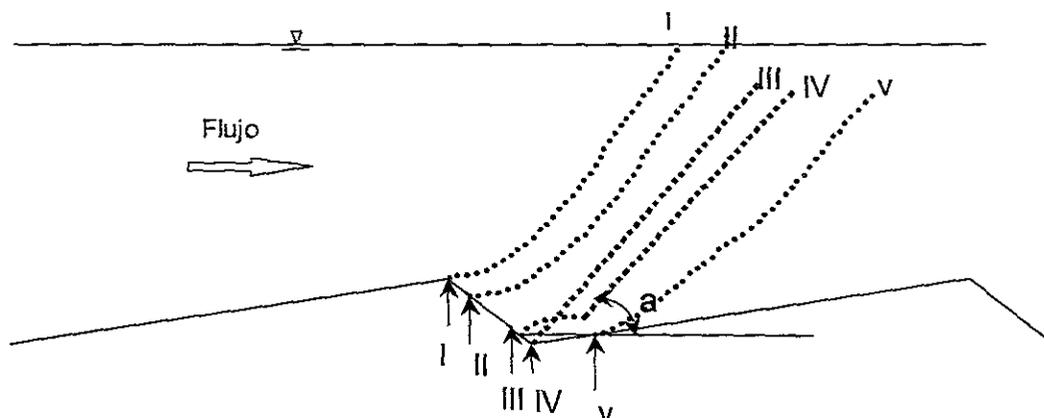
Experimento	Q (m <sup>3</sup> /s)	H (m x 10 <sup>-2</sup> )	u (m/s x 10 <sup>-2</sup> )	Fr	Re
3	0.0184	8.0	23.0	0.2596	18,400

Tabla 7.1 Características del experimento tipo

La técnica usada fue la de seguimiento de partículas de sal cuadro por cuadro a partir de su levantamiento hasta que la partícula alcanzó el punto más alto. Se detectaron en el video eventos de levantamiento de partículas con origen en cinco puntos diferentes detrás de las formas de fondo; en la cara aguas abajo de la cresta ver lámina 7.8. En total se estudiaron cien eventos. Con el fin de analizar estos eventos que relacionamos con los boils, se obtuvieron los siguientes parámetros: punto de origen, distancia recorrida, horizontal y vertical, tiempo de duración y tiempo entre eventos, a partir de estos datos se obtuvo su velocidad de convección y su periodo.

### 7.2 .5.2 Características de los Boils

En general el comportamiento de los eventos boils analizados fue semejante al reportado con anterioridad por diversos investigadores, en este estudio la mayoría de los boils alcanzaron una altura del 60% del tirante y muy pocos alcanzaron la superficie libre del agua. De acuerdo con el sitio de origen los eventos se clasificaron en 5 tipos (del I al V) los cuales se muestran esquemáticamente en la lámina 7.9. El tipo I con su origen en la parte superior de la cresta de la duna, el tipo II a una pequeña distancia aguas abajo de la cresta, tipo III en un punto cercano al más bajo de la pendiente aguas abajo de la cresta, tipo IV en el punto más bajo detrás de la cresta y tipo V en el punto de reattachment. En la tabla 7.2 se presentan los resultados de los cien eventos analizados y los principales parámetros que los caracterizan.



Origen y trayectorias de las partículas seguidas para la caracterización de los eventos

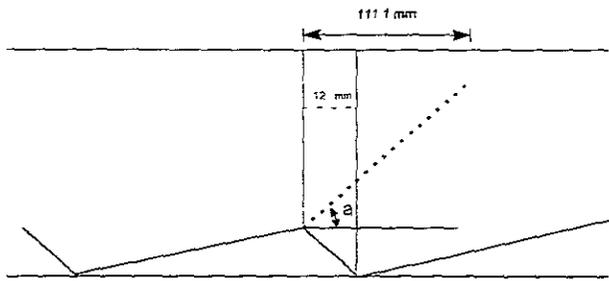
Lámina 7.8. Puntos de desprendimiento de partículas.

En las láminas 7.11,7.12,7.13,7.14,7.15 se esquematizaron las características típicas de cada tipo de eventos. En la tabla 7.3 se presenta el periodo  $T$  y el parámetro  $UT/H$  para cada evento. En la tabla 7.3 se presentan en resumen la velocidad de convección, ángulo de levantamiento y posición de origen.

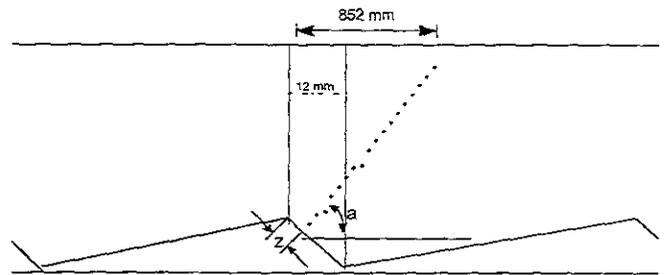
Tabla 7.2. Parámetros característicos de los eventos *boils* analizados.

Evento	T	UT/H	Evento	T	UT/H
1	2.000	5.750	51	2.326	6.686
2	2.326	6.686	52	2.500	7.188
3	2.500	7.188	53	2.326	6.686
4	3.030	8.712	54	1.887	5.425
5	3.333	9.583	55	2.174	6.250
6	2.778	7.986	56	2.000	5.750
7	3.333	9.583	57	2.500	7.188
8	2.174	6.250	58	2.500	7.188
9	2.326	6.686	59	1.887	5.425
10	2.778	7.986	60	2.326	6.686
11	3.030	8.712	61	2.326	6.686
12	3.030	8.712	62	1.786	5.134
13	2.000	5.750	63	1.887	5.425
14	2.500	7.188	64	3.030	8.712
15	2.500	7.188	65	2.326	6.686
16	2.500	7.188	66	1.887	5.425
17	1.587	4.563	67	3.333	9.583
18	1.786	5.134	68	2.778	7.986

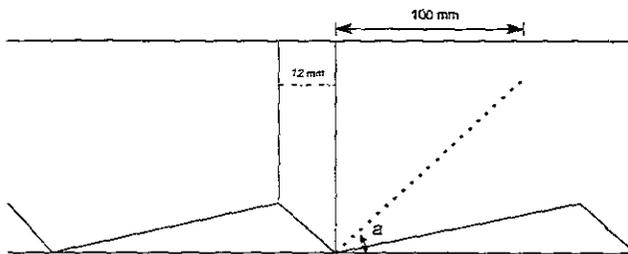
Evento	T	UT/H	Evento	T	UT/H
19	1.786	5.134	69	3.030	8.712
20	1.587	4.563	70	2.000	5.750
21	3.846	11.058	71	3.846	11.058
22	2.000	5.750	72	2.174	6.250
23	2.326	6.686	73	2.174	6.250
24	2.326	6.686	74	2.778	7.986
25	1.887	5.425	75	2.778	7.986
26	1.786	5.134	76	1.587	4.563
27	1.887	5.425	77	2.326	6.686
28	1.667	4.792	78	3.030	8.712
29	1.786	5.134	79	2.500	7.188
30	2.174	6.250	80	1.667	4.792
31	1.667	4.792	81	1.887	5.425
32	1.587	4.563	82	2.174	6.250
33	3.333	9.583	83	1.515	4.356
34	2.000	5.750	84	1.587	4.563
35	2.326	6.686	85	1.887	5.425
36	2.000	5.750	86	1.587	4.563
37	2.500	7.188	87	2.500	7.188
38	1.786	5.134	88	1.587	4.563
39	2.500	7.188	89	2.000	5.750
40	2.000	5.750	90	1.786	5.134
41	1.887	5.425	91	1.786	5.134
42	1.887	5.425	92	2.778	7.986
43	2.500	7.188	93	2.000	5.750
44	2.174	6.250	94	3.030	8.712
45	2.326	6.686	95	4.348	12.500
46	2.326	6.686	96	3.030	8.712
47	1.887	5.425	97	2.326	6.686
48	2.000	5.750	98	2.500	7.188
49	2.174	6.250	99	2.500	7.188
50	2.174	6.250	100	2.500	7.188



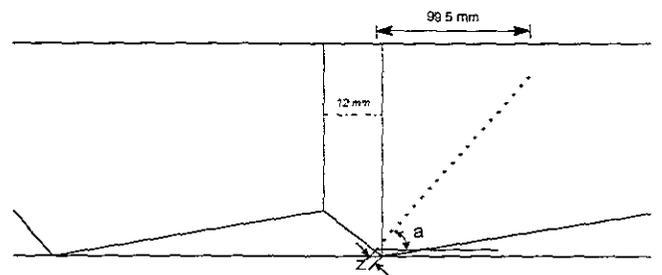
Características de los eventos "boils" tipo I



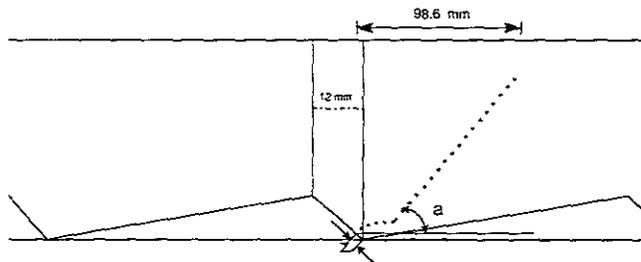
Características de los eventos de "Boils" tipo II



Características de los eventos de "Boils" tipo III



Características de los eventos de "Boils" tipo IV



Características de los eventos de "Boils" tipo V

Lámina 7.9. Puntos de levantamiento de partículas observados en el presente estudio, relacionados con los boils.

**EVENTOS DE TIPO I**

No. de Eventos. 23

Tiempo de duración: 0.48 s ;

Velocidad de convección:  $V_x: 19.045 \text{ cm/s}$  ;  $V_y: 14.47 \text{ cm/s}$

ángulo: 30-50°

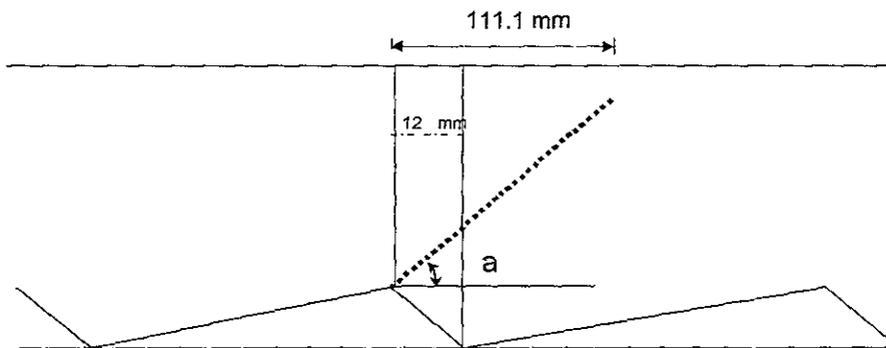


Lámina 7.10. Características de los eventos boil tipo I

**EVENTOS DE TIPO II**

No. de Eventos: 11

Tiempo de duración: 0.397 s

Velocidad de Convección:  $V_x : 20.13 \text{ cm/s}$        $V_y : 13.37 \text{ cm/s}$

ángulo: 30°      Z: 0.15 cm

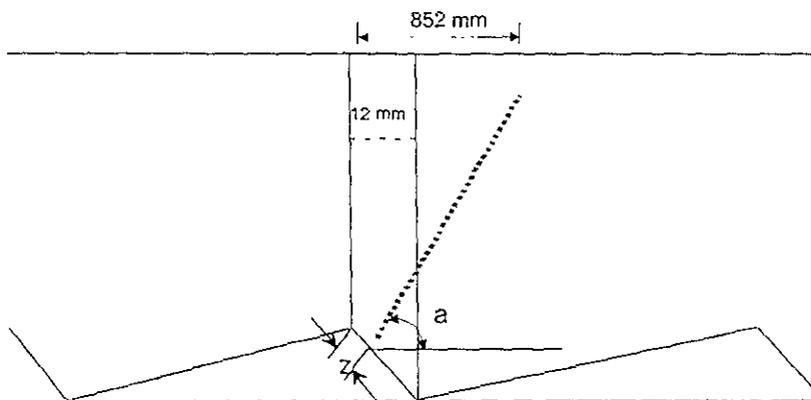


Lámina 7.11. Característica de los eventos boils tipo II.

**EVENTOS DE TIPO III**

**No. de Eventos: 7**

Tiempo de duración: 0.42 s

Velocidad de Convección:  $V_x: 20.05 \text{ cm/s}$   $V_y: 7.17 \text{ cm/s}$

$a: 30^\circ\text{-}50^\circ$

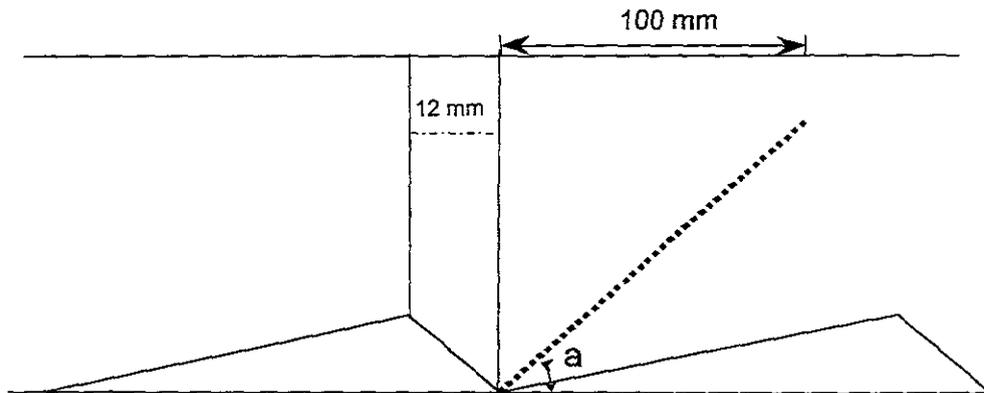


Lámina 7.12. Características de los eventos boils tipo III.

