

01162

6



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

PROYECTO:

MEDICION SIMULTANEA DE VELOCIDADES DE LAS FASES LIQUIDA Y SOLIDA Y DE CONCENTRACIONES EN FLUJO EN CANALES CON SEDIMENTOS.

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
**MAESTRO EN INGENIERIA**  
(OPCION INGENIERIA HIDRAULICA)  
P R E S E N T A  
PEDRO ANTONIO GUIDO ALDANA

DIRECTOR DE TESIS: DR. JORGE ROJAS MENENDEZ



MEXICO,

AGOSTO DE 2003.

1

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



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.

**TESIS  
CON  
FALLA DE  
ORIGEN**

# PAGINACIÓN DISCONTINUA

**A mi hermano**

**Reinaldo Javier**

**Siempre te recordaremos...**

2

TESIS CON FALLA DE ORIGEN
------------------------------

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, Gran Arquitecto del Universo, por haber abierto mi entendimiento y guiado durante los momentos difíciles.

Al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua IMTA, a la DEPTI – UNAM Campus Morelos y al Centro de Investigación en Energía CIE - UNAM por recibirme y apoyarme durante mis estudios.

A mis sinodales:

Dr. Jorge Rojas Menéndez  
Dra. Guadalupe Huelsz Lesbros  
Dr. Roberto Zenit Camacho  
Dra. Josefina Espinoza Ayala  
MSc. Alfonso Olaiz y Pérez

Especial agradecimiento a mi asesor, Dr. Jorge Rojas Menéndez por su permanente apoyo y a la Dra. Guadalupe Huelsz por su aporte en la elaboración de este documento. Al Dr. Roberto Zenit y al Dr. Ramón Herrera por haberme permitido realizar los experimentos en el Laboratorio de Reología del Instituto de Investigación en Materiales.

Al M. I. Jesús Manuel Palacios Gallegos por iniciarme en el manejo del equipo de Velocimetría por Imágenes de Partículas, al Ing. Guillermo Hernández Cruz por su apoyo en la parte técnica y a la M. I. Minerva Vargas por sus sugerencias y comentarios.

A mis padres, quienes han dado lo mejor de sí para que la familia salga adelante. A ti mamá, que has sufrido por mi ausencia, dedico esta tesis. A ti papá, porque sé que siempre me has acompañado.

Muy especialmente a mis hermanos Héctor, María Isabel y Reinaldo, mis sobrinos Reinaldo, Camilo y Mauricio, mis abuelitas Julia e Isabel, mis tíos y tías y en especial a mi padrino Ramón.

Con amor a Adriana María Ramírez Camperos.

A mis amigos Willinton e Ivan, con quienes conformé un gran equipo.

A Luz Mari Rojas por su apoyo y amistad.

A Marilú Barba y Marilú Pineda por sus consejos.

A mis profesores y a mis compañeros de Maestría.

3

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

***“Este trabajo de investigación fue realizado con una beca otorgada por el Gobierno de México a través del Instituto Mexicano de Cooperación Internacional (IMEXCI) de la Secretaría de Relaciones Exteriores”***

4

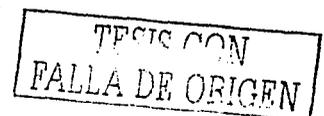
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

# MEDICIÓN SIMULTÁNEA DE VELOCIDADES DE LAS FASES LÍQUIDA Y SÓLIDA Y DE CONCENTRACIONES EN FLUJO EN CANALES CON SEDIMENTOS

## CONTENIDO

	<u>Pág.</u>
LISTADO DE FIGURAS.....	i
LISTADO DE TABLAS.....	iii
NOMENCLATURA.....	iv
SÍMBOLOS GRIEGOS.....	vi
RESUMEN.....	vii
<b>CAPÍTULO 1</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	
1.1 Motivación.....	1
1.2 Desarrollo del PIV durante las últimas dos últimas décadas.....	7
1.3 Objetivos.....	9
<b>CAPÍTULO 2</b>	
<b>DESCRIPCIÓN DEL ARREGLO EXPERIMENTAL E INSTRUMENTACIÓN</b>	
2.1 Canal y accesorios.....	10
2.2 Operación del canal.....	14
2.3 Arreglos experimentales para la medición de velocidades de la fase sólida y líquida simultáneamente.....	15

5



2.3.1 Arreglo experimental con una caja de vidrio para afinar la técnica de medición simultánea de velocidades..... 15

**CAPÍTULO 3**

**METODOLOGÍA Y FUNCIONAMIENTO DEL PIV**

3.1 Equipo..... 21

3.2 Medición de concentraciones..... 22

3.3 Medición de velocidades (Fases Líquida y Sólida)..... 24

3.4 Procesamiento de imágenes por medio del PIV..... 27

3.5 Cálculo de velocidades..... 29

    3.5.1 Enfoque..... 30

    3.5.2 Calibración del equipo..... 30

    3.5.3 Máscara (Masking)..... 32

    3.5.4 Correlación cruzada..... 33

    3.5.5 Velocidades de la fase sólida..... 37

    3.5.6 Correlación de adaptación..... 38

3.6 Validación de los vectores calculados..... 42

3.7 Velocidad media y desviación estándar..... 45

**CAPÍTULO 4**

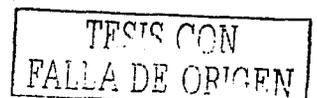
**RESULTADOS Y ANÁLISIS**

4.1 Descripción del flujo aguas arriba de la forma de fondo..... 47

4.2 Concentración de la fase sólida..... 48

4.3 Medición de velocidades de la fase sólida y líquida simultáneamente..... 52

6



4.3.1 Ensayos con la caja de vidrio.....52  
4.3.2 Resultados de los experimentos en el canal de acrílico. Medición  
simultánea de velocidades.....57  
4.3 Cálculo de la desviación estándar en las mediciones y comentarios.....65  
4.3.1 Comentarios sobre las desviaciones estándar.....65

**CAPÍTULO 5**  
**CONCLUSIONES**

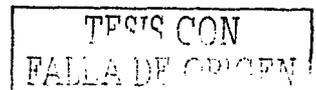
5.1 Conclusiones generales.....68  
5.2 Trabajo de investigación a futuro.....70

**BIBLIOGRAFÍA.....**

**REFERENCIAS.....**

**ANEXO (REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA).....**

7



## LISTADO DE FIGURAS

FIGURA	TITULO
1.1	a) Sistema coordinado en un canal abierto. b) Sección transversal arbitraria de un canal abierto.
1.2	Ejemplo de un flujo bifásico.
2.1	a) Esquema del dispositivo experimental. b) Foto del dispositivo experimental.
2.2	Prueba de enfoque de puntos iguales sobre la cuerda de una plomada.
2.3	Prueba de enfoque de puntos iguales sobre una cuadrícula ubicada en el centro de la caja de vidrio.
2.4	Dispositivo instrumental para pruebas preliminares en la caja de vidrio.
2.5	Dispositivo instrumental para mediciones simultáneas de velocidades en el canal de acrílico.
2.6	Dispositivo instrumental para medición simultánea de velocidades.
3.1	Equipo de adquisición de datos PIV.
3.2	Máscara empleada para efectuar el conteo visual en tres alturas distintas de la lámina de agua: 1 mm, 7 mm y 14 mm.
3.3	Esquema ilustrativo que muestra las zonas de medición de concentraciones.
3.4	Estructura de la base de datos.
3.5	Imagen tomada al momento de enfocar.
3.6	Proceso de calibración del equipo PIV.
3.7	Máscara empleada en la presente investigación.
3.8	Esquema ilustrativo del proceso de correlación cruzada.
3.9	Esquema de aplicación de la correlación cruzada.
3.10	Esquema que muestra un par de imágenes divididas en áreas de interrogación.