**EVENTOS TIPO IV**

**No. De Eventos : 53**

Tiempo de duración: 0.46 s

Velocidad de convección:  $V_x=19.11 \text{ cm/s}$ ;  $V_y=17.78 \text{ cm/s}$

ángulo:  $30^\circ\text{-}50^\circ$   $Z=0.74$

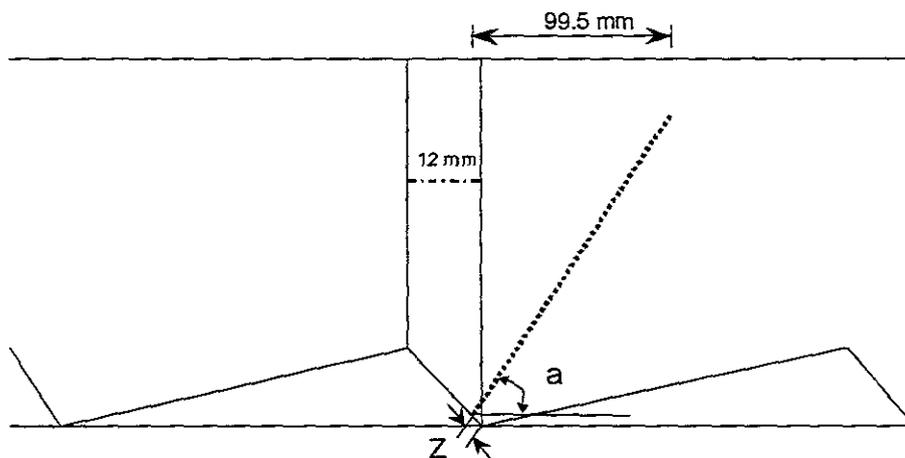


Lámina 7.13. Características de los eventos boils tipo IV

**EVENTOS TIPO V**

No. de Eventos: 6

Tiempo de duración: 0.513 s

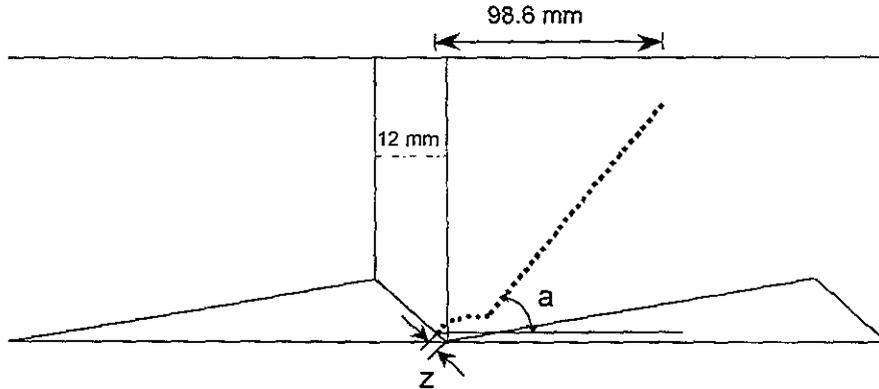
Velocidad de Convección:  $V_x = 18.45 \text{ cm/s}$  ;  $V_y = 6.16 \text{ cm/s}$ ángulo:  $20^\circ - 50^\circ$ 

Lámina 7.14. Características de los eventos boils tipo V

Tabla 7.3 Características de los diferentes tipos de boils observados

Estructuras Boils	$U_c/U_o$	$\alpha$	$\alpha_{med}$
Tipo I	0.827	$30^\circ - 50^\circ$	$37^\circ$
Tipo II	0.875	$20^\circ - 40^\circ$	$30^\circ$
Tipo III	0.872	$30^\circ - 50^\circ$	$46^\circ$
Tipo IV	0.83	$30^\circ - 50^\circ$	$47^\circ$
Tipo V	0.81	$20^\circ - 50^\circ$	$29^\circ$

Como puede observarse para los eventos tipo I, III y IV el ángulo de levantamiento es del orden de  $30^\circ$  a  $50^\circ$  su velocidad de convección y su ángulo de levantamiento es semejante al reportado por Best (1993) para el caso de vórtices tipo horquilla cuyo ángulo de desprendimiento fue de  $\approx 45^\circ$ .

Los eventos tipo II y V fueron poco frecuentes, su velocidad de convección fue ligeramente menor a la de los otros tipos de eventos y el ángulo de levantamiento fue de aproximadamente  $30^\circ$ . En estos casos el origen de los eventos es dentro del vórtice tipo ojo y se tiene la hipótesis que la partícula interactúa con una circulación que no le permite avanzar tan rápidamente y en

el caso V la partícula inicialmente es desviada en forma de pequeño ovalo para después tomar una trayectoria recta hacia la superficie libre.

A diferencia de otros estudios en este se pudo comprobar que los puntos de origen de levantamiento de partículas correspondían con los puntos denominados sillas o puntos de separación que se presentaron en la revisión de la topología de flujo lámina 6.16. La casi periodicidad está relacionada con los cambios casi-periódicos de las configuraciones topológicas y como se dijo anteriormente forman parte de la dinámica del flujo detrás de las dunas.

Las características espacio-temporales obtenidas en el presente estudio se pueden comparar con las reportadas. Si se consideran las escalas de Kolmogoroff el tamaño de los vórtices  $\lambda$  sería:

$$v/U_* = 4.34 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$H = 0.08 \text{ (el tirante)}$$

$$4.34 \times 10^{-5} \text{ m} \leq \lambda \leq 0.08 \text{ m}$$

Los periodos de los vórtices verticales de acuerdo con Yalin (1992), se tiene:

$$T_v \leq \beta H / U_f$$

Si se toma  $\beta = 2\pi$  de acuerdo con Levi (1983)

$$T_v \leq 2.185 \text{ s}$$

Se puede observar que los periodos de los eventos observados se encuentran en este rango.

#### 7.2.5.3 Comparación con otros autores.

Con el fin de comparar los resultados con los reportados se realizaron gráficas típicas y se observó el comportamiento de los parámetros característicos del caso de estudio. En primer lugar se incluyeron los datos del presente estudio en la gráfica presentada por Asaeda *et al* (1989) de  $UT/H$  vs  $Re$ , que se muestra en la lámina

7.15 y en donde se aprecia que los valores obtenidos en el caso del presente estudio del flujo sobre formas de fondo fijas para  $Re=18,400$ , corresponden bastante bien con los resultados experimentales de Asaeda. En esta lámina se revela un valor constante del parámetro  $UT/H$  de aproximadamente 7.5 que es semejante al obtenido por otros investigadores. Para considerar los efectos de la rugosidad relativa  $RR$  se tomó la lámina de Babakaiff y Hickin (1996) de  $RR$  vs  $Re$  ver lámina 7.16. En esta se incluyó el caso de estudio observándose que se encuentra en el rango reportado por diversos investigadores.

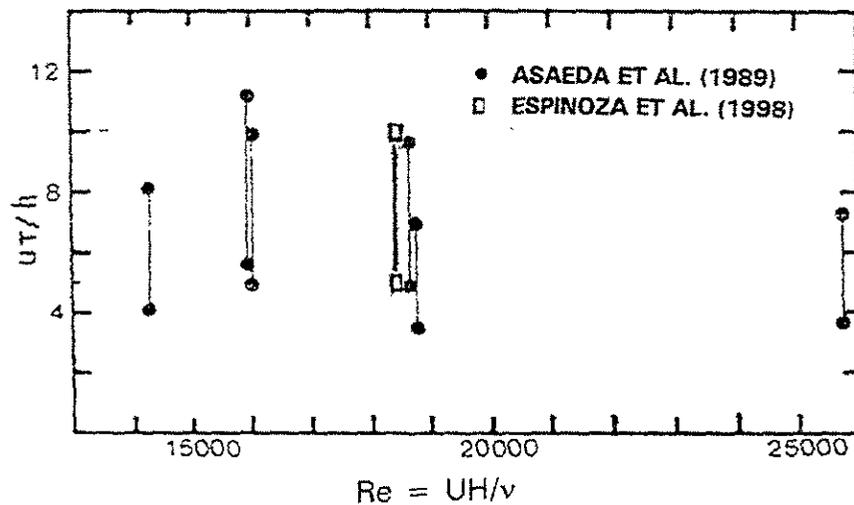


Lámina 7.15. Período adimensional  $UT/H$  contra  $Re$

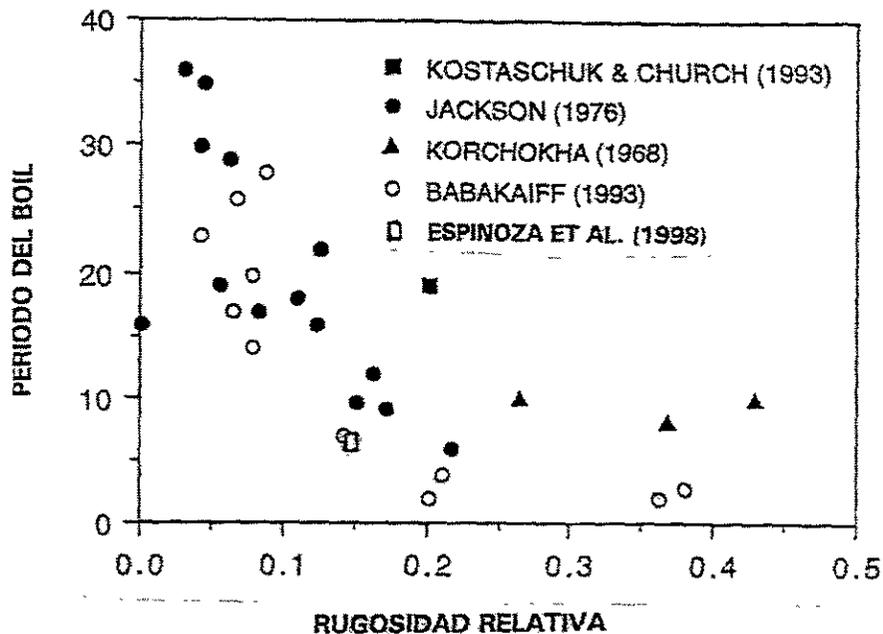


Lámina 7.16. Periodo del boil contra rugosidad relativa

Las características espacio temporales concuerdan muy bien con las reportadas por diversos investigadores. Una observación importante es que en la mayoría de las investigaciones se consideran los eventos boils en ríos con un criterio de selección eligiendo un umbral a partir del cual el evento se considera boil o no. En la presente investigación se consideró boil al levantamiento de una partícula hacia la superficie libre del agua y en general las partículas alcanzaron a recorrer del 60 al 80 % de la trayectoria. Dilip y Khalid, (1998) estimaron que del 60 al 80 % de los eventos turbulentos son causados por vórtices verticales de alta frecuencia, el resto son debidos a vórtices horizontales de baja frecuencia.

La descripción dada en este estudio es consistente con las características conocidas de los boils. Sin embargo, se presenta un punto de vista alternativo para la generación y evolución de estas estructuras. Con base en este trabajo se puede concluir:

De acuerdo con la visualización de flujo se detectaron cinco puntos de separación u origen de los eventos periódicos. La información que se tiene en relación a los puntos de origen de estas estructuras es que se originan en el punto de

reattachment (Nezu *et al* 1997) y en el punto más bajo de la duna Muller y Gyr (1986).

Como puede deducirse de los estudios de topología de flujo presentados en el capítulo anterior los puntos de separación corresponden a puntos silla de desprendimiento, y también están relacionados con la periodicidad del vórtice ojo debido a la dinámica del flujo explicada anteriormente. Es por esta razón que aunque los eventos son de cinco tipos la periodicidad es aproximadamente constante lo que hace pensar en la casi periodicidad de los patrones de flujo identificados en el capítulo anterior y que tienen relación directa con los puntos de separación.

### **7.3 Experimentos en flujo sobre fondo móvil, formas de fondo tridimensionales, Caso no canónico bifásico.**

Los experimentos sobre fondo móvil se efectuaron con el propósito de estudiar la interacción del flujo —formas de fondo— transporte de sedimento.

#### **7.3.1 Descripción de los experimentos en fondo móvil.**

Los experimentos se efectuaron en la instalación experimental descrita en el capítulo 3. El material del fondo fue arena volcánica con un diámetro  $D_{50} = 0.19\text{mm}$  y desviación estándar de  $\sigma_g = 1.293$ . La capa de arena en el fondo del canal fue de 20 cm. Se usó un sistema de recirculación, para proporcionar la mezcla agua-arena, consistente en una tubería flexible conectada a una bomba. Cada experimento se inició con una configuración de fondo plano liso, la compuerta se colocó de manera que se tuviera el tirante deseado, el llenado de agua se hizo lentamente hasta alcanzar el gasto seleccionado, en estas condiciones se esperó el tiempo suficiente para que se estableciera el equilibrio. La condición de equilibrio se consideró aquella en la que se mantuvo el tirante constante a lo largo del canal, y cuando la pendiente y el transporte se hicieron razonablemente uniformes con el tiempo. En ese momento se iniciaron las mediciones. En la tabla 7.5 se presenta un resumen de los experimentos efectuados, sus características y parámetros hidráulicos más importantes.

Al final de cada experimento, se vació el canal lenta y cuidadosamente y se midió la configuración del fondo con un limnómetro en el eje central del canal.

Tabla 7.4. Resumen de datos experimentales, fondo móvil

Nº DE PRUEBA	Q (l/s)	d (cm)	u (cm/s)	S	Fr	u* (cm/s)	Re*	T °C	f	c mg/l
1	12.5	7.5	18.4	0.001133	0.215	2.89	5.49	30	0.1970	15
2	15.5	7.9	20.4	0.000908	0.233	2.64	5.02	29	0.1342	15
3	20.5	8.1	26.5	0.001550	0.297	3.52	6.68	32	0.1409	122
4	24.4	9.8	28.0	0.001167	0.285	3.36	6.38	31	0.1149	128
5	15	8.2	20.0	0.001083	0.223	2.95	5.61	29	0.1742	26
6	14	8.3	22.0	0.000917	0.244	2.73	5.19	29	0.1234	91
7	14	7.5	23.0	0.000875	0.268	2.54	4.82	30	0.0974	46
8	14	7.6	22.0	0.000833	0.255	2.49	4.73	29	0.1027	116
9	12.5	6.8	19.0	0.000792	0.233	2.30	4.37	27	0.1171	65
10	17.5	8.5	23.0	0.001125	0.252	3.06	5.82	25	0.1419	60

### 7.3.2. Perfiles de fondo.

En la lámina 7.17 se presentan los perfiles de las formas de fondo obtenidas para números de Reynolds  $Re_*$  entre 4.4 y 6.7, donde:  $Re_* = u_*D/\nu$ ;  $u_* = (gdS)^{1/2}$  y  $D$  es el diámetro del sedimento. Se observaron dos tendencias una para números de Reynolds  $Re_*$  entre 4.4 y 5.7 donde las formas presentan picos pronunciados y muy seguidos unos de otros que corresponden a rizos, según la clasificación de Guy *et al* (1961), y otra para números de Reynolds  $Re_*$  entre 5.9 y 6.7 con formas más achatadas y alargadas con una mayor separación entre ellas, que corresponden a dunas con rizos superpuestos. En la lámina 7.19 se presenta una vista en planta de las formas de fondo generadas para el caso de  $Re_* = 5.61$ .

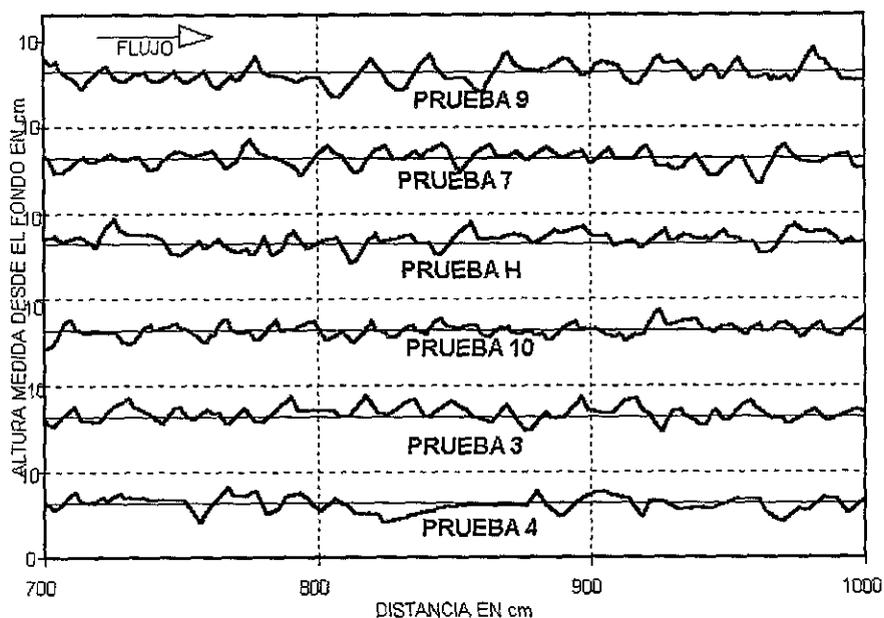


Lámina 7.17. Perfiles longitudinales al centro del canal.

La geometría de las formas para diferentes gastos se graficó de acuerdo con el criterio de clasificación de Ranga Raju (1963), la mayoría de los casos corresponden a la zona de rizos y dunas como se muestra en la lámina 7.19. También, es interesante notar que la longitud y ancho de las formas fueron

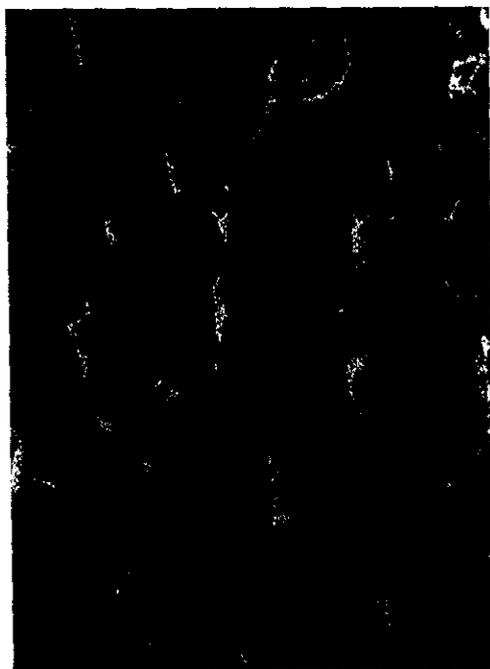


Lámina 7.18. Formas de fondo en el canal del laboratorio para  $Re = 5.61$

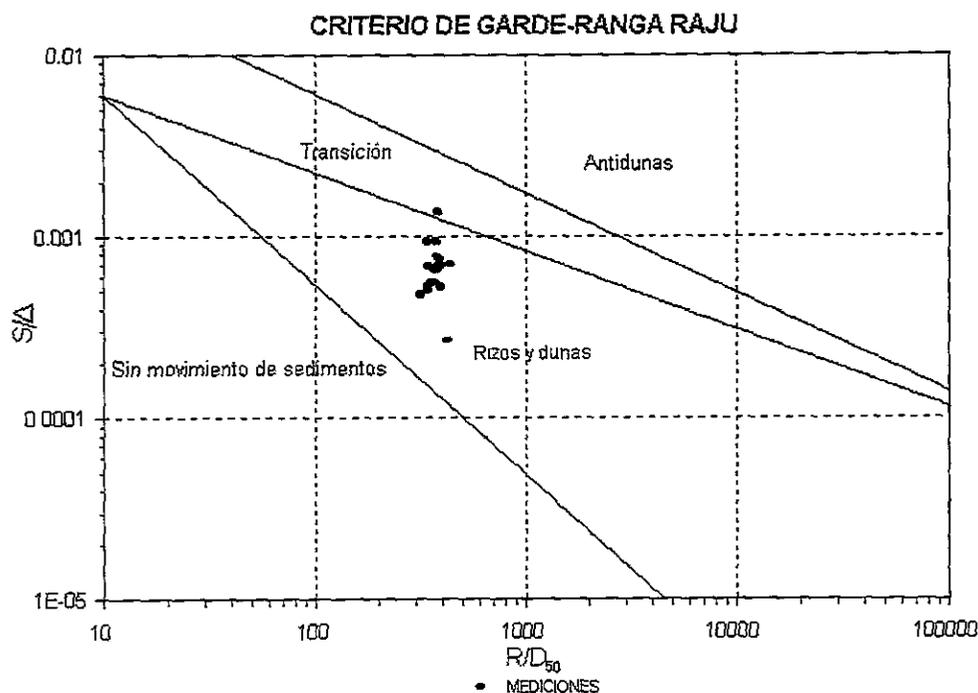


Lámina 7.19. Clasificación de las formas de fondo criterio de Ranga Raju.

semejantes en tamaño, a las reportadas por Mantz (1992) como rizos secundarios. Algunas características de las formas de fondo como función de los parámetros del flujo se presentan en la tabla 7.6. En esta se presentan los resultados de otros autores para rangos de parámetros semejantes. En ella se observó que las características observadas en la presente investigación se encuentran en el rango de las reportadas por otros investigadores para condiciones similares.

Tabla 7.5. Características de las formas de fondo observadas en el presente estudio y comparación con las reportadas por otros autores.

AUTORES	$D$ (cm)	$R$ (cm)	$S \times 10^3$	$u$ (cm/s)	$h$ (cm)	$L$ (cm)
Guy et. al. (1961)	0.019-0.093	8.84-32.6	0.15-6.5	21.3-104.5	0.15-19.80	8.83-539.40
Barton & Lin (1955)	0.018	8.93-36.3	0.44-2.1	22.5-109.0	1.55-3.53	13.10-22.55
Vanoni & Hwang (1967)	0.0206-0.023	6.00-26.5	0.455-2.9	17.3-55.7	1.13-17.40	11.58-22.86
Presente estudio	0.019	5.99-8.22	0.792-1.55	18.4-28.0	1.50-5.00	13.00-19.00

Las características de las formas fueron analizadas estadísticamente. En la lámina 7.20 se muestran las distribuciones de las elevaciones para los casos 3,4,7,9, 10 y H. Las elevaciones presentaron una frecuencia de aparición altas para el rango entre 6 y 8 cm en todos los casos, sin embargo el valor medio cambió con el número de Reynolds. Los cambios en la elevación media con el número de Reynolds se presentan en la lámina 7.21, donde se pueden observar tres regiones, una para números de Reynolds  $Re_*$  entre 4.4 y 5.7 donde el valor medio de las elevaciones se incrementó cuando se incrementó el número de Reynolds, seguida de una zona de transición para números de Reynolds 5.7 y 5.9 donde el valor de la elevación media tomó dos diferentes valores y finalmente, para números de Reynolds entre 5.9 y 6.7, partiendo de una elevación disminuida se presentó una tendencia a reducir ligeramente la elevación media al incrementar el número de Reynolds.

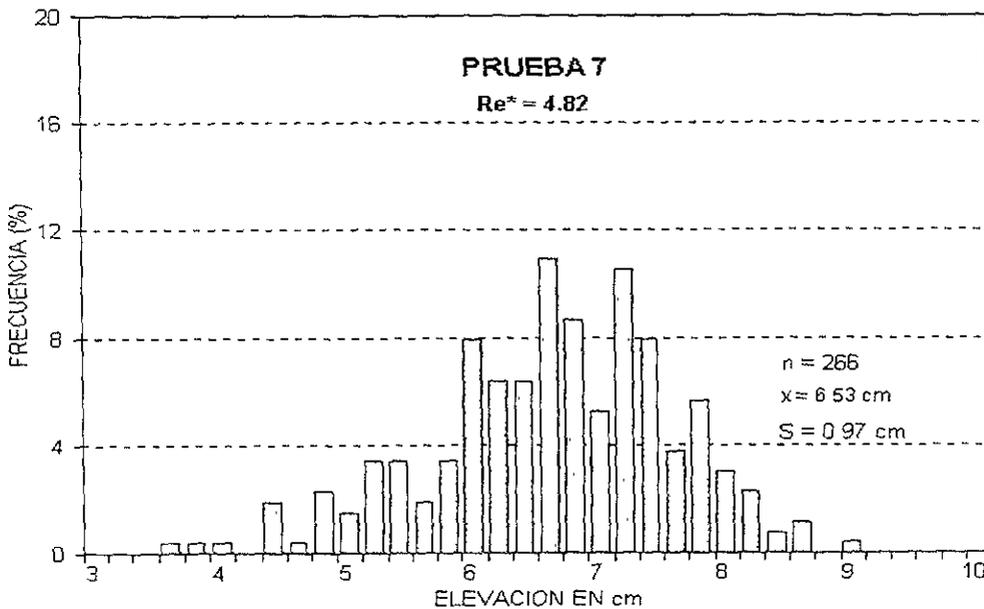


Lámina 7.20. Histograma de frecuencias de las elevaciones del fondo.

La región comprendida entre  $5.7 \leq Re_* \leq 5.9$  es particularmente interesante, porque en ella se presentan características propias de un cambio de fase: bimodalidad (dos valores posibles de la variable de estado) histéresis, y saltos bruscos. Observando

esta curva, se puede determinar la existencia de histéresis en la transición de dunas a fondo plano la cual fue reportada por primera vez por Simons y Richardson (1966) hace treinta años. También se reportó como un posible proceso de catástrofe por Martínez-Austria (1985), quien propuso un modelo de catástrofe para cauces estables.

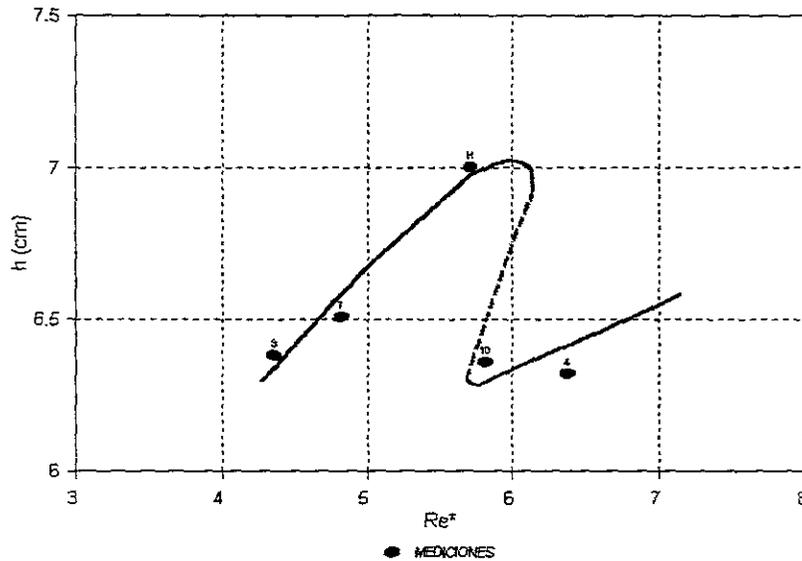


Lámina 7.21. Relación elevación media-número de Reynolds

### 7.3.3. Transporte en suspensión.

En la lámina 7.22 se presentan los perfiles de concentración medidos al centro (longitudinal y transversal) del canal en diferentes posiciones verticales para seis  $Re_*$ . Como en el análisis de la geometría de las formas de fondo, se observaron dos comportamientos diferentes uno para  $Re_* \leq 5.8$  y otro para  $Re_* \geq 5.8$ . Los perfiles de concentración con mayor pendiente se relacionaron con rizos mientras que los perfiles con pendiente más suave se relacionaron con dunas. La influencia de la configuración del lecho en el proceso de mezclado se manifestó también en la magnitud de las concentraciones, encontrándose una mayor concentración en presencia de la configuración correspondiente a la combinación de dunas con rizos que se obtuvo para los  $Re_*$  mayores.