3.11	Vector desplazamiento estimado y selección de una nueva área de interrogación.
3.12	Esquema del proceso de análisis que lleva a cabo la correlación de adaptación.
3.13	Gráfico de correlación en una dimensión donde se aprecia el mayor pico y el segundo pico más alto.
4.1	Zona de recirculación.
4.2	Gráfico de alturas en función de las concentraciones por conteo en pantalla (adimensionalizadas).
4.3	Imágenes de las fases sólida y líquida en la caja de vidrio.
4.4	Campos vectoriales correspondientes a las fases sólida y líquida en la caja de vidrio.
4.5	Superposición de los campos vectoriales correspondientes a la fase sólida (vectores rojos) y a la fase líquida (vectores azules). Ensayos en la caja de vidrio.
4.6	Variación de la magnitud de la velocidad en los ejes X y Y dentro de la caja de vidrio.
4.7	a) Imagen de la fase sólida y su respectivo campo vectorial de velocidades. b) Imagen de la fase líquida y su respectivo campo vectorial de velocidades. c) Superposición de los campos vectoriales bidimensionales de velocidad de las fases líquida y sólida sobre una imagen de fase líquida.
4.8	Perfiles de velocidad adimensionalizados para ambas fases.

## LISTADO DE TABLAS

TABLA	TITULO
2.1	Parámetros experimentales.
4.1	Resultados de la desviación estándar para los tres ensayos de la prueba 1 de concentraciones.
4.2	Promedio de las concentraciones y desviación estándar para las tres pruebas efectuadas.
4.3	Resultados de la variación de la concentración en las tres pruebas.
4.4	Velocidades de la fase sólida en las direcciones X y Y desde los primeros 4 mm de altura a partir del fondo del rectángulo en la figura 4.5.
4.5	Velocidades de la fase líquida en las direcciones X y Y desde los primeros 4 mm de altura a partir del fondo del rectángulo en la figura 4.5.
4.6	Resultados de velocidad instantánea para la fase sólida.
4.7	Resultados de velocidad instantánea para la fase líquida.
4.8	Resultados del cálculo de la desviación estándar de la velocidad para la fase sólida empleando la media de una serie de datos.
4.9	Resultados del cálculo de la desviación estándar de la velocidad para la fase líquida empleando la media de una serie de datos.

## NOMENCLATURA

D	Diámetro del sedimento
dt	Diferencial de tiempo
d <sub>pixel</sub>	Medida de un pixel (1 pixel $\equiv$ 0.01mm)
d <sub>p</sub>	Diámetro de los trazadores
d <sub>s</sub>	Diámetro límite del área de difracción definida por el sistema óptico
dx , dy	Desplazamiento en la dirección x e y
F	Número de Freud
FFT	Transformada rápida de Fourier
FFT <sup>-1</sup>	Transformada inversa de Fourier
g	Aceleración debida a la gravedad
H	Profundidad del flujo
HP	Potencia de la bomba
hf	Altura de la forma de fondo
I, I'	Intensidad de luz en un área de correlación en un tiempo t y otro t+ $\Delta$ t
$\hat{I}, \hat{I}'$	Transformadas de Fourier de I e I'
$\hat{I}$	Conjugado complejo de una transformada de Fourier
L	Longitud de la forma de fondo
n	Nano (equivale a 10 <sup>-9</sup> )
PIV	Particle Image Velocimetry (Velocimetría por imágenes de partículas)
Q	Gasto
R	Número de Reynolds

$R_{tt}(x, y)$	Función de correlación espacial
$S$	Factor de escala del equipo PIV
$t$	Tiempo
$t_0$	Tiempo inicial
$\Delta t$	Intervalo de tiempo
$\bar{u}$	Velocidad media
$U_m$	Velocidad media del flujo
$V_x, V_y$	Velocidad en la dirección x e y

## ***Simbolos griegos***

$\delta$	Desplazamiento
$\varepsilon$	Espesor de una capa de partículas en el fondo de un río
$\eta$	Número de capas de partículas
$\phi$	Diámetro de las mangueras del sistema de recirculación
$\lambda$	Longitud de onda de la luz reflejada por los trazadores
$\mu$	Micras ( $10^{-6}$ metros)
$\nu$	Viscosidad cinemática ( $H/P$ )
$\sigma$	Incertidumbre o error aleatorio en la medición de velocidades con PIV

## **RESUMEN**

Este documento presenta la implementación de la técnica de Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV) en la medición simultánea de velocidades de las fases sólida y líquida y de concentraciones en flujo en canales abiertos con transporte de sedimentos. La adquisición de datos se hizo mediante el equipo de Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV) y su procesamiento se llevó a cabo con el programa FlowManager 3.5. Un canal de pequeñas dimensiones 1.00 m x 0.05 m x 0.10 m elaborado en lámina de acrílico y dotado con un sistema de recirculación se empleó en la realización de las pruebas. Se diseñó una forma de fondo semejante a una duna de río bajo los criterios de Vanoni - Hwang (1967) y Freedsoe (1982), con dimensiones de 2 mm en altura y 34 mm en el largo. Se ubicó a 0.67 m de la entrada del canal, 33.5 veces la altura de agua. Para el análisis de la fase líquida se usaron como trazadores microesferas fluorescentes de 15  $\mu\text{m}$  y para el transporte de sedimentos se añadieron microesferas teñidas con rodamina con tamaños comprendidos entre las 63  $\mu\text{m}$  y las 105  $\mu\text{m}$ , mayores casi diez veces que los trazadores. La medición de las concentraciones se llevó a cabo mediante el conteo visual de las partículas observadas en las imágenes de la fase sólida obtenidas con el PIV. Para el cálculo de concentración por unidad de volumen se tomó en cuenta el espesor de la luz del láser y las dimensiones del área marcada en la pantalla de la computadora. El plano de luz, bajo el cual sedimentos y trazadores se excitaron, fue generado a partir de un láser pulsado de doble cavidad de tipo Nd:YAG; las partículas emitieron luz con una determinada longitud de onda (trazadores 520 nm y sedimentos 570 nm). Dos cámaras Kodak ES 1.0 de alta resolución dotadas cada una con un filtro para la luz correspondiente a los trazadores y a los sedimentos fueron empleadas, ofreciendo la posibilidad de ver las fases líquida y sólida por separado. Cada cámara tenía capacidad para tomar 30 fotos por segundo con la modalidad de poder reducir el tiempo entre dos imágenes hasta 1  $\mu\text{s}$ . Se llevaron a cabo diversas pruebas para verificar el enfoque de las cámaras y afinar la técnica de medición simultánea con una caja de vidrio de pequeñas dimensiones. Luego de tener certeza sobre el funcionamiento del equipo, se procedió a su calibración y a la toma de muchas

secuencias de pares de imágenes. Parámetros experimentales tales como tirante, número de Reynolds y velocidad media del flujo, fueron controlados. Una vez adquirida la información fotográfica se realizó el análisis de la misma con ayuda del programa FlowManager 3.5. La rutina aplicada a las secuencias de imágenes grabadas, involucró que las zonas que no eran de interés para el análisis se cubrieran con una máscara; además se seleccionó la correlación de adaptación pudiéndose conocer campos vectoriales bidimensionales de velocidad representativos de cada fase. La superposición de los mismos permitió el análisis del comportamiento relativo de cada fase y la verificación de la capacidad de resolución espacial y temporal del equipo PIV. Pudo observarse que la fase sólida sigue muy bien el patrón de flujo de la fase líquida en zonas de alta velocidad. Los resultados obtenidos de velocidad y desviación estándar fueron del mismo orden en ambas fases: velocidades medias del orden de 0.134 m/s y la desviación estándar del orden de 6 %. A pesar de que en la fase sólida habían menos partículas que en la fase líquida, el programa es capaz de resolver con la misma incertidumbre. Con el fin de validar la técnica se tuvo que trabajar con la zona de alta velocidad, dado que la zona de recirculación no pudo resolverse. El éxito logrado en el desarrollo de la metodología permitirá el estudio de flujos en diferentes fases y la posibilidad de conocer con mayores detalles fenómenos más complejos en diferentes áreas de la ingeniería tales como el transporte de sedimentos y contaminantes en cuerpos de agua, determinar la influencia que tienen las partículas en suspensión sobre las estructuras turbulentas del flujo o las trayectorias que siguen partículas de combustible para optimizar la eficiencia de la combustión.

# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

Este capítulo provee una visión general de las motivaciones que dirigen el estudio del flujo en canales que transportan sedimentos.

### 1.1 MOTIVACIÓN

Hacer una medición simultánea de las velocidades de las fases líquida y sólida al igual que de las concentraciones se fundamenta en la necesidad de conocer más sobre la interacción entre la turbulencia y las partículas que son transportadas por un fluido. La alteración de la turbulencia en una región y la forma como son generados los mecanismos de transporte de sedimentos en ríos siguen siendo tema actual de investigación.

Es de resaltar que el transporte de sedimentos es un fenómeno complejo, así como también lo es su cuantificación. Muchos factores han influido en el hecho de que todavía no se cuente con fórmulas confiables para establecer con gran exactitud la cantidad de sedimentos arrastrados por una corriente de agua: la imprecisión en los datos adquiridos, la falta de una teoría sólida, la forma como se ha procedido en el estudio de este tema y un factor muy importante que tiene que ver con el no poder representar el comportamiento completo de las partículas, ya sean las que se encuentran en el fondo o las que son puestas en suspensión y luego arrastradas en el seno del fluido. Lo anterior ha conducido a que muchos investigadores profundicen en el conocimiento de cómo el flujo interviene en el movimiento de las partículas y de esta forma obtener parámetros con un significado físico tangible. Esta posibilidad presente en la experimentación no ocurre en un análisis dimensional común, en el que se seleccionan un grupo de variables que a criterio del investigador intervienen en el fenómeno que se estudia, para luego aplicar el teorema de Buckingham.

Importantes documentos como los publicados por R. A. Bagnold (1936a), (1936b), (1937), (1938), (1941), (1954), (1956), (1966a), (1966b), (1973), (1988) y (1990) dan cuenta del interés por el conocimiento de las propiedades reológicas de diferentes flujos. En la actualidad algunos de estos documentos han sido revisados en forma crítica con el fin de sugerir razones alternativas a los hallazgos experimentales, por ejemplo el artículo de revisión publicado por M. L. Hunt (2002).

J. Maza y M. García (1996) recopilan los principales métodos para determinar el arrastre de sedimentos en la capa de fondo y el arrastre total de los mismos (fondo y suspensión). Llama la atención que la primera fórmula para calcular el transporte de sedimentos en el fondo de un río o canal data del año 1879 y fue propuesta por Duboys (1879). Él consideró que el material del fondo se mueve en una serie de  $\eta$  capas superpuestas cada una de las cuales tiene un espesor  $\epsilon$  del mismo orden de magnitud que el diámetro de las partículas que la forman, y que supuso de diámetro uniforme. Consideró además la variación de la velocidad entre capas adyacentes e hizo uso de los conceptos de fricción y esfuerzo cortante para estimar el número de capas. Las apreciaciones de Duboys en el sentido de que el movimiento de los sedimentos se produce por capas está en desacuerdo con la realidad; sin embargo, su resultado en el sentido de que el arrastre depende de la diferencia del esfuerzo cortante de la corriente y del esfuerzo cortante crítico ha sido utilizado y obtenido posteriormente por muchos autores como Straub, Schoklitsch, Shields, Meyer – Peter y Mueller, Van Rijn, entre otros (Maza – García 1996). Hoy en día, a pesar de los avances tecnológicos en los sistemas de medición y visualización de flujos, sólo se ha logrado un acercamiento al conocimiento del comportamiento de los sedimentos en un fluido.

En las dos últimas décadas la tecnología de las computadoras y equipos ha permitido una mayor adquisición de datos en forma rápida y empleando técnicas de regresión múltiple. Las fórmulas así obtenidas se ajustan a un mayor número de datos, por lo que puede decirse que son más precisas dentro del rango y

condiciones en que dichos datos fueron adquiridos. Aunque pueda asegurarse su relativa mayor precisión, lo cual es importante para los ingenieros diseñadores y proyectistas, no contribuyen en nada al conocimiento de la interacción entre el agua y el sedimento, ni a la forma como las partículas son inicialmente puestas en movimiento y posteriormente arrastradas o transportadas. El vacío de conocimiento anteriormente expuesto ha motivado el diseño, desarrollo e implementación de técnicas tales como la Velocimetría por Imágenes de Partículas que permite conocer en detalle comportamientos asociados a sedimento y fluido. Esta técnica ha dado buenos resultados y hoy en día su aplicación es muy extendida en el campo de los flujos multifásicos.

Sistemas que constan de un flujo turbulento de gas o de líquido con partículas sólidas se pueden encontrar en múltiples procesos industriales y medioambientales, por lo que es de gran importancia entenderlos. Las estructuras vorticosas que se originan en flujos turbulentos sufren constantes cambios en su velocidad por la presencia de sedimentos. La posibilidad de accidentes en los sistemas neumáticos que son empleados en la conducción de materiales granulares (harina de trigo, polivinilo de cloruro o PVC, entre otros) está abierta como consecuencia de una inadecuada predicción de las interacciones partícula – turbulencia. La hidrodinámica de cuerpos de agua tales como los grandes lagos que son alimentados por corrientes superficiales o subterráneas, el transporte de contaminantes, son hoy día cuestión de estudio.

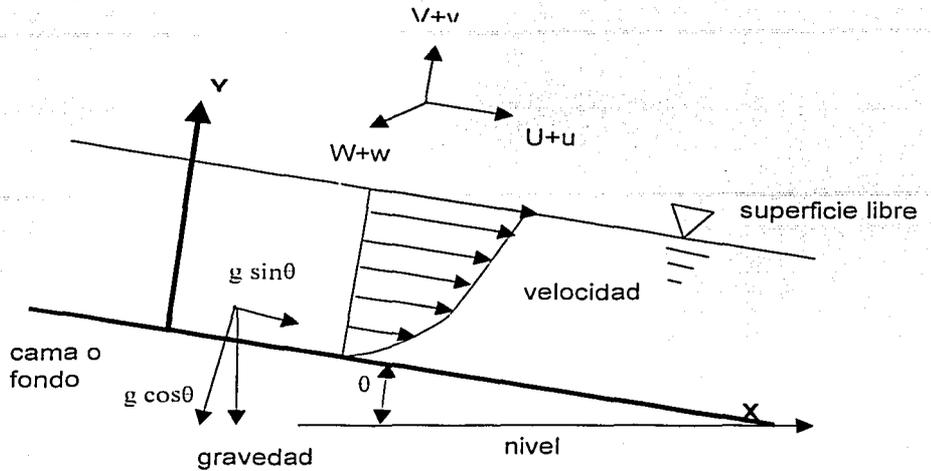
La turbulencia en flujo en canales abiertos consiste en movimientos con un amplio espectro de escalas que van desde las micras (escalas de Kolmogorov) hasta las correspondientes a la profundidad del canal. Los movimientos en todas las escalas son gobernados por las ecuaciones de continuidad y las de Navier Stokes, las cuales, en principio, se pueden resolver por medio de métodos numéricos. Sin embargo, a pesar de los grandes avances en la tecnología de las computadoras, tales simulaciones que resuelven los movimientos en todas las escalas, sólo son posibles para situaciones específicas idealizadas con bajos

números de Reynolds. En números de Reynolds altos, tal como se encuentra usualmente en la práctica, el tamaño de los remolinos turbulentos más pequeños es de  $10^{-4}$  a  $10^{-3}$  veces la profundidad del agua.