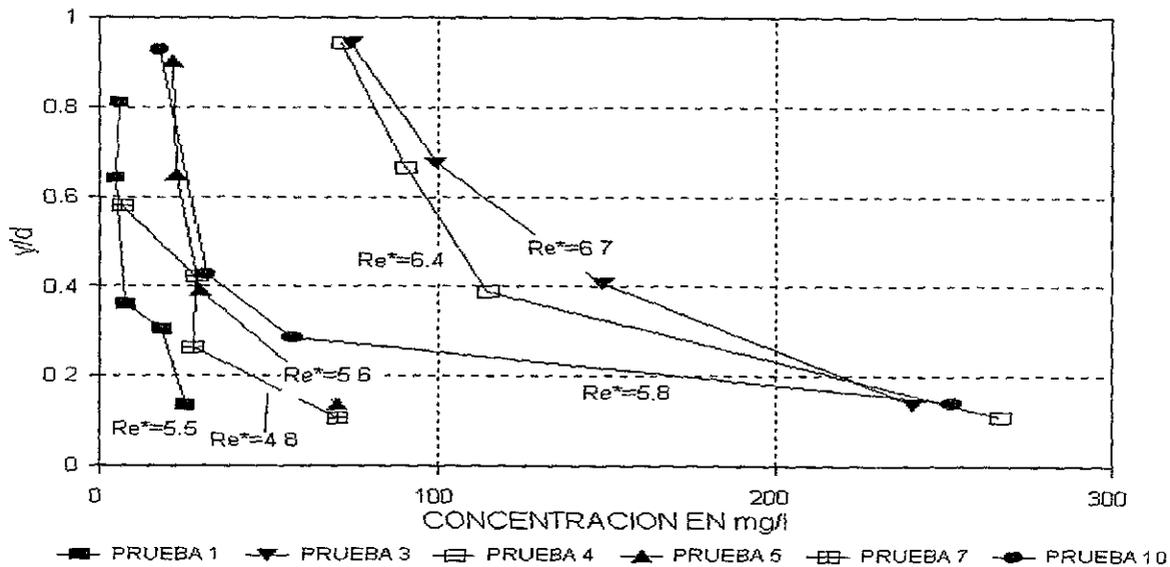


Lámina 7.22. Perfiles de concentración en el eje central del canal

Las concentraciones medias de sedimento ( $c_m = qt/q$ ) se compararon con las reportadas por Guy *et al* (1961) y Barton y Lin (1955) para condiciones semejantes a la de esta investigación (ver lámina 7.23). Las concentraciones medias obtenidas en los experimentos se aproximaron más a la tendencia de las mediciones de Barton-Lin obtenidas en condiciones semejantes.

Los perfiles de concentración de sedimento se calcularon de acuerdo con la fórmula de Van Rijn y se compararon con los perfiles medidos en el presente estudio y con los reportados para el río Mississippi por Scott (1966), como se muestra en la lámina 7.24. Se puede observar que los valores predichos con la fórmula de Van Rijn coinciden con los perfiles de concentración medidos para el caso de la corrida siete, del presente estudio. En los demás casos los perfiles calculados solo tienen una buena correspondencia con las mediciones cercanas al fondo ( $z/d < 0.4$ ).

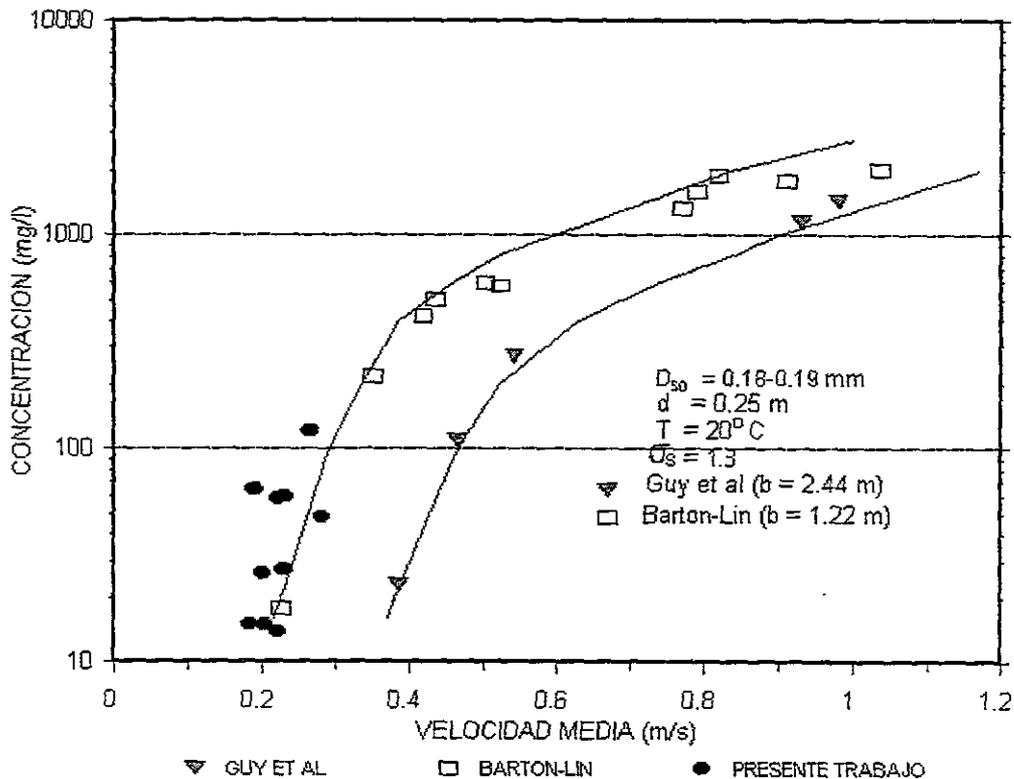
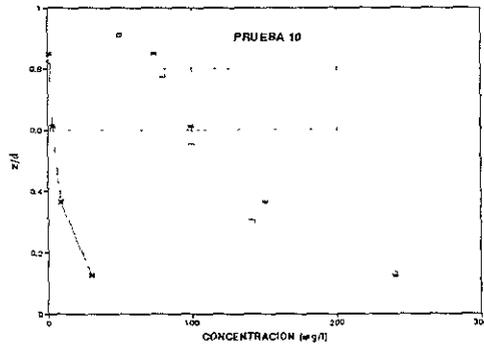
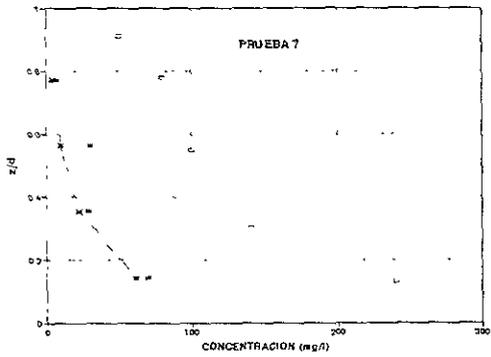
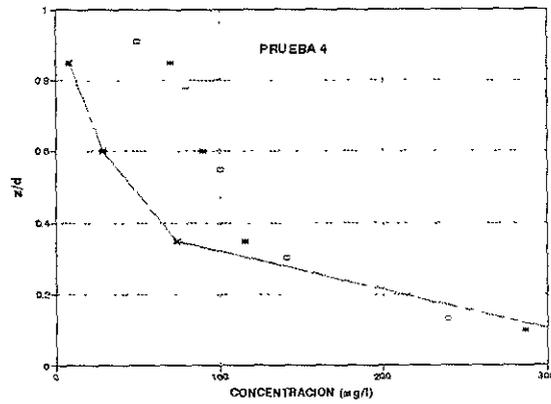
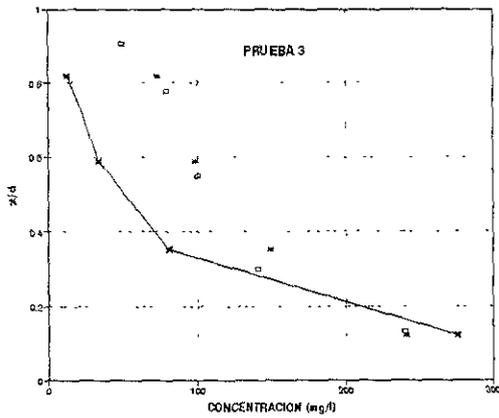


Lámina 7.23. Concentración media medida por diferentes investigadores.

#### 7.3.4. Esfuerzos cortantes.

Una de las formas más comunes para calcular el factor de fricción en canales de fondo móvil es mediante la fórmula de Darcy-Weisbach, definida como  $f = 8 (u_* / u)^2$ , y es la usada en este trabajo. En la lámina 7.25, los factores de fricción se graficaron contra el número de Reynolds. En el comportamiento de los factores de fricción se encontraron dos tendencias, una para  $Re_* \leq 5.7$  y otra para  $Re_* > 5.9$ . Se puede observar que para  $5.7 \leq Re_* \leq 5.9$  existen dos valores diferentes del factor de fricción para un solo valor de  $Re_*$ , que puede ser interpretado como una condición de transición de rizos a dunas con rizos superpuestos.



\* Presente estudio Río Mississippi x Van Rijn  
Lámina 7.24. Perfiles de concentración medidos y calculados.

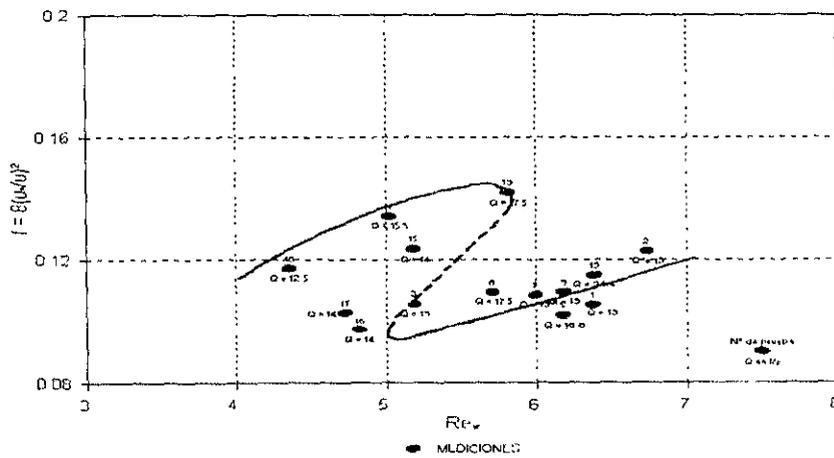


Lámina 7.25. Factor de fricción vs. u.

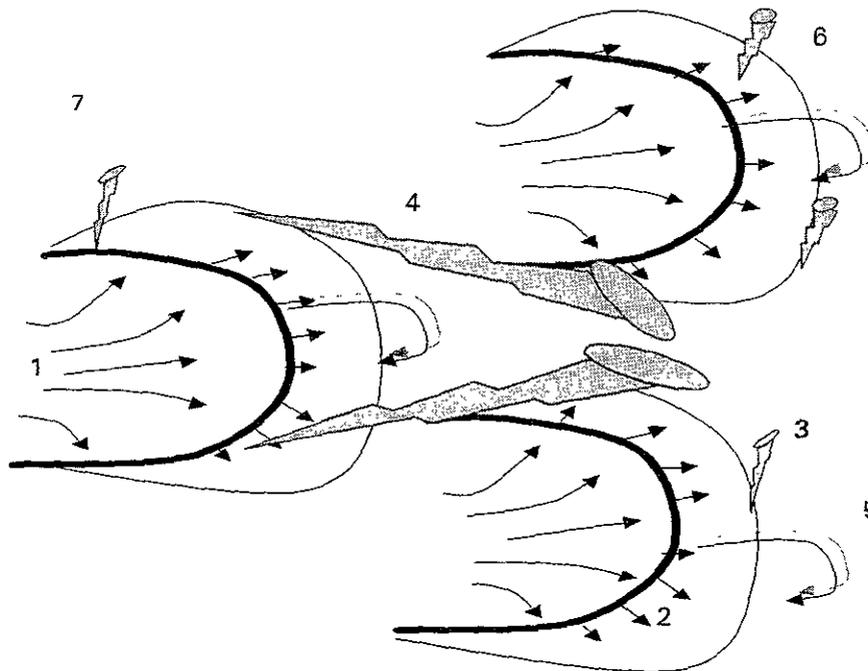
### 7.3.5 Observaciones.

Se observó que existe una relación entre las concentraciones de arena en suspensión y la configuración del lecho. Los perfiles verticales de concentración mostraron dos comportamientos en función del número de Reynolds, al igual que las formas de fondo. Las concentraciones medias de arena en suspensión mostraron un incremento en la velocidad media que se asemejó a la tendencia obtenida por Barton- Lin, para condiciones similares.

Los factores de fricción reflejaron la influencia de las formas de fondo presentando dos comportamientos de acuerdo con el número de Reynolds.

### 7.3.6. Mecanismos de transporte de sedimento en un flujo sobre formas de fondo tridimensionales reales, fondo móvil.

Se filmó en video un experimento completo para el caso de  $Re_* = 5.61$  donde se observó el desarrollo de las formas de fondo, la interacción de las formas de fondo con el flujo. Conforme se desarrollo la tridimensionalidad de los rizos, se incremento la cantidad de sedimento en suspensión, las pequeñas formas de fondo crecieron y el sistema cambió a un fondo cubierto de dunas. Se observó que la mayor aportación de sedimento procedió de las pendientes aguas abajo de los rizos. Una vez que las formas alcanzaron su altura final esta permaneció constante. En el esquema de la lámina 7.26 se indican las macroestructuras observadas y su relación con el transporte de sedimentos, a continuación se describen :



- 1 Arrastre de sedimento por rodamiento o por saltación a)
- 2 Deslizamiento en procesos de avalancha (a) y (b)
- 3 Levantamiento de sedimento por vórtices tipo tornado (b)
- 4 Suspensión de sedimento por vórtices tipo cono hacia el flujo medio (b)
- 5 Movimiento de sedimento por la acción de recirculación de flujo (a) y (b)
- 6 Suspensión de sedimento con interacción de la superficie libre del agua, vórtices tipo boil (b)
- 7 Suspensión de material por pequeños vórtices (b)

Lámina 7.26. Mecanismos de transporte de sedimentos observados en el flujo sobre formas de fondo móvil. a) transporte de fondo, b) transporte en suspensión.

1. *Arrastre de sedimento por rodamiento o por saltación*, su contribución se debe en parte al transporte de fondo y en parte al transporte en suspensión. En la pendiente aguas arriba de la cresta en la zona de aceleración del flujo el movimiento de las partículas se observó como se presenta con las flechas 1 de la lámina 7.26. Algunas de las partículas rodaron sobre la pendiente alcanzando posiciones más elevadas a su posición inicial, otras partículas se movieron en pequeños saltos hacia aguas abajo, hacia la cresta de la forma, en estos saltos

algunas fueron arrastradas por el flujo y alcanzaron a saltar una forma completa. Otras más fueron arrastradas por el flujo medio y permanecieron como parte del transporte en suspensión. Este proceso está íntimamente relacionado con las estructuras en forma de cono observadas, se cree que los saltos de las partículas se deben a que estas son atrapadas en la estructura y cuando la circulación producida dentro de esta es suficientemente fuerte la partícula se mueve dentro de la estructura, cuando la estructura es absorbida en el flujo medio las partículas pueden seguir el flujo medio o depositarse aguas abajo. El arrastre de las partículas hacia la cresta se produjo hasta que esta alcanzó una altura límite o crítica a partir de la cual las formas no crecieron más y se produjeron pequeñas avalanchas en la pendiente aguas abajo de la cresta. Estas avalanchas motivaron que la forma avanzara en la dirección de la corriente.