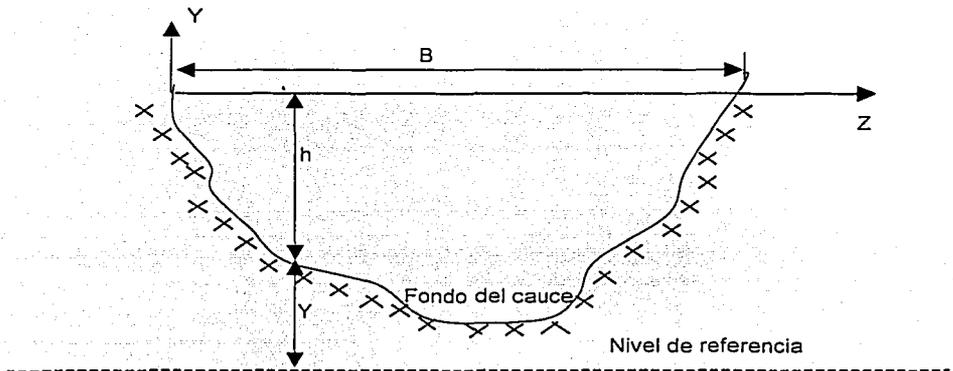
En la monografía escrita por Nezu y Nakagawa (1993), se menciona que las simulaciones numéricas directas permiten resolver las ecuaciones de Navier Stokes. Sin embargo, en el caso de los flujos turbulentos con números de Reynolds muy altos, las soluciones son difíciles de obtener, pues el número de puntos de las mallas empleadas es muy grande. Entonces, en tales simulaciones numéricas se necesita disponibilidad de una gran cantidad de memoria de computadora y de tiempo de cómputo si el número de Reynolds es alto. Kim es un investigador con amplia experiencia en simulación numérica: Kim (1987), (2000), (2001), (2003), y ha puesto de manifiesto en sus artículos las dificultades con relación al tiempo de cómputo y de disponibilidad de memoria a las que se debe enfrentar todo aquel que requiera de la simulación numérica directa. Hoy en día, a pesar del avance de la tecnología de las computadoras, muchas simulaciones requieren de numerosas horas de trabajo. Es de resaltar que por medio de la modelación numérica se han logrado resultados representativos del comportamiento estructural de la turbulencia, los cuales van de acuerdo a los obtenidos experimentalmente.

La investigación en el campo de la hidráulica y la mecánica de fluidos se lleva a cabo mediante la realización de experimentos en modelos de laboratorio. Un canal de pruebas de grandes dimensiones exigirá también que el laboratorio tenga el espacio suficiente. Los costos del dispositivo instrumental serán elevados. En caso de que se usen partículas pequeñas, la cantidad a emplear será bastante grande y su recuperación más difícil. En la figura 1.1a es posible observar el sistema coordinado en un canal abierto, así como una sección transversal típica del mismo en la figura 1.1b.

(a)



(b)



**Figura 1.1 (a) Sistema coordenado en un canal abierto  
(b) Sección transversal arbitraria de un canal abierto.**

La construcción de un canal (en este caso de acrílico) de pequeñas dimensiones, alimentado por medio de un sistema de recirculación, permite la aplicación de técnicas de medición de alta precisión para así analizar detalles del flujo y su interrelación con partículas sólidas a un costo reducido. De esta manera

es posible obtener, entre otros, campos de velocidad y de vorticidad, los cuales son requeridos por la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) con el fin de validar las simulaciones numéricas de flujos turbulentos.

En los estudios experimentales de mecánica de fluidos es recomendable, antes de hacer las mediciones de velocidad, presión, esfuerzos, entre otros, analizar cualitativamente el fenómeno mediante técnicas de visualización.

Por medio de la inyección de tinta o el uso de trazadores tales como las burbujas de hidrógeno es posible identificar estructuras turbulentas o estructuras coherentes. Remolinos (eddies), explosiones (bursting), movimientos vorticosos de gran escala, son algunos ejemplos de estructuras de interés en el estudio de flujo en canales.

Las técnicas clásicas para hacer mediciones de velocidad en flujos turbulentos (Anemometría de Hilo Caliente y/o Anemometría Láser Doppler - LDA), dan una muy buena resolución espacial y temporal pero tienen la desventaja de medir en un solo punto a la vez. Una técnica alternativa, desarrollada hace pocos años, es la Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV: *Particle Image Velocimetry*) que tiene la ventaja de medir velocidades en un plano completo (presenta un área de medición) pero la resolución temporal no es muy alta. Es de anotar que el concepto de resolución se refiere a la habilidad del equipo de registrar información en detalle y discriminándola. La resolución espacial designa al objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre una imagen. La resolución temporal hace referencia a la periodicidad con que un sistema adquiere datos.

Partículas fluorescentes han sido utilizadas para estudiar flujos bifásicos, por ejemplo el colapso de burbujas (Hassan *et al.* 1993), el flujo turbulento por el que pasa una burbuja (Tokuhiko *et al.* 1998), el ingreso de burbujas en un vórtice (Sridhar and Katz 1995) y el comportamiento de partículas gaseosas en un reactor (Hilgers *et al.* 1995).

La motivación principal del presente trabajo es aplicar técnicas de medición con las cuales sea posible cuantificar las variables que intervienen en el fenómeno de la turbulencia en flujo bifásico, que sirvan para proponer modelos matemáticos y validar técnicas numéricas.

## **1.2 DESARROLLO DEL PIV DURANTE LAS ÚLTIMAS DOS DÉCADAS**

La técnica de la Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV) se ha desarrollado intensamente durante los últimos 15 años por el hecho de que las técnicas de grabación analógicas de imágenes han sido reemplazadas por técnicas digitales.

De acuerdo con lo escrito por M. Raffel (1998) existe un gran número de artículos y textos que describen los principios básicos del funcionamiento del PIV. Un ejemplo es la *Milestone Series* (Serie Piedra Milenaria), editada por I. Grant en 1994 en la cual se mencionan los artículos de revisión de W. Lauterborn y A. Vogel (1984) así como el de R. Adrian (1991), entre otros, con lo cual se demuestra el interés por el estudio del PIV.

El estado del arte del PIV mostrado desde un punto de vista de la óptica se describe en el documento *Particle Image Velocimetry* escrito por K. Hinsch en 1993, incluido en el libro *Speckle Metrology*. Esta contribución es muy útil para el entendimiento de los aspectos ópticos del PIV.

Detalles de los fundamentos teóricos de la Velocimetría Digital de Partículas pueden encontrarse en el libro *Digital Particle Image Velocimetry – Theory and Practice*, publicado en 1993 por J. Westerweel. Este libro incluye más de 100 referencias.

I. Grant elaboró un artículo de revisión en 1997 llamado: *Particle Image Velocimetry: a Review*. Incluye un sumario de diferentes modificaciones al sistema

de iluminación del PIV, técnicas de evaluación y grabación de imágenes, entre otros.

La larga lista de referencias bibliográficas muestra que la velocimetría por imágenes de partículas es en la actualidad una herramienta muy aceptada cuando se requiere del conocimiento de campos de velocidades en diferentes áreas de la investigación.

En la actualidad, el mayor uso del PIV se da en la mecánica de fluidos, en investigaciones de flujo de aire y de agua. (Ver figura 1.2). Otras aplicaciones del PIV abarcan las investigaciones aerodinámicas, flujo en dos fases, combustión y otras relacionadas con turbomaquinaria.

Uno de los artículos que brindó una buena orientación para la investigación que aquí se presenta fue el de Dreier *et al.* (2000). Ellos condujeron experimentos en los que la idea principal fue añadirle al flujo dos tipos de partículas fluorescentes, unas que seguían el movimiento del fluido, se excitaban con una determinada longitud de onda y otras que representaban las partículas en suspensión emitiendo con otra longitud de onda. Se usaron cuatro cámaras y cada par grabó el movimiento de una fase. Además, las cámaras se ponían a funcionar de tal forma que una alta correspondencia entre imágenes estuviera garantizada. Aplicaron la técnica de la Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV) y los campos de velocidad se obtuvieron aplicando una técnica de mínimos cuadrados a las intensidades de grupos de partículas. Todo el montaje se aplicó al estudio de la sedimentación de partículas a través de una capa de mezclado en rápida evolución.

Para llevar a cabo el análisis de las imágenes correspondientes a cada fase se siguió la idea de desplazar las áreas de interrogación de la segunda imagen planteada por Keane & Adrian (1993) y mejorada por Scarano *et al.* (1999). Con este procedimiento resolvieron el problema de la salida de partículas de la

segunda imagen en los casos de fuertes gradientes de velocidad y de pequeñas escalas en flujos turbulentos.



**FIGURA 1.2** Se aprecia un flujo bifásico. Se distinguen dos tamaños de partículas y su análisis simultáneo es posible con el PIV. Imagen de archivo. Laboratorio de Transferencia de Energía y Masa, CIE – UNAM.

### 1.3 OBJETIVOS

El objetivo de esta investigación es el de desarrollar una metodología usando la técnica de la Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV) para la medición simultánea de velocidades de las fases líquida y sólida, siguiendo las ideas de Dreier *et al.* (2000) y Scarano *et al.* (1999), en canales con transporte de sólidos en suspensión. Además, determinar la concentración de la fase sólida aprovechando las imágenes del PIV. El documento que resulte sugerirá criterios importantes sobre la metodología propuesta a investigadores o estudiantes interesados en el estudio de flujo bifásico en canales.

## Capítulo 2

# DESCRIPCIÓN DEL ARREGLO EXPERIMENTAL E INSTRUMENTACIÓN

### 2.1 CANAL Y ACCESORIOS

Los experimentos se realizaron en un canal abierto elaborado con lámina de acrílico de 4 mm de espesor. El largo del canal fue de 1.00 m con un ancho de 0.05 m y altura de 0.10 m. A la entrada del mismo se colocaron topes con el fin de amortiguar la turbulencia, eliminar las fuertes ondulaciones en la superficie y uniformizar el flujo.

Una pequeña rampa de 2 mm de altura se ubicó al final del canal con el fin de evitar que la altura de la lámina de agua disminuyera al acercarse a la salida del canal. La altura de la lámina de agua para los experimentos de medición de concentraciones fue de 0.015 m y para los de medición simultánea de velocidades fue de 0.016 m. La zona de pruebas se localizó a 0.70 m de la entrada del canal. Se empleó una bomba de 1/40 HP con capacidad para bombear 0.32 l/s. El gasto  $Q$  se controló conectando la bomba a un autotransformador. La figura 2.1 muestra un esquema del dispositivo experimental.

A 0.67 m de la entrada del canal se instaló una forma de fondo que simula una duna de río con altura de 2 mm y largo 34 mm. Se trata de un elemento triangular con una suave pendiente del lado aguas arriba y otra a 45° aguas abajo. La altura de la forma,  $h_f$ , fue aproximadamente un 13 % del total de la profundidad del flujo y su longitud  $L$  de 17 veces  $h_f$ . El diseño de la duna se realizó mediante el criterio de Vanoni y Hwang (1967), el cual sugiere que la relación  $h_f/L$  no debe exceder 0.1, y el criterio de Freedsoe (1982), que recomienda una relación

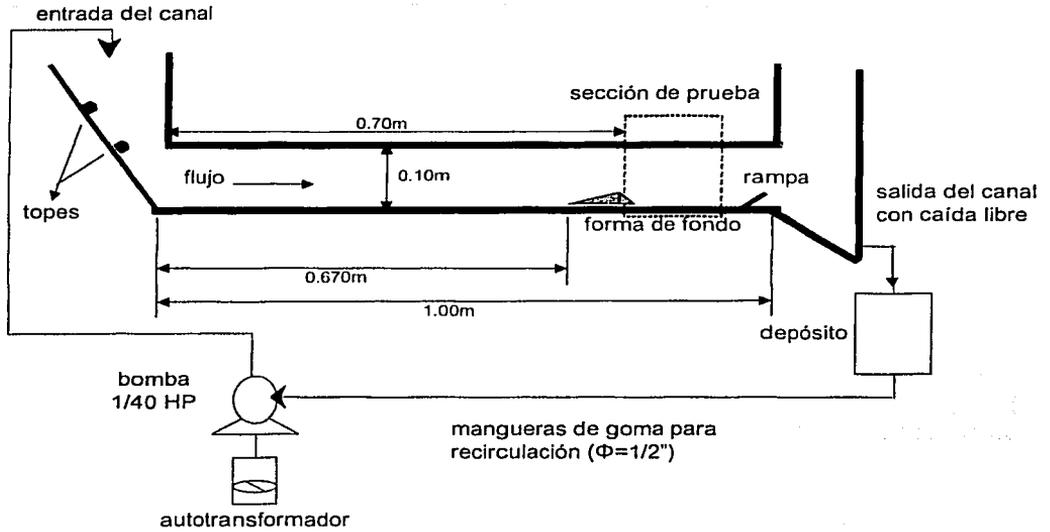
máxima  $h_r/L$  de aproximadamente 0.06. En ésta investigación la relación  $h_r/L$  fue de 0.059. Las mediciones fueron hechas a 48 veces la altura de la lámina de agua, a partir del inicio del canal. Con estas condiciones de trabajo se logró un flujo estable, es decir, las perturbaciones existentes en la entrada del canal no afectaron la zona de estudio. Como fluido de trabajo se empleó agua destilada. Como partículas sólidas para la medición de las concentraciones se utilizaron microesferas uniformes con diámetro medio de  $98 \mu\text{m}$ . De acuerdo al fabricante los diámetros de éstas partículas oscilan entre 90 y  $106 \mu\text{m}$ . Su densidad fue de  $1.067 \text{ g/cm}^3$ . Para la medición de velocidades de la fase sólida se emplearon partículas plásticas teñidas con rodamina con un diámetro entre  $63 \mu\text{m}$  y  $105 \mu\text{m}$ . Para la medición de velocidades de la fase líquida se utilizaron partículas trazadoras. De acuerdo con el fabricante, los trazadores son microesferas uniformes fluorescentes de origen polimérico con diámetro medio de  $15 \mu\text{m}$ . El diámetro de estas microesferas uniformes está comprendido entre los valores de 13 y  $16 \mu\text{m}$ .

La tabla 2.1 reúne importantes parámetros experimentales que se controlaron durante los experimentos.

**Tabla 2.1. Parámetros experimentales**

PARÁMETRO	VALOR
Forma de fondo	Duna
Altura forma de fondo $h_f$ (mm) Longitud forma de fondo L (mm)	2 34
Profundidad, H (cm) a)Medición de concentraciones b)Medición simultánea de velocidades	1.5 1.6
Velocidad media, $U_m$ , (mm/s) a)Concentraciones b)Medición simultánea de velocidades:  Fase Líquida Fase Sólida	160  134 135
Razón de la altura de la forma de fondo respecto a su longitud (mm/mm) (Vanoni y Hwang - 1967, Freedsoe - 1982)  $h_f / L$	0.059
Razón de la altura de la forma de fondo con respecto a la altura de la lámina de agua $h_f/H$ (mm/mm)  a)Medición de concentraciones b) Medición simultánea de velocidades	0.13 0.12
Número de Froude $F=U_m(gh)^{1/2}$  a)Medición de concentraciones b)Medición simultánea de velocidades	0.42 0.36
Número de Reynolds $R=U_mH/\nu$  b)Medición de concentraciones c)Medición simultánea de velocidades	2400 2160

a)



b)