2. *Deslizamientos en forma de avalancha* se muestran con las flechas número 2 de la lámina 7.26. En este proceso contribuyeron tanto el transporte de fondo por el corrimiento de la duna como el transporte en suspensión ya que en el deslizamiento algunas partículas rodaron sobre las otras y algunas más fueron capturadas por los remolinos de la zona de recirculación entrando a formar parte del transporte en suspensión.

La translación típica de una forma de fondo es por erosión de la pendiente aguas arriba y acumulación en la pendiente aguas abajo. Una vez que la forma ha alcanzado su altura final, la forma debe permanecer constante. Conforme el transporte de sedimento se incrementa, el espaciamiento entre una forma y otra desaparece. Sanders (1989) dice que las pequeñas formas crecen embebiéndose unas en otras y el sistema cambia rápidamente a un fondo cubierto con formas grandes. En la lámina 7.27 se muestra la migración de una duna y los procesos de erosión en la fase 1, en la cual la suspensión de partículas se efectúa en mayor grado en la región de recirculación, y la depositación sobre la cara de menor pendiente de la duna o varias dunas aguas abajo; En la fase 2 se presentan las avalanchas.

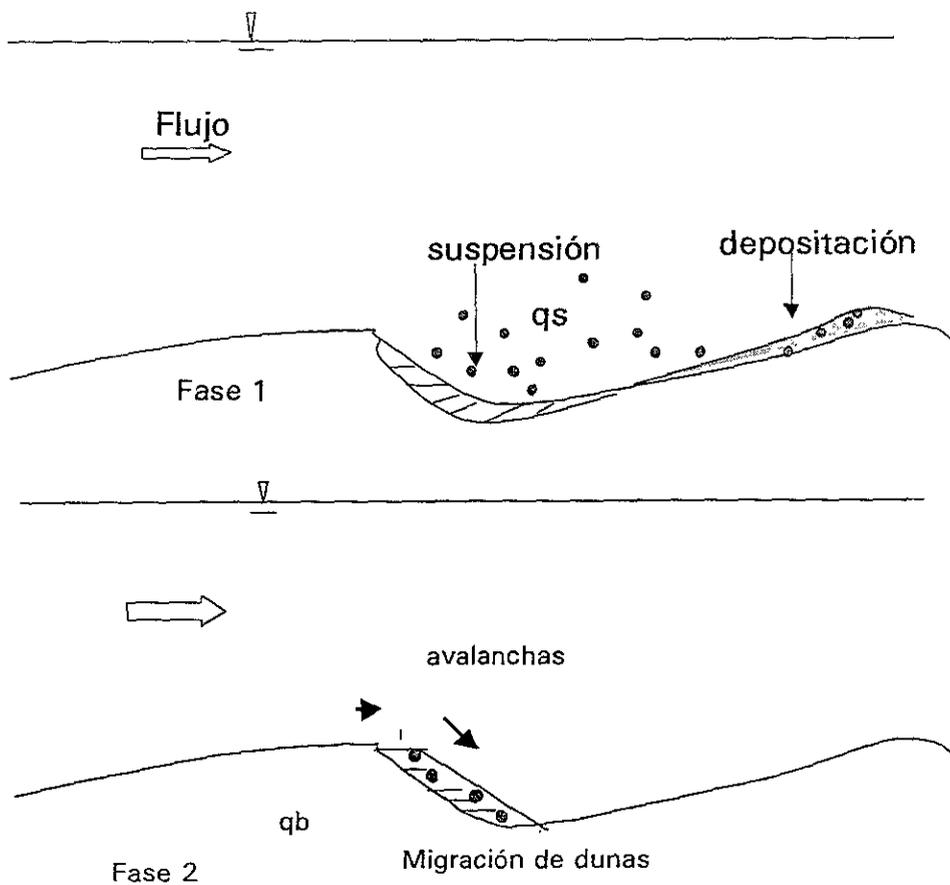


Lámina 7.27. Migración de dunas en dos fases, fase1, suspensión de sedimento y erosión en la región de recirculación, deposición en la pendiente aguas arriba de la duna, fase2, avalanchas en la pendiente aguas abajo de la duna.

3. Suspensión de sedimento por los *vórtices verticales* semejantes a pequeños tornados. En los experimentos de fondo móvil estos pequeños vórtices se observaron en ambas caras de las dunas aunque con mayor frecuencia en se observaron sobre la cara aguas abajo de la cresta

4. *Vórtices tipo cono*. La suspensión de sedimentos por este tipo de estructuras se observó desprendiéndose de las pendientes laterales de la duna, estas estructuras son las que aportan mayor cantidad de sedimento y son las que se relacionan con los procesos boils.

5. *Vórtices de recirculación.* Estas estructuras fueron las de mayor tamaño, observadas. En la región de recirculación se observó la mayor cantidad de sedimentos en suspensión, esta región es la que aporta la mayor cantidad de sedimentos en un flujo. El rompimiento del vórtice produjo flujo inverso en la cresta de la duna, lo que se relacionó de acuerdo con observaciones en el canal con fondo móvil al movimiento de partículas retrocediendo como se muestra en la lámina 7.5.
  
6. *Vórtices superficiales.* Son debidos a la deformación de la superficie libre del agua y a las diferencias de velocidades superficiales entre las estructuras que entran y salen de la pared. *interacción del flujo de mayor velocidad por las eyecciones hacia la región externa y el flujo de menor velocidad hacia la pared.* La deformación de la superficie libre produce una redistribución de la vorticidad y a su vez de sedimento en suspensión, ver lámina 7.28.
  
7. *Vórtices transversales al flujo.* Se producen en la capa cortante por las diferencias de velocidades del flujo que sale de la pared y el flujo de menor velocidad que entra hacia la pared, con circulación positiva, es decir en sentido de las manecillas del reloj, ver lámina 7.29. Estos corresponden a los vórtices tipo 5 y 6 que se muestran esquemáticamente en la lámina 7.27 y se relacionan con los boils.

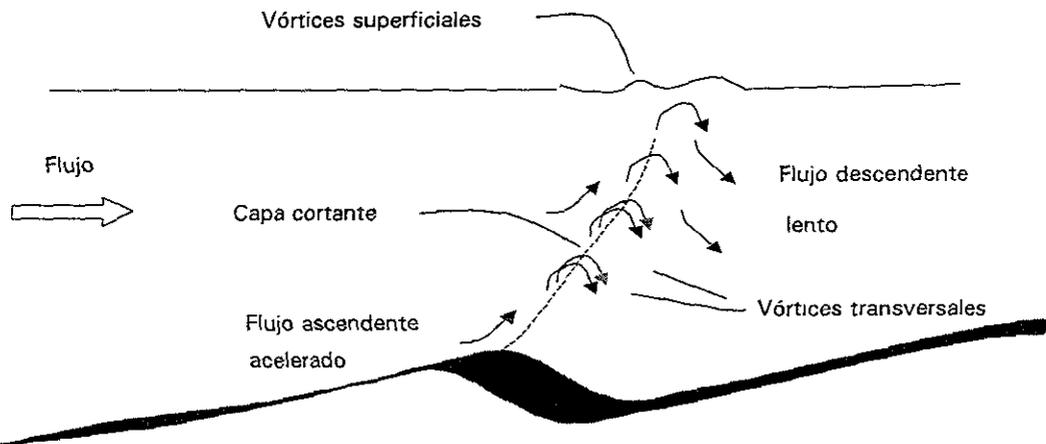


Lámina 7.28. Vórtices transversales y capa cortante entre el flujo hacia fuera y hacia la pared.

En la lámina 7.29 se ilustran los diversos tipos de estructuras y el transporte de partículas, sin embargo se debe considerar que no todas las estructuras ocurren simultáneamente en el mismo espacio-tiempo, es decir estas se forman en diferentes planos y a diferentes tiempos, a través de la sección transversal del flujo.

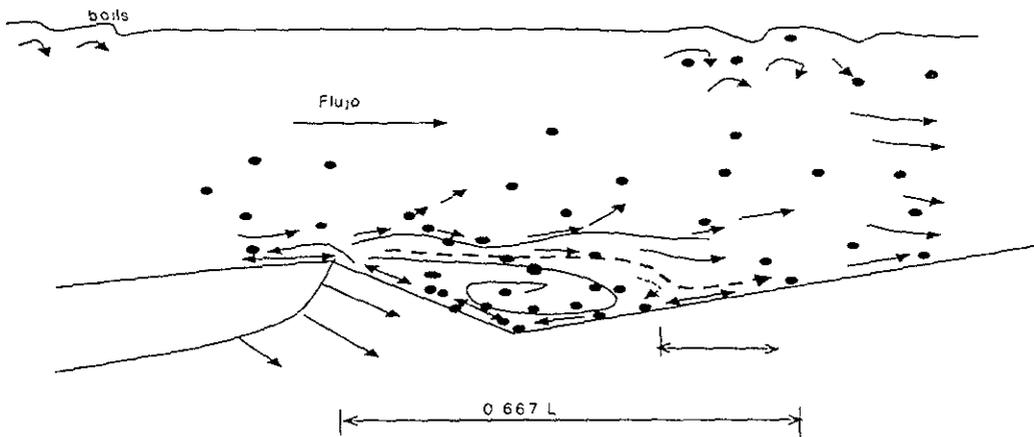


Lámina 7.29. Interacción de las diferentes estructuras.

En los experimentos del presente estudio se identificaron los puntos silla descritos en el capítulo 6 como puntos de desprendimiento de partículas. La capa cortante que ondula detrás de la cresta se mueve intermitentemente ondulando y cerrándose, razón por lo que cambia continuamente la localización de estos puntos silla aunque esta es casi periódica. Nótese que en los perfiles de velocidad, de intensidad de turbulencia y esfuerzos de Reynolds se observaron los mayores esfuerzos cortantes,

en la región comprendida por la capa cortante que cierra la región de recirculación. Las estructuras de la capa cortante transportan material tanto hacia el flujo medio (región externa) como hacia el interior del vórtice ojo, dependiendo de la ubicación de las partículas en el tiempo y a su vez de la ubicación de los puntos silla.

Las inflexiones observadas en los perfiles de velocidad cerca de la superficie se deben a los fuertes cortantes generados por las estructuras que llegan hasta la superficie. En este punto las partículas son liberadas al deshacerse o chocar las estructuras con la superficie libre, las partículas liberadas pueden caer por peso propio o ser arrastradas por otras estructuras.

#### ***7.4 Modelo conceptual de las estructuras turbulentas del flujo sobre formas de fondo.***

De acuerdo con las observaciones experimentales y con las referencias de experimentos realizados por una gran cantidad de investigadores que han desarrollado estudios experimentales del flujo sobre formas de fondo fijas y móviles, entre los más completos están los de Müller, Raudkivi y los de Best, se llegó a establecer un modelo conceptual para describir los procesos de formación, interacción y ruptura de las estructuras turbulentas. Estos procesos están íntimamente relacionados con la capacidad de transporte del flujo. El modelo se presenta en la lámina 7.30

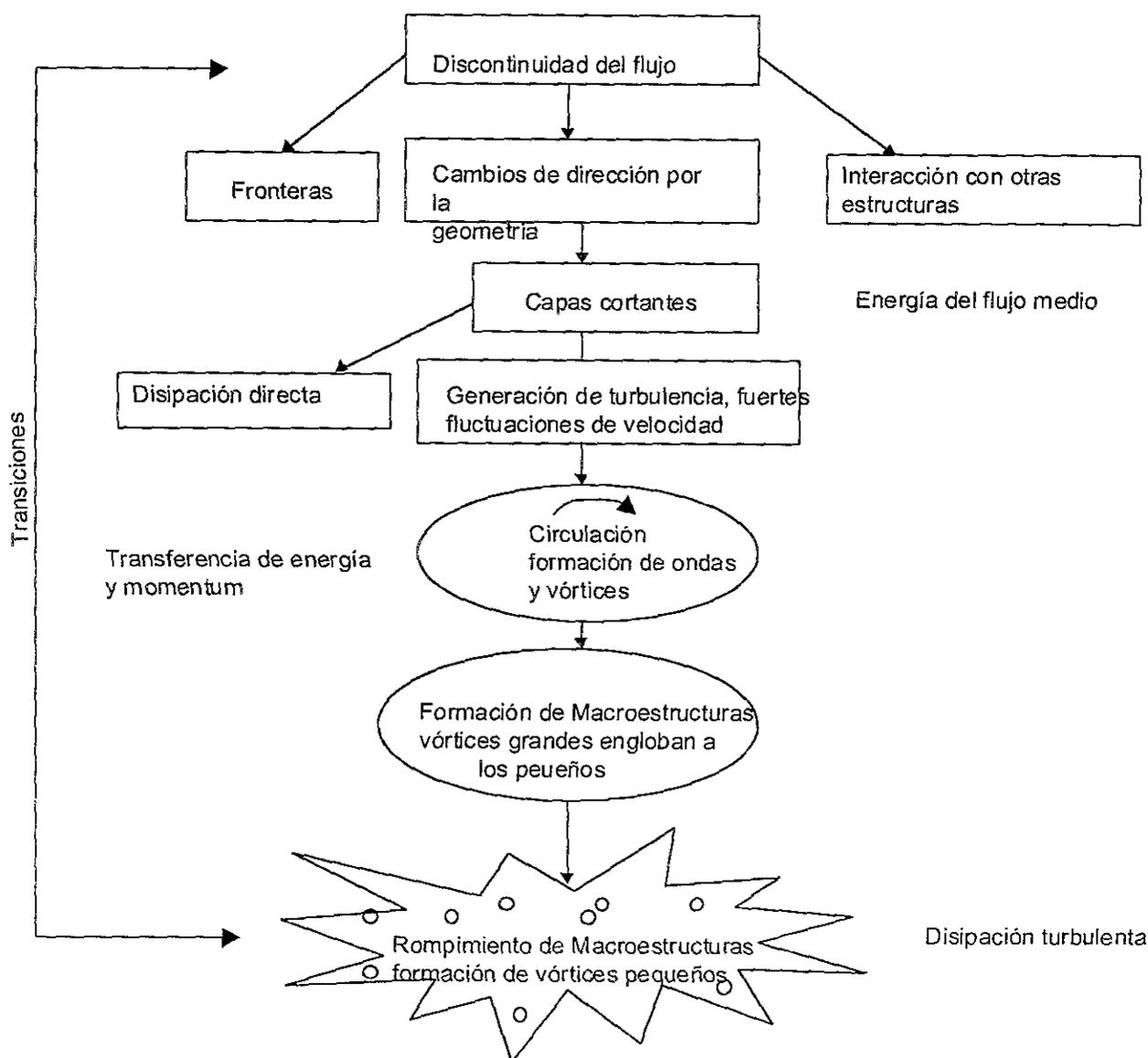


Lámina 7.30. Modelo conceptual de la formación y rompimiento de estructuras turbulentas.