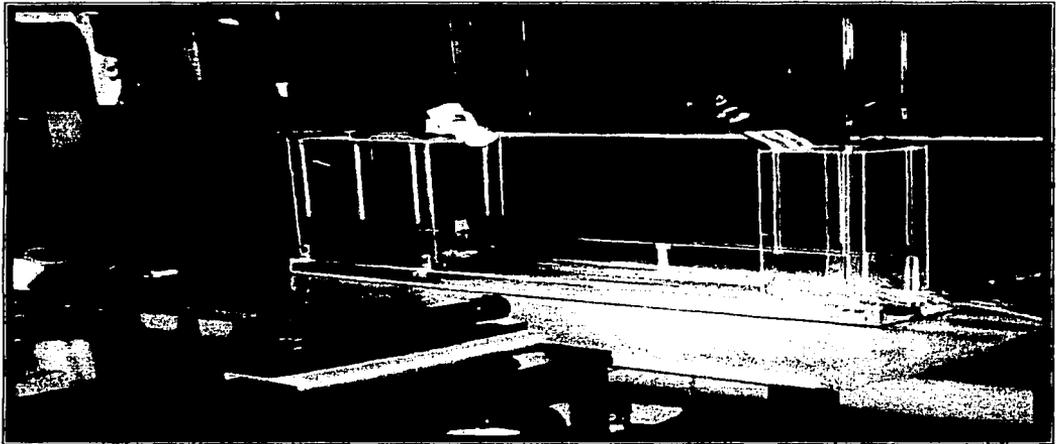


Figura 2.1 a) Esquema del dispositivo experimental  
b) Foto del dispositivo experimental

## 2.2 OPERACIÓN DEL CANAL

El procedimiento de operación en cada experimento fue el siguiente:

- Verificación del estado del canal.
- Verificación del estado de la bomba.
- Limpieza del canal, mangueras, accesorios y bomba.
- Pruebas para verificar el funcionamiento del sistema de recirculación del agua.
- Eliminación de turbulencia, inestabilidad del flujo, fugas.
- Colocación de agua destilada en el canal midiendo el volumen previamente.
- Control del gasto mediante un autotransformador conectado a la bomba.
- Eliminación de aire atrapado en el sistema manipulando las mangueras y cambiando la altura a la que se encontraba ubicada la bomba.
- Pesado del sedimento en balanza electrónica de alta precisión y adición del mismo al agua del canal.
- Control del tirante.
- Toma de fotos y procesamiento de información mediante el programa FlowManager 3.5 del PIV.
- Apagado de las luces del laboratorio que puedan generar ruido óptico al momento de hacer tomas de imágenes con el equipo ó el uso de filtros ópticos que permitan únicamente el paso de la luz dispersada por las partículas.

### **2.3 ARREGLOS EXPERIMENTALES PARA LA MEDICIÓN DE VELOCIDADES DE LA FASE SÓLIDA Y LÍQUIDA SIMULTÁNEAMENTE**

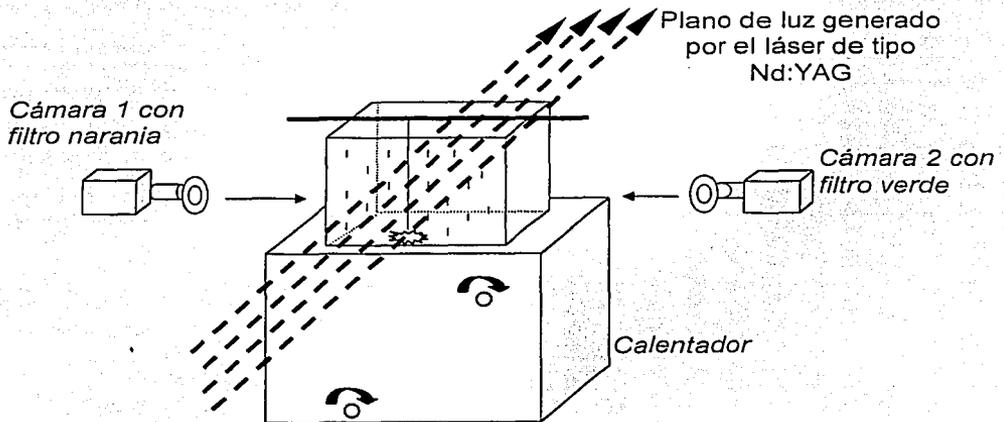
En el equipo PIV se incluyeron dos cámaras (ver figura 2.5), cada una dotada con un filtro. Una de ellas permitió el paso de la longitud de onda de luz bajo la cual se excitaron las partículas trazadoras del flujo que representaban a la fase líquida ( $13\mu\text{m} < \phi < 16\mu\text{m}$ ). La otra cámara registró las partículas que representaban a la fase sólida la cual estuvo constituida por partículas de mayor tamaño ( $63\mu\text{m} < \phi < 105\mu\text{m}$ ). Una limitante de la técnica es que las partículas sólidas tengan un diámetro característico.

#### **2.3.1 ARREGLO EXPERIMENTAL CON UNA CAJA DE VIDRIO PARA AFINAR LA TÉCNICA DE MEDICIÓN SIMULTÁNEA DE VELOCIDADES**

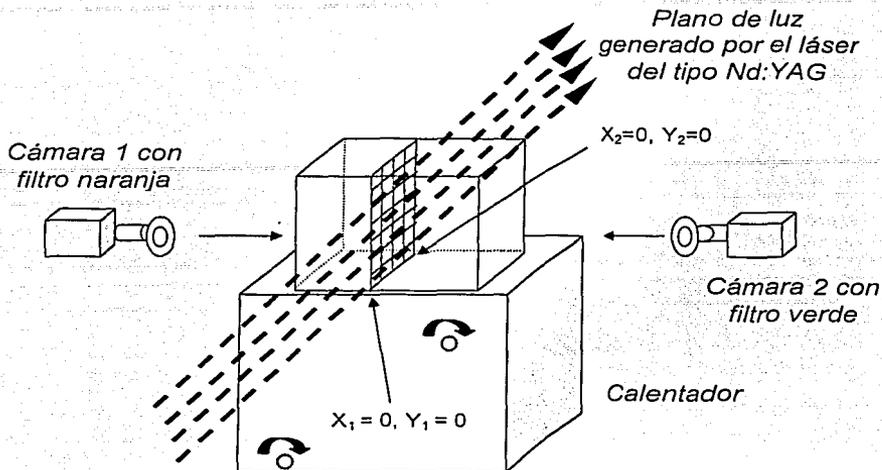
Se realizaron pruebas preliminares en una caja de vidrio que permitieron verificar el buen funcionamiento de los filtros con el objetivo de apreciar las diferentes partículas fluorescentes correspondientes a cada fase. Dicha caja fue de 10 cm de longitud en cada una de sus aristas y las imágenes se tomaron a una distancia por encima del fondo de 2.5 cm. No es objetivo de la presente investigación el estudio del flujo dentro de la caja de vidrio, el cual es muy complejo, pero constituye una forma de probar la técnica a desarrollar.

Con el fin de verificar que en las dos cámaras, colocadas frente a caras opuestas de la caja de vidrio, se tuviera la misma referencia y el mismo enfoque desde un punto al centro de la caja, se colocó una plomada al centro del recipiente de vidrio (ver figura 2.2). Esta prueba no resultó ser tan eficiente ya que no pudo definirse con precisión un punto desde ambas cámaras; por eso se decidió introducir una cuadrícula dentro de la caja de vidrio y verificar que la localización de un punto a partir de una esquina (con coordenadas  $X_1=0$  y  $Y_1=0$ ) tomada como referencia fuera la misma desde la esquina contraria (con coordenadas  $X_2=0$  y  $Y_2=0$ ). A la cuadrícula se le hicieron divisiones de 0.5 cm x 0.5 cm como también una numeración vertical y otra horizontal que sirvió de referencia al introducirla en

el centro del recipiente y observar por los lentes de las cámaras (ver figura 2.3). Con esta prueba de la cuadrícula se logró definir la transformación requerida para tener una referencia común en las imágenes de las dos cámaras. Se logró la correcta localización de un punto con ambas cámaras.

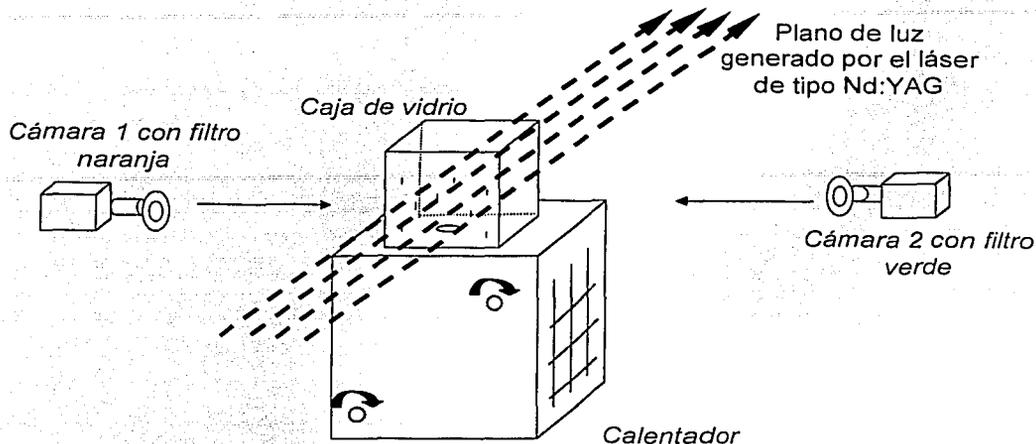


**FIGURA 2.2 Prueba de enfoque de puntos iguales sobre la cuerda de una plomada.**



**FIGURA 2.3 Prueba de enfoque de puntos iguales sobre una cuadrícula ubicada en el centro de la caja de vidrio.**

Luego se colocó un volumen de 500 ml de agua destilada en la caja de vidrio. Este dispositivo instrumental se ubicó sobre un agitador y en su interior se mantuvo un magneto. Al agua se le adicionaron 4 ml de partículas fluorescentes usadas como trazadores y partículas teñidas con rodamina, de color rosado fluorescente, para representar los sedimentos sólidos. El esquema mostrado en la figura 2.4 ilustra lo anterior.

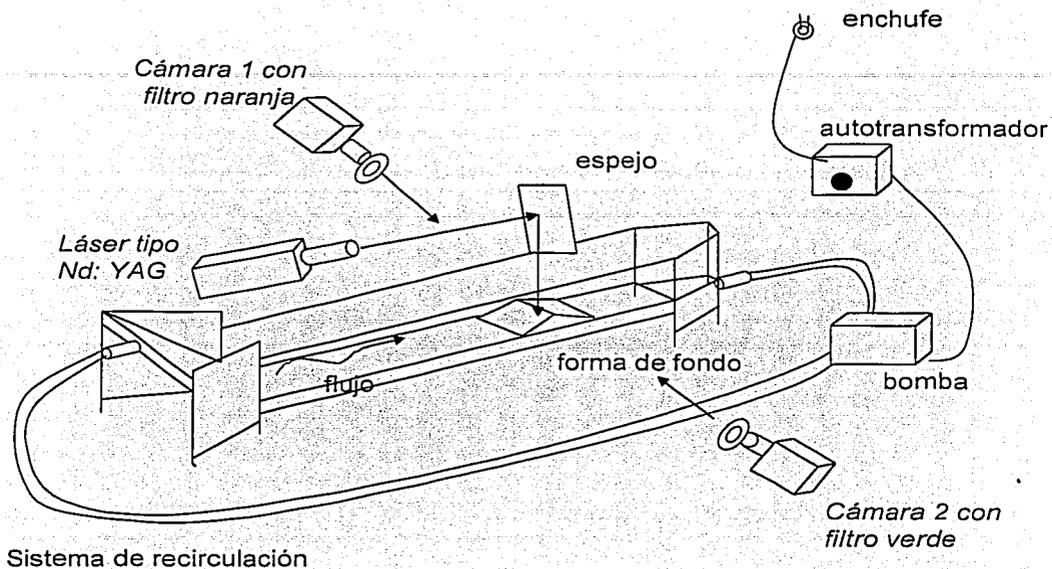


**FIGURA 2.4** Dispositivo instrumental para pruebas preliminares en la caja de vidrio.

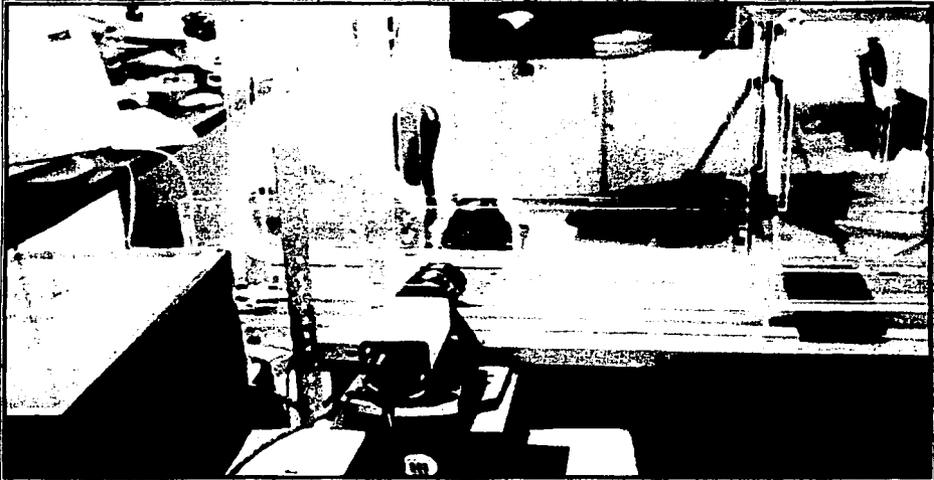
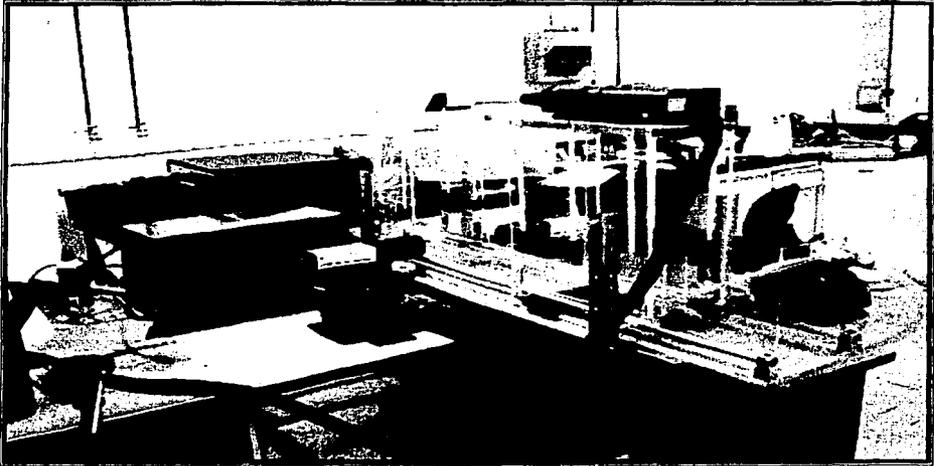
El movimiento del agitador magnético originó corrientes al interior de la masa de fluido.

La cámara con el filtro verde registró únicamente los trazadores mientras que la cámara con el filtro naranja registró los sedimentos. Dadas estas condiciones, se procedió a la toma de imágenes y su procesamiento con el PIV.

Una vez que se adquirió experiencia con la técnica de medición con dos cámaras, se instaló el equipo en el canal quedando la distribución como se muestra en la figura 2.5. En la figura 2.6 se presentan dos fotos del montaje instrumental.



**FIGURA 2.5** Dispositivo instrumental para mediciones simultáneas de velocidades en el canal de acrílico.



**FIGURA 2.6. Dispositivo instrumental para medición simultánea de velocidades. Observe la alineación de las cámaras.**

# Capítulo 3

## METODOLOGÍA Y FUNCIONAMIENTO DEL PIV

### 3.1 EQUIPO

El equipo empleado en la adquisición de datos fue el sistema de Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV) de Dantec (ver figura 3.1). Esta técnica está diseñada para medir velocidades del flujo en un fluido unifásico; sin embargo, aquí se presentan algunas adaptaciones para la medición de velocidades en flujo bifásico y de las concentraciones de partículas de la parte sólida.