De acuerdo con este modelo, la discontinuidad de flujo, debida entre otras razones a la presencia de las fronteras, cambios de dirección de flujo por la geometría, o debida a la interacción de ciertas estructuras del flujo con las vecinas, las diferencias de velocidades de flujo producen capas cortantes en las cuales se genera circulación de flujo y la aparición de vórtices, este proceso esta relacionado con la generación de energía o transferencia de energía del flujo medio, por lo

general estos vórtices crecen embebiéndose unos en otros hasta alcanzar un tamaño máximo del orden de magnitud del tirante por ejemplo. Los vórtices pequeños, tienen efectos en la topología local de ciertas regiones del campo de flujo, cuando estas estructuras alcanzan una cierta magnitud máxima, las macroestructuras se rompen en estructuras de menor tamaño disipando energía, existe una redistribución de las partículas si se consideran los procesos de transporte. El rompimiento de las macroestructuras produce fuertes cambios en la configuración global del flujo. Como se muestra en el esquema, en los fluidos en movimiento existe una dinámica de transformación continua de energía y de momentum.

En el caso de estudio, la duna causa discontinuidad en el flujo por la geometría de forma produciéndose una capa de fuertes cortantes por las diferencias de velocidad entre el flujo acelerado que proviene de la pendiente ascendente de la duna y el flujo detrás de la duna donde las velocidades son pequeñas.

Las diferencias de velocidad producen circulación y una estela de vórtices lo que se denominó en el capítulo 6 como fase 1 y que se ha reportado en otras investigaciones; ver Simpson, 1989 Müller 1985; Bennet y Best 1996. En esta capa se produce disipación directa de energía. Estos vórtices evolucionan embebiéndose unos en otros hasta lograr la magnitud del orden del tamaño de la duna y una longitud a partir de la cresta de la duna hasta el punto donde se pega de nuevo la lámina (reattachment). En este estudio la zona de recirculación fue del orden de 5 h (h altura de la duna). Esta estructura comúnmente conocida como vórtice ojo se identificó en el capítulo 6 como fase 2 y ha sido descrita en estudios previos por Mercer y Haque, 1973; Asaeda et al 1989; Ikeda y Asaeda, 1983; Müller y Gyr 1996.

Como se dijo anteriormente el vórtice ojo solo permanece un tiempo muy pequeño e inmediatamente por las fuertes inestabilidades que se tienen en esa región, se rompe la estructura y el fluido contenido, sale en una mayor proporción hacia el flujo medio y en proporción menor hacia atrás de la cresta de la duna. Con el movimiento del flujo se arrastran partículas y el transporte se da como se explicó en

el subcapítulo 7.36. La separación intermitente del flujo del punto de reattachment, esta relacionada con el corrimiento de los puntos de separación y en el caso de fondo móvil con el movimiento de la duna hacia aguas abajo. La salida del flujo de la región de recirculación hacia el flujo medio algunas veces alcanza a llegar hasta la superficie del agua se identifica con los eventos denominados boils que se desprenden del punto de reattachment (Kadota y Nezu (1999).

Detrás de la duna se forman una serie de pequeños vórtices después del rompimiento del vórtice ojo. El fluido que sube hacia la superficie genera una capa cortante por la diferencia de velocidad entre el flujo medio y el saliente lo que produce rotación de flujo positiva, en sentido de las manecillas del reloj. Cuando estas estructuras alcanzan la superficie libre del agua se manifiestan como ondulaciones de la superficie libre (Komori, S. *et al* 1989). Al llegar a la superficie los vórtices se desintegran y parte de su energía se disipa y parte se transfiere al flujo medio. El material transportado se redistribuye y algunas partículas son transportadas por el flujo o son arrastradas por otras estructuras que las llevan ya sea hacia el fondo o hacia la superficie.

Los procesos de separación de flujo, generación de ondas, formación de una estela de vórtices, formación del vórtice ojo, rompimiento del vórtice ojo, formación de boils se repiten casi periódicamente. A través de estas estructuras se da el movimiento de las partículas de acuerdo con lo presentado en el subcapítulo 7.36 donde se explican los mecanismos de transporte de sedimento sobre formas de fondo tridimensionales reales.

En el caso de estudio se identificaron otros puntos de separación de flujo sobre la pendiente más pronunciada de la duna, los cuales se relacionaron con los puntos silla que se presentaron en el capítulo 6 en la fase 3. De toda la bibliografía revisada solo Onnslow *et al* (1993) presenta fotografías, ver lámina 5.36, donde se pueden observar separaciones de partículas en esta pendiente.

Las transformaciones de energía están dictadas por las fuerzas dominantes que gobiernan o determinan el comportamiento del flujo estas son las fuerzas de

viscosidad, de presión, de inercia y las gravitacionales. En un flujo con formas de fondo, el cambio de geometría favorece o crea las condiciones para un cambio en la relación de las fuerzas dominantes. Los cambios de estado o fases presentados en el capítulo 6, muestran los diversos modos de transformación de energía y a su vez de transporte.

En el caso de fondo móvil, el tipo de régimen está relacionado con el tipo de formas del fondo y esto a su vez con la ley de fricción, como se vio en los experimentos de fondo móvil, lámina 7.25, esta interdependencia hace más complejo el estudio del fenómeno.

Se explicó la relación de las macroestructuras con el transporte de sedimentos, lo cual quedó confirmado por evidencias visuales y cuantitativamente por las mediciones de concentraciones de sedimento sobre dos tipos de geometrías de formas. Sin embargo aún hace falta evaluar cuantitativamente el transporte de sedimento debido a cada tipo de estructura y su interacción, por lo que hace falta realizar mayor investigación experimental y de campo.

## **7.5 Conclusiones**

En este estudio experimental se confirmó que las estructuras turbulentas son las responsables de los procesos de transporte de sedimentos, y por ello de la topología de las formas de fondo. Con base en las observaciones propias y en los reportes de diversos investigadores en especial los trabajos de Müller, Raudkivi y de Bennett y Best, se explicó la dinámica de las estructuras turbulentas y como se lleva a cabo la mecánica del transporte en un flujo sobre formas de fondo.

Se efectuó un estudio de los eventos denominados boils encontrando que éstos se separan en puntos silla obtenidos de la visualización de flujo. Se hizo una caracterización de estos eventos. La periodicidad de los eventos boils siguió las tendencias reportadas por Asaeda *et al* (1989), cuando se escalaron con el tirante del flujo y la velocidad media.

En el estudio del flujo sobre formas de fondo móvil, se observó que existe una relación entre las concentraciones de arena en suspensión y las configuraciones del lecho, la cantidad de sedimento suspendido se incrementó conforme se desarrolló la tridimensionalidad de las formas, lo cual concuerda con observaciones realizadas por Raudkivi (1966). Las distribuciones de concentración concordaron con las predichas por las fórmulas de Van Rijn (1993).

Se propuso un modelo conceptual para el desarrollo de las estructuras turbulentas y los procesos de transferencia de energía y masa en el cual se consideran los mecanismos generadores de energía como capas cortantes y a las estructuras turbulentas en una dinámica de transformación continua.

El efecto de las modificaciones geométricas en un flujo con formas de fondo es favorecer o crear las condiciones para un cambio en la relación de las fuerzas dominantes. Estos cambios se favorecen por una alteración en la forma de transformación de energía. Cuando las condiciones del flujo son tales que se modifica la forma de fondo, a su vez se modifica la ley de fricción. Esta interdependencia es lo que hace muy complejo el estudio del fenómeno.

Se verificó la relación de las macroestructuras con el transporte de sedimentos, lo cual quedó confirmado por evidencias visuales y también cuantitativamente en las mediciones de concentraciones de sedimentos sobre dos tipos de geometría de formas de fondo en un canal con fondo móvil. Sin embargo aún se desconoce la capacidad de transporte de sedimento debido a cada tipo de estructura, por lo que hace falta realizar mayor investigación experimental y de campo.

El estudio de formas de fondo en un fondo móvil es muy complicado por la dificultad que representa realizar mediciones precisas en un fondo que está en movimiento continuo, en donde las dunas se deforman y migran. En particular, en el presente estudio fue de suma importancia el poder efectuar los experimentos sobre formas de fondo fijas, observar los procesos en dos planos, contar con las imágenes de video, a través de las cuales se pudieron hacer observaciones, y modificar la velocidad del video para observar en detalle las configuraciones del flujo.

## 8. CONCLUSIONES

En este capítulo se resumen los resultados más importantes obtenidos del estudio experimental de estructuras turbulentas y los mecanismos de transporte de sedimentos. Tres series de experimentos se realizaron en este estudio: Flujo sobre fondo liso sin partículas, Flujo sobre formas de fondo triangulares fijas sin partículas y Flujo sobre fondo móvil; flujo con partículas y formas de fondo tridimensionales. Algunas de las aportaciones más importantes en este trabajo están relacionadas con las técnicas experimentales tanto en la visualización de flujo como en la obtención de velocidades, y la originalidad en su aplicación. A partir de ellas fue posible derivar descripciones físicas del fenómeno estudiado, así como una gran cantidad de datos que fueron muy útiles para sustentar la hipótesis de que las estructuras turbulentas juegan un papel fundamental en la dinámica del transporte de sedimentos en un río. Cabe mencionar que los resultados obtenidos en cada tipo de experimento se compararon con los reportados por otros autores observándose buena concordancia a pesar de que en algunos casos los puntos de medición y las condiciones hidráulicas no fueron exactamente las mismas, con esto se demostró que la metodología experimental en cada caso fue confiable.

Los principales resultados obtenidos en cada serie de experimentos se presentan a continuación:

### -Flujo sobre fondo horizontal liso (*canónico*)

Los experimentos se realizaron para un  $Re=12,000$  basado en la velocidad media  $U$  y el tirante en donde se obtuvieron los siguientes resultados:

- En el estudio de las estructuras del flujo cerca de la pared, se observó la formación, desarrollo y rompimiento secuencial de las estructuras, cuya inclinación aguas abajo con un ángulo entre 12 y 20 grados, estuvo acorde con los reportes de otros investigadores como Blackwelder y Kovaznay (1972).
- La escala de tiempos de las estructuras para  $y^+ = 47.5$ , fue definida por la autocorrelación de la velocidad  $u$ , resultó del orden de 1.7s. Este resultado estuvo acorde a resultados de Bogard y Tiederman (1986). La longitud de las estructuras,  $\lambda_x = 25$  cm, es consistente con la longitud propuesta por el modelo cualitativo de Nezu (1981), en el cual  $\lambda_x = (2-3)h$ ; donde  $h$  es el tirante.
- La combinación de la técnica de visualización con inyección de tinta sincronizada con los registros de la velocidad  $u$  obtenidos con anemometría de película caliente cuya gráfica se incluyó en cada cuadro visualizado (ver lámina 4.7 capítulo 4) demostró que existe correlación entre los movimientos ascendentes de la tinta y los incrementos en la velocidad  $u$  y a su vez en los movimientos descendentes de la tinta y los

decrementos en el valor de la velocidad  $u$ , lo cual demuestra que la estructura del flujo está directamente relacionada con el transporte de materia en un flujo.

- Con la visualización simultánea en dos planos se observaron los movimientos verticales y transversales, los filamentos de la estructura se movieron en diferentes planos, confirmando la tridimensionalidad de las estructuras.

La estructura del flujo sobre un canal con fondo liso (*caso canónico*) es el más estudiado y sobre este se cuenta con una gran cantidad de información. En este trabajo fue de fundamental importancia iniciar con los experimentos sobre fondo plano ya que brindó seguridad tanto en la identificación de las estructuras cerca de la pared como en cuanto a las técnicas aplicadas y a la interpretación de los resultados.

-Flujo sobre formas de fondo fijas.

Se logró caracterizar el flujo turbulento sobre formas de fondo triangulares. Con la técnica de anemometría de película caliente y empleando técnicas estadísticas se obtuvieron los perfiles de velocidad media, intensidades de turbulencia y esfuerzos de Reynolds para  $12,000 \leq Re \leq 28,400$ . El análisis de las mediciones del presente estudio fue consistente con los presentados por Lyn(1993), Delft (1988), McCorquodale(1973), Nelson(1993) y Bennett y Best (1996).

- Los perfiles de velocidad indicaron, entre otras cosas, que el punto donde termina la zona de recirculación varió intermitentemente oscilando en un valor cercano a  $5h$  donde,  $h$  es la altura de la forma

- Los esfuerzos de Reynolds presentaron sus valores máximos en la capa cortante de la zona de recirculación.

- Las estructuras turbulentas observadas en un flujo sobre formas de fondo fijas para  $Re = 18,400$  se clasificaron en cinco tipos: 1) ondas de Kelvin-Helmholz, en la capa cortante generada en la cresta de la duna, 2) boils o eyecciones de flujo de mayor intensidad, aguas abajo de la cresta de la duna, 3) vórtices verticales semejantes a pequeños tornados en la línea de inicio de la nueva forma de fondo, 4) vórtice tipo cono en dirección del flujo y 5) vórtices transversales tipo ojo en la región de separación.

Aunque algunas de ellas como los vórtices tipo cono fueron reportadas anteriormente por otros investigadores, estas fueron observadas en otros contextos; la observación de otras es contribución original de este trabajo. Cabe mencionar que no se había presentado anteriormente una clasificación de este tipo.

- Las secuencias de perfiles instantáneos de velocidad a través del tiempo desde un punto de vista cuasi Lagrangiano, obtenidas con la técnica de

generación de burbujas de hidrógeno fueron muy importantes para conocer la dinámica de las estructuras del flujo sobre formas de fondo fijas. Con base en la cinemática del flujo se definieron las configuraciones o patrones de flujo y su secuencia casi periódica.