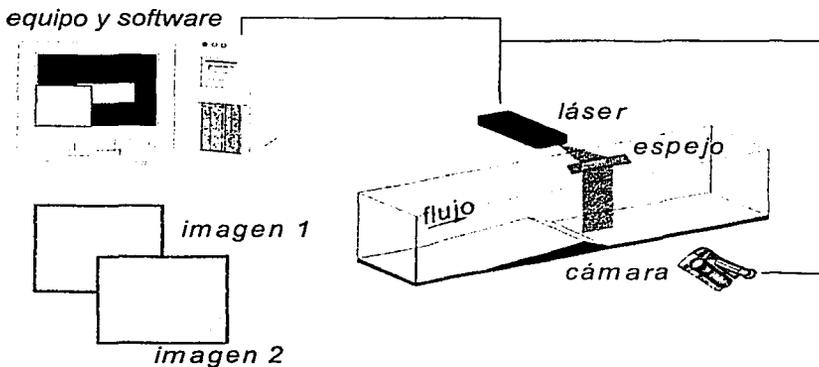


Figura 3.1 Equipo de adquisición de datos PIV

21

TESIS CON  
PÁGINA DE ORIGEN

### 3.2 MEDICIÓN DE CONCENTRACIONES

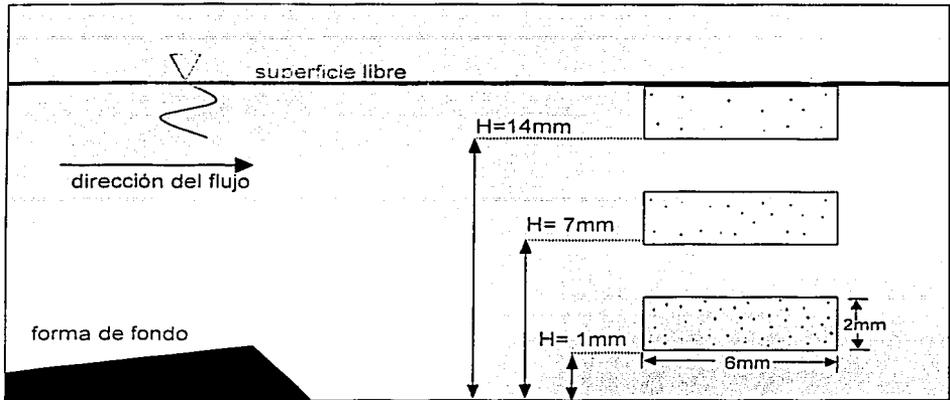
En el análisis de la concentración de sedimentos se añadieron al flujo partículas de mayor diámetro ( $\phi=98\mu\text{m}$ ) que los trazadores usados para la medición de velocidades del fluido ( $\phi=15\mu\text{m}$ ). Para la utilización de esta metodología empleando el PIV se deben tener entre 2 y 3 gramos de partículas en 3 litros de agua como concentración para la fase sólida. Lo anterior constituye una limitante para el dispositivo experimental empleado en esta investigación.

Después de realizar muchas pruebas se determinó que la concentración de sedimentos apropiada para el buen funcionamiento del sistema estaba entre 2 y 3 gramos en 3 litros de agua. Dentro de este rango se hicieron pruebas con 0.67 g/l, 0.83 g/l y 1 g/l. Concentraciones mayores saturaban las imágenes lo que hubiera dificultado la determinación de las concentraciones reales en el flujo. Para la medición de éstas, se utilizaron las fotos del PIV, donde se observaron tanto los trazadores como las partículas de fase sólida. Es posible eliminar de la imagen fotográfica las partículas pequeñas, las cuales emiten con menor intensidad que las partículas grandes de acuerdo con la teoría de Lorenz-Mie, manipulando el brillo y el contraste, opción que aparece en el menú principal del programa FlowManager 3.5. La variación del contraste y del brillo en la imagen permite obtener una mejor definición de la luz emitida por las partículas cuando atraviesan el plano de luz generado por el láser. Para cada concentración teórica de partículas se tomaron tres secuencias de imágenes de 20 pares de fotografías cada una con espacio de tiempo entre secuencias de media hora. Posteriormente se seleccionaron tres áreas a diferentes elevaciones en la imagen fotográfica (1 mm, 7 mm y 14 mm) cada una de 6mm de ancho y 2 mm de alto, donde se contabilizó el número de partículas (Ver figura 3.2 y 3.3). El procedimiento anterior se aplicó a cada imagen y su pareja, para cada secuencia de fotos, obteniéndose al final el valor promedio de concentración local. Las zonas en donde se llevó a cabo el conteo visual de sedimentos, correspondió a las áreas dejadas al descubierto al momento de elaborar la máscara, la cual consiste en cubrir de

negro las zonas que no interesan estudiar; es una opción que ofrece el programa. Conocida el área de la zona de estudio, su espesor (asumido como el espesor de la luz del láser), el número de partículas presentes en el área seleccionada, el volumen y la densidad de las mismas, es posible el cálculo de la concentración local (el valor se asignó al centro del área). Este cálculo se repitió para 20 pares de fotografías de donde se obtuvo una concentración promedio local y su desviación estándar.



Figura 3.2 Máscara empleada para efectuar el conteo visual en tres alturas distintas de la lámina de agua: 1 mm, 7 mm y 14 mm desde el fondo a la base de cada ventana.



**Figura 3.3** Esquema ilustrativo que muestra las zonas de medición de concentraciones.

Conociendo el espesor del plano de luz y las dimensiones del área seleccionada se determinó el volumen de medición. El valor medio del espesor del plano de luz fue de 1.8 mm. Con estos datos quedó determinada la concentración de partículas por unidad de volumen a una determinada altura de la lámina de agua. El procedimiento se repitió para otras alturas con el fin de encontrar perfiles verticales de concentración. Las concentraciones para cada altura se calcularon de 20 fotos consecutivas y se obtuvo un valor promedio.

### **3.3 MEDICIÓN DE VELOCIDADES (FASES LÍQUIDA Y SÓLIDA)**

En esta técnica al fluido con el que se trabaja se le adicionan micro partículas esféricas empleadas como trazadores que no inducen alteraciones significativas en el flujo. Luego, la zona que se desea investigar se ilumina con un plano de luz generado mediante un láser pulsado. El tiempo entre pulsos se selecciona en función de la velocidad media del flujo y debe estar sincronizado con la toma de las imágenes. Con una cámara de alta resolución, ubicada en ángulo recto al plano iluminado, se toma un par de fotos de los trazadores, una en un tiempo  $t$  y la segunda en un tiempo  $t+dt$ . Las imágenes digitales se procesan

como se indica más adelante. El área de medición se subdivide en regiones rectangulares más pequeñas llamadas áreas de interrogación. Para cada una de esas áreas de interrogación las imágenes adquiridas durante la primera y segunda pulsación del láser se correlacionan para producir un vector de desplazamiento promedio de las partículas. Llevando a cabo este procedimiento para todas las regiones de interrogación, el programa obtiene un mapa de vectores de desplazamiento que luego se convierte en un campo de velocidad más probable.

$$\text{VELOCIDAD} = \frac{\text{DESPLAZAMIENTO}}{\text{TIEMPO}} \quad (1)$$

Por medio de los procesos de validación y filtrado se reducen errores, y mediante el análisis estadístico se obtienen velocidades medias con su respectiva desviación estándar.

La empresa fabricante del equipo PIV recomienda la siguiente ecuación para calcular un tiempo de referencia entre imágenes:

$$t \leq \frac{8 \cdot S \cdot d_{\text{pixel}}}{U_m} \quad (2)$$

donde  $S$  es el factor de escala (adimensional) resultado de la calibración del PIV,  $d_{\text{pixel}}$  es la medida de un lado de un pixel de la cámara ES 1.0 empleada y que es  $9 \mu\text{m}$  y  $U_m$  es la velocidad media del flujo, determinada mediante la realización de experimentos previos con PIV similares a los aquí presentados. Al momento de reemplazar los valores en esta ecuación debe haber congruencia en las unidades.

La cámara empleada fue una *KODAK MEGAPLUS