- Las herramientas matemáticas de topología de flujo y con apoyo en los patrones de flujo observados en la visualización y las velocidades instantáneas obtenidas con la técnica de generación de burbujas de hidrógeno, se presentaron las configuraciones características del flujo en el plano de mayor cortante las cuales se reconocieron como cuatro estados fase que se presentaron casi periódicamente. Se propuso la dinámica de estos patrones casi periódicos como transiciones continuas de un patrón al siguiente las cuales se producen por la interacción de las fuerzas inerciales, viscosas, de presión, gravitacionales y sus combinaciones. Los cambios de configuración están asociados con cambios en las propiedades de energía y a su vez de transporte del flujo. En condiciones de flujo en las que las fuerzas dominantes se aproximan al equilibrio, en su influencia como mecanismos responsables de la transformación de energía, el equilibrio es inestable y una pequeña perturbación provoca un cambio de estado o cambio de topología o estado fase, el cual es cualitativa y cuantitativamente diferente.

- Los puntos de separación o puntos silla (S) presentes en las configuraciones de topología, fueron identificados como puntos de desprendimiento de partículas lo cual fue consistente con observaciones de Onslow *et al* (1993) y el punto de separación en el reattachment está relacionado con el desprendimiento de los boils, Kadota y Nezu (1999)

- En la capa cortante los puntos silla están relacionados con el intercambio continuo de partículas de la región externa hacia la pared y de la zona de recirculación hacia el flujo medio lo que concuerda con observaciones de eventos eyecciones y barridos de partículas por Bennett y Best (1995).

En el estudio de flujo sobre fondo móvil: Interacción flujo-formas de fondo-transporte de sedimentos, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Las formas de fondo observadas para  $4.4 < Re. < 5.7$  fueron rizos y para  $5.9 < Re. > 6.7$  dunas con rizos superpuestos.
- Se observó que conforme se incrementó el gasto las estructuras del flujo en la separación no solo se incrementaron sino que llegaron a interactuar con la superficie libre del agua provocando a su vez barridos o entradas de agua hacia la pared, estos eventos incrementaron la erosión en la pendiente más fuerte o lado lee de la forma, y depositación en la pendiente ascendente de la forma siguiente aguas abajo. En las formas de fondo de mayor tamaño, la zona de separación

se incrementó, lo que produjo formas de fondo de mayor longitud. Este proceso una vez iniciado causó el crecimiento de formas de fondo más grandes que reemplazaron a las primeras. Estas formas de fondo a su vez causaron alteraciones en el campo de flujo produciendo estructuras turbulentas de mayor magnitud e intensidad conocidas como *macroturbulencia* siendo las más conocidas los eventos denominados *boils*. Las estructuras *macroturbulentas* afectan significativamente no solo el transporte en suspensión sino el transporte de fondo ya que juegan un papel muy importante en el proceso de la formación y migración de las formas de fondo.

- La influencia de las formas de fondo en el transporte de sedimento en suspensión fue evidente al comparar las concentraciones medias  $c$  obtenidas para  $Re_* = 4.4$  de 65 mg/l (fondo con rizos) y para  $Re_* = 6.68$  de 122 mg/l (fondo con dunas y rizos superpuestos). En videos tomados de un experimento completo se observa cualitativamente el incremento del transporte con la diferencia de formas de fondo.
- Con la fórmula de Van Rijn se predijeron con buena aproximación los valores locales de concentración para gastos pequeños ( $4.4 < Re_* < 5.7$ ) y fue consistente solo con los valores obtenidos experimentalmente para la región cercana al fondo ( $z/d < 0.4$ ) en el caso de los gastos mas grandes  $5.9 < Re_* > 6.7$ . En la transición se mostró una gran diferencia entre los valores predichos y los medidos.
- De acuerdo con las observaciones de visualización de flujo, las mediciones realizadas sobre formas de fondo fijas, las observaciones realizadas en un flujo con formas de fondo móvil y los reportes de diferentes investigadores, se describieron las principales estructuras turbulentas que se relacionan con el transporte de sedimentos en el caso de formas de fondo tridimensionales móviles.
- Por último se planteo un modelo conceptual acerca de la formación y rompimiento de las estructuras turbulentas en el que las formas de fondo se consideran implícitamente como cambios de geometría.

Los resultados más importantes que se obtuvieron en esta investigación se publicaron en revistas, se presentaron en foros nacionales e internacionales, una relación de los trabajos publicados se incluyen en el Anexo I.

En la naturaleza el flujo es transitorio, el tamaño de las formas de fondo es variable, las formas son tridimensionales y se mueven en dirección de la corriente. Aun cuando se realizó un gran trabajo de investigación, la complejidad de los fenómenos que suceden en un flujo real es muy grande, por

lo que es necesario realizar mayor trabajo tanto de laboratorio como de campo que apoyen las hipótesis sustentadas de manera que en un futuro se puedan establecer modelos más aproximados de la estructura del flujo y del transporte de sedimentos.

Esta tesis es uno de los primeros trabajos en donde se aplican las ideas de topología y de sistemas dinámicos para entender los flujos turbulentos dominados por las estructuras coherentes y donde éstas se consideran como las responsables del transporte de sedimentos. Se espera que en un futuro estas ideas que actualmente se presentan en una forma muy primitiva se puedan desarrollar con nuevos métodos y técnicas de medición y se logren transformar en una teoría más completa y en una herramienta útil para la ingeniería.

TESIS DE LICENCIADO  
DE LA UNAM

## BIBLIOGRAFÍA

- Allen, J.R.L., 1982. Sedimentary structures: their character and physical basis. Elsevier, Amsterdam, 539p.
- Allen, J.R.L., 1986. Physical sedimentology, George Allen & Unwin, London, 272 p.
- Antonia, R.A., 1988. The organised motion and its contribution to transport in turbulent shear flows. *Transport phenomena in turbulent flows. Theory, experiment, and numerical simulation*, Hirata, M., Kasagi N., Hemisphere Publishing-Corporation.
- Asaeda, T., Manandhar, K, Tamai, N., 1989. Sediment entrainment in channel with rippled bed. *J. of Hydraulic Engineer*. Vol 115, No. 3, pp. 327-
- Babakaiff, C.S., 1993. Flow hydraulics, bedforms, and macroturbulence of Squamish river estuary, British Columbia, Unpub. MSc Thesis, Simon Fraser Univ., 298 pp.
- Barbakaiff, C.S. Hickin, E.J., 1996. Coherent flow structures in Squamish river estuary, British Columbia, Canada. *Proceeding of the Coherent Flow Structures in Open Channels*, John Wiley & Sons Ltd.
- Best, J. L., 1993. On the interactions between turbulent flow structure, sediment transport and bedform development: some considerations from recent experimental Research. *Turbulence: Perspectives on Flow and Sediment Transport*. Edited by N.J. Clifford, J.R. French and J. Hardisty, Jhon Wiley & Sons Ltd.
- Barton, J.R., y Lin, D.J., 1955 *A study of sediment transport in alluvial channels*. Civil Engineering Department, Colorado A. and M. College, Fort Collins, USA.
- Batchelor, G.K., 1967. *An introduction to fluid mechanics*, Cambridge University Press (reimpreso 1979).
- Berkóoz, G., 1990. Dynamical-systems-theory approach to the wall region. AIAA Pap. No. 90-1639.
- Bennett, S.J., y Best, J.L., 1996. Mean flow and turbulence structure over fixed ripples an the ripple-dune transition *coherent flow structures in open channels*. Edited by P.J. Ashworth, S.J. Bennett, J.L. Best and S.J. Mc Lelland. Jhon Wiley & Sons Ltd.
- Bennett, S.J., y Best, J.L., 1995. Mean flow and turbulence structure over fixed, two-dimensional dunes: implications for sediment transport and dune stability, *Sedimentology*, 42, pp., 491-514.
- Blackwelder, R.F., Kaplan, R.E., 1976. On the wall structure of the turbulent boundary layer. *J. Fluid Mech.*, 76, pp. 89-112.
- Blackwelder, R. F., 1988. Coherent structures associated with turbulent transport, *Int. Symposia on Transport Phenomena in Turbulent flows*, Hemisphere Publishing Corporation. Pp69-88
- Blackwelder, R. F., Eckelmann, H., 1979. Streamwise vortices associated with the bursting phenomenon, *J. Fluid Mech.*, vol 94, pp. 577-594.

- Blackwelder, R. F., Kovaznay, L.S.G.,1972. Time scales and correlations in a turbulent boundary layer. *Phys. Fluids* , **15** ,pp 1545-54.
- Bogard, D. G., Tiederman, W. G., 1986. Burst detection with single-point velocity measurements, *J. Fluid Mech.*, vol.**162**, pp. 389-413.
- Brodkey, R., Wallace, J., Eckelmann, H., 1974. Some propieties of truncated turbulence signals in bounded shear flows. *J. Fluid Mech.*, vol **63**, pp 209-244
- Coleman, J.M.,1969. Brahmaputra River: channel processes and sedimentation. *Sediment. Geol.*, vol **3**, pp 129-239.
- Dilip K. B., Khalid H. R.,1998. Some aspects of turbulent flow structure in large alluvial rivers. *Journal of Hydraulic Research*, Vol., **36**, 1998, No 2. pp 235-252.
- Driver, D.M., Seegmiller, H.L., Marvin, J.,1987. Time-dependent behavior of a reattaching shear layer. *AIAA J.*, **25**: pp. 914-19.
- Dyer, K.R., 1986. *Coastal and Estuarine Sediment Dynamics*, John Wiley & Sons, New York, 342 pp.
- Engelund, F, y Fredsoe, J. 1982. Sediment ripples and dunes. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **14**, pp 13-37.
- Espinoza J., Caldiño I., Figueroa J.,1995. Construcción, pruebas y operación de módulos experimentales: Canal de fondo móvil del IMTALAB, Informe Técnico, Proyecto CH-9511, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, 1995.
- Falco, R.E.,1977. Coherent motions in the outer region of turbulent boundary layers, *Phys. Fluids*, **20**, S24-S32.
- García, M., Niño, Y., López, F., 1996. Laboratory observations of particle entrainment into suspension by turbulent bursting, *Proc. Coherent Flow Structures in Open Channels Flow*, Ed. Ashworth, P, Bennet, S, Best J., McLelland, S., pp 63-86.
- Garde, R.J., y Ranga Raju, K.G.1963. Regime criteria for alluvial streams, *J. Hydr. Div.*,vol **89**, pp 156-164.
- Grass, A. J., 1971, Structural features of turbulent flow over smooth and rough boundaries, *J. Fluid Mech.*, vol. **50**, pp. 223-256.
- Guy, H. P., Simons, D. B., and Richardson, E. V., 1961. *Summary of alluvial channel data from flume experiments*, USGS Professional Paper 462-I U. S. Geological Survey, Washington, D. C.
- Gyr, A., 1992. *Three-dimensional sparation*. Short course on flow visualization and flow structures, Zurich.
- Hayashi, T. 1970. Formation of dunes and antidunes in open channels. *ASCE J. Hydraul. Div.*, vol **96**, pp 357-366.
- Hunt, J.C.R., Abell, C.J., Peterka, J.A., Woo, H.,1978. Kinematical studies of the flows around free or surface-mounted obstacles: applying topology to flow visualization. *J. Fluid Mech.* **86**. pp. 179-200.
- Ikeda, S.,y Asaeda, T.,1983. Sediment suspension with rippled bed. *J. Hydr Engrg.*, ASCE, **109**, 3, 409-423.

- Itakura, T. y Kishi, T., 1980. Open channel flow with suspended sediment on sand waves. *Proc. 3<sup>rd</sup> International Symposium on Stochastic Hydraulics* (Ed. By Kikkawa and Y. Iwasa), pp. 599-609. Int. Ass. of Hydraul. Res., Tokyo.
- Jackson, R.G., 1976. Sedimentological and fluid dynamic implications of the turbulent bursting phenomenon in geophysical flows. *J. Fluid Mech.*, vol 77, pp. 531-560
- Kaftori, D., Hetsroni, G., Banerjee, S. 1994. Funnel shaped vortical structures in wall turbulence. *Phys. Fluids*, 6, pp.3035-3050.
- Kim, J., Moin, P., Moser, R., 1987. Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number, *J. Fluid Mech.*, vol. 177, pp. 133-166.
- Klebanoff 1954. The three dimensional nature of boundary layer instability, *J. Fluid Mech.* vol.,12, pp. 21-34.
- Klebanoff ,1954. The three dimensional nature of boundary layer instability, *J. Fluid Mech.* 12, pp. 21-34.
- Kline, S. J., Reynolds, W. C., Shraub, F. A., Runstadler, P. W., 1967, The structure of turbulent boundary layers, *J. Fluid Mech.*, vol 30, pp. 741-773.
- Komori, S. Murakami, Y., Ueda, H. 1989. The relationship between surface-renewal and bursting motions in an open-channel flow. *J. Fluid Mech.*, vol. 203, pp.103-123
- Korchokha, Y.M., 1968 Investigation of the dune movement of sediments on the Polomet River. *Sov. Hydrol.*, vol 11, pp 541-559
- Kostaschuk, R.A. y Church, M.A. 1993 Macroturbulence generated by dunes: Fraser River, Canada. *Sediment. Geol.*, vol 85, pp 25-37.
- Lamb, H., 1932. *Hydrodynamics*, 6<sup>th</sup> edición, Cambridge: Cambridge University Press (reimpreso New York: Dover 1945).
- Landhal, M .T., 1990. On sublayer streaks. *J. Fluid Mech.*, vol, 212 , pp.593-614.
- Lapointe, M.F., 1989. *Sediment suspension by turbulent bursting over advancing river dunes*, Unpub. PhD Thesis, Univ. Of British Columbia, 164 pp. .
- Lane, E.W., 1944. A new method of sediment transportation, *Trans. AGU*, 25, 900.
- Levi, E., 1983. Oscillatory model for wall-bounded turbulence, *J. Eng. Mech. ASCE*, 109, pp 728-740.
- Levi, E., 1983. A universal Stouhal law, *J. Eng. Mech. ASCE*, 109 (3), 718-728.
- Levi, E., 1972. Experiments on unstable vortices *J. Eng. Mech. Div.* Vol 98, p 539-559
- Levi, E., 1991. Vortices in hydraulics, *J. Hydraul. Eng.*, vol 117, pp 399-413.
- López, F., Niño, Y., García, M., 1996. Estructuras coherentes turbulentas en canales abiertos con fondo liso, *Ingeniería Hidráulica en México*, vol. XI, pp 5-13.
- Lu, S.S., y Willmarth, W., 1973. Measurements of the structure of the Reynolds stress in a turbulent boundary layer. *J. Fluid Mech.*, 60, pp. 481-511.

- Luchik, T. S., Tiederman, W. G., 1987, Timescale and Structure of Ejections and Bursts in Turbulent Channel Flows, *J. Fluid Mech.*, vol., **174**, pp. 529-552.
- Lyn, D.A., 1993. Turbulence measurements in open-channel flow over artificial bedforms, *J. Hydraul. Engrg.*, **119**, 304-326.
- Mantz, P., 1992. Cohesionless, fine-sediment bed forms in shallow flows, *Journal of Hydr. Eng.*, vol **118**, pp. 743-763
- Martínez-Austria, P., 1988, *Procesos de catástrofe en Hidráulica*, editorial del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, 1988.
- Matthes, G. H. 1947. Macroturbulence in natural stream flow, *Trans. AGU*, **28**, pp 255-265.
- McLean, S.R., Nelson J.M. and Wolfe, S.R., 1994. Turbulence structure over two-dimensional bedforms : implications for sediment transport. *J. Geophys. Res.*, vol **99**, pp 12727-12747.
- McCorquodale, J.A. y Giratalla, M.K., 1973. Flow over natural and artificial ripples, in *Proc. 15<sup>th</sup> Congress, Inter. Assoc. Hydraul. Res.*, Istanbul,!, A22-1-A22-6.
- Moin, P., Kim, J., 1985. The structure of the vorticity field in turbulent channel flow, *J. Fluid Mech.*, vol. **155**, pp. 441-464.
- Mendoza, C y Shen, H.W., 1990. Investigation of turbulent flow over dunes. *J. Hydraul. Eng.*, **116**, pp. 459-477.
- Muller, A. 1985. An experimental investigation of the mixing layer behind dunes with combined flow visualization and velocity measurement. *Proc. International Symposium on Refined Flow Modelling and Turbulence Measurements*, University of Iowa, Iowa City 1985.
- Müller, A y Gyr, A., 1986. Geometrical analysis of feedback between flow, bedforms and sediment transport. *Coherent Flow Structures in Open Channels*. Jhon Wiley & Sons.
- Müller, A. and Gyr, A., 1986. On the vortex formation in the mixing layer behind dunes. *J. Hydraul. Res.*, vol **24**, pp 359-375.
- Nakagawa, H., Nezu, I., 1977, redication of the contribution to the Reynolds Stress from bursting events in open-channel flow, *J. Fluid Mech.*, vol.**80**, pp. 99-128.
- Nakagawa, H., Nezu, I., 1981. Structure of space-time correlations of bursting phenomena in an open-channel flow, *J. Fluid Mech.*, vol **104**, pp. 1-43.
- Nakagawa, H., y Nezu, I., 1987. Experimental investigation on turbulent structure of backward-facing step flow in an open channel, *J. Hydraul. Res.*, **25**, pp. 67-88.
- Nezu, I., Nakagawa, H., 1993. *Turbulence in Open Channel Flow*. IAHR, Ed. Balkema.
- Nelson, J. M., McLean, S.R. y Wolfe, S.R. 1993. Mean flow and turbulence fields over two -dimensional bed forms, *Water Resour. Res.*, **29**, pp. 3935-3953.
- Nelson, J.M. y Smith, J.D. 1989. Mechanics of flow over ripples and dunes, *J. Geophys. Res.*, **94**, pp.8146-8162.

- Nezu, I., Kadota, A., Shinbashi, H., Kurata, M., 1997. Conditional sampling analysis on coherent vortices in unsteady open-channel flows over dune bed., *Proceeding of the Hydraulic Engineering 97, ASCE*, pp 1207-1217, San Francisco, Cal.
- Nezu, I., Rodi, W. 1986. Open-channel flow measurements with a laser doppler anemometer, *J. Hydr. Engr.* Vol **112**, No 5, pp 335-354
- Nicolis, G., y Prigogine, I., 1977. *Self -Organization in Nonequilibrium Systems*. New York, Wiley.
- Nychas, S.G., Hershey, H.C., 1973. A visual study of turbulent shear flow, *J. Fluid Mech.*, vol **61**, pp. 513-40.
- Onslow, R.J., Thomas, N.H., Whitehouse, R.J.S., 1993. Vorticity and sandwaves: the dynamic of ripples and dunes. *Turbulence: Perspectives on Flow and Sediment Transport*. Ed. Clifford, N.J., French y Hardisty, J. Jhon Wiley & Sons Ltd. pp279-293.
- Ottino, J.M., 1997. *The kinematics of mixing: stretching, chaos, and transport*, Cambridge University Press.
- Perry, A.E. y Chong M.S., 1987. A description of eddying motions and flow patterns using critical-point concepts. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **19**, pp125-55.
- Perry, A.E., Chong, N.S., 1982. On the mechanism of wall turbulence. *J. Fluid Mech.* **23**, pp.601-639.
- Perry, A.E., y Fairlie, B.D., 1974. Critical points in flow patterns. *Adv. In Geophys.*, **18B**, 299-315.
- Praturi, A.K., Brodkey, R. S., 1978. A stereoscopic visual study of coherent structures in turbulent shear flow. *J. Fluid Mech.* Vol **89**, pp. 251-72
- Rao, K.N., Narashimha, R. Narayanan, B., 1971. The bursting phenomenon in a turbulent boundary layer. *J. Fluid Mech*, **48**, pp. 339-352.
- Rashidi, M., 1997. Burst-interface interactions in free surface turbulent flows. *Phys. Fluids* **9**, pp. 3485-3501.
- Rashidi, M., Banerjee, S., 1990, Streak characteristics and behavior near wall and interface in open channel flows, *Phys. Fluids*, vol. **112**, pp. 164-169.
- Raudkivi, A.J. 1966. Bed forms in alluvial channels. *J. Fluid Mech.*, **26**, pp507-514.
- Reed H.L., Saric, W.S., 1989. Stability of three dimensional boundary Layers. *Ann. Rev. Fluid Mech.* **21**, pp. 235-84.
- Rijn, L.C. van, 1993 Principles on sediment transport in rivers, estuaries, coastal, seas and oceans, DELFT.
- Roberts, F.A., 1985. Effects of a periodic disturbance on structure and mixing in turbulent shear layers and wakes, Ph. D Thesis, Graduate Aeronautical Laboratories, California Institute of Technology.
- Robinson, S. K., 1991. Coherent motions in the turbulent boundary layer, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, vol. **23**, pp. 601-639
- Ruck, B. y Makiola, B., 1987. Flow over a single-sided backward facing step with step angle variations, in Turner, J.T. Ed. *Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. Laser Anemometry*

- Robinson, S.K., 1990a. Coherent motions in the turbulent boundary layer. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **23**, 601-639.
- Robinson, S.K. 1991. Coherent motions in the turbulent boundary layer. *Annu. Rev. Fluid Mech.* **119**, pp. 173-217.
- Sattinger, D.H. 1980. Bifurcation and symmetry breaking in applied mathematics. *Bull. Am. Math. Soc.* **3**, pp.779-819.
- Simpson R.L., 1989. Turbulent boundary-layer separation. *Ann. Rev. Fluid Mech.* **21**, pp. 205-34.
- Smith, C. R., Metzler, S. P. The characteristics of low-speed streaks in the near-wall region of a turbulent boundary layer, *J. Fluid Mech.*, vol. **129**, pp. 27-54.
- Smits, A. J., 1982. A visual study of a separation bubble. In flow visualization II, ed. W, Merzkirch, pp. 247-51., Washington, D. C. Hemisphere.
- Stuart, J.T. 1967. On finite amplitude oscillation in laminar mixing layers, *J*
- Sutherland, A.J. 1967. Proposed mechanism for sediment entrainment by turbulent flows. *J. Geophys. Res.*, **72**, 6183-6194.
- Sumer, B.M. y Deigaard, R. 1981 Particle motions near the bottom in turbulent flow in an open channel. Part 2. *J. Fluid Mech.*, vol **109**, pp 311-338.
- Tamai, N., Asaeda, T., and Tanaka, N., (1987). Vortex structures around a hemispheric hump. *Boundary-layer meteorol.*, **39**, 301-314.
- Townsend, A .A., 1970. Entrainment and the structure of turbulent flow. *J. Fluid Mech.* **41**, 13-46.
- Tritton, D.J., 1988. *Physical Fluid Dynamics*, 2<sup>nd</sup> edn. Clarendon Press, Oxford, pp. 519.
- Utami, T., Ueno T., 1987. Experimental study on the coherent structure of turbulent open-channel flow using visualization and picture processing. *J. Fluid Mech.* Vol **174**, pp. 399-440.
- van Mierlo, M.C, L.M., y Ruiter, J.C.C., 1988. Turbulence measurements above artificial dunes. *Delft Hydraulics*, Q789, Vols. **1 y 2**.
- Vanoni, V.A. y Hwang, L.S., 1967. Relation between bed forms and friction in streams. *ASCE J. Hydraul. Div.*, **93**, pp. 121-144.
- Wallace, J., Eckelmann, H, y Brodkey, S., 1972. The wall region in turbulent shear flow, *J. Fluid Mech.*, vol **54**, pp. 39-48
- Willmarth, W.W., y Lu, S.S., 1972. Structure of the Reynolds stress near the wall, *J. Fluid Mech.*, vol., **55**, pp., 65-92.
- Yalin, M.S. 1992. *River Mechanics*, Pergamon Press, Oxford, 219 pp.
- Yokosi, S., 1967. The structure of river turbulence, *Bull. Disaster Prevention Res. Inst., Kyoto Univ.*, **71**, 2-121.
- Zanke, U., 1985. Turbulence and suspension related to different bed roughness, Euromech 192. *Transport of Suspended Solids in Open Channels*, Neubiberg, Munich, F.R. pp. 157-160.
- Zippe, H., y Graf, W.H., 1983. Turbulent boundary layer flow over permeable and non permeable rough surfaces. *J. of Hydraul. Res.*, vol **21**, pp 51-65

## ANEXO I

### Actividades Relevantes Relacionadas con la Investigación Doctoral

#### Publicaciones:

#### Revistas:

- 1.-J. Rojas,P. Martínez, J. Espinoza, S. Vargas. **Image Processing and Velocity Measurements in the Turbulent Boundry layer of a Laboratory Shallow Channel.** *Journal of Hydrology Hydromechanics*, 1999,47, 2,pp.81-92.
- 2.-Espinoza J., Martínez, P., Rojas J., Avila F., **"Análisis del flujo en un canal de laboratorio con formas de fondo fijas"** *Ingeniería Hidráulica en México*, Vol. XV, Núm.2, pp. 75-84, mayo-agosto de 2000.

#### Artículos en Foros Internacionales:

- 1.- J. Espinoza, J. Rojas, P. Martínez , I. Caldiño. **Experimental Study of Bed Forms in Shallow Channel**, *Advances in Fluid Mechanics I*. Computational Mechanics Publications, New Orleans, 1996, pp. 245-254.
- 2.- , J. Rojas, J. Espinoza, P. Martínez **"Evidencia Experimental de una Catástrofe Tipo Cúspide en la Relación entre Formas de Fondo,Transporte en Suspensión y Factores de Fricción"**, , XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Guayaquil Ecuador, Oct. 1996.
- 3.- J. Espinoza, J. Rojas, P. Martínez y S. Vargas. **Flow visualization and velocity measurements in the turbulent boundary layer of a laboratory shallow channel.** *Advances in Fluid Mechanics II*, Computational Mechanics Publications, Udine 1998, pp. 355-363.
- 4.-P. Martínez, J. Rojas, J. Espinoza . **Características del flujo en un canal con formas de fondo fijas, obtenidas con visualización y anemometría de película caliente** XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, *Avances en Hidráulica* vol. 2, IAHR-AMH-IMTA,Oaxaca, México, 1998. Pp.
- 5.-Caldiño I, J. Espinoza. **"Verificación de métodos de estimación de regímenes de flujo en corrientes aluviales.** XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, *Avances en Hidráulica*, AMH- IMTA,Oaxaca, México, 1998., pp
- 6.-Espinoza,J., Martínez A.. **"Experimental Study of Tubulent Macro-structures bhind dunes**, ASCE - 2000 *Joint Conference on Water Resources Engineering and Planning and Management*, Minnesota, USA. Julio 2000. (en CD)

7.-Espinoza, J., Martínez, P., Rojas, J. **Visualización de Flujo y Medición de velocidades en un flujo detrás de formas de fondo.** *XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Tomo, pp- 757-766 Córdoba, octubre 2000.

#### **Artículos en Foros Nacionales**

- 1.- J. Espinoza., I. Caldiño, J Figueroa, J. Rojas. **Formas de fondo y factores de fricción en un canal**, *XXXVIII Congreso Nacional de Física*, Zacatecas, Zac., 1995
- 2.- J. Espinoza, J. Rojas, F. Ávila, I. Caldiño. **Estudio experimental de formas de fondo y transporte en suspensión.** *Memorias técnicas del XIV Congreso Nacional de Hidráulica*, tomo II, pp. 40-1-7 Acapulco, México, 1996.
- 3.-J. Rojas, J. Espinoza, S. Vargas y J. García, **Correlaciones entre velocidades e imágenes del flujo en la capa límite turbulenta en un canal**, *IV Congreso de la División de Dinámica de Fluidos* . SLP, México, oct.1998.

#### **Conferencias por invitación.**

- 1.-**Formas de fondo y Transporte de sedimentos** -1er Seminario Sobre Modelación Numérica de Procesos Ambientales en el Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, Mor., Dic. 1995.
- 2.- **Formas de fondo y transporte de sedimentos en canales** *Reunión de la División de Dinámica de Fluidos.* Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, IPN, feb 1997.
- 3.- **Estudio experimental del flujo sobre formas de fondo fijas** *Seminario de Turbulencia en Fluidos*, de la División de Dinámica de Fluidos de la Sociedad Mexicana de Física en el IMTA, junio 1998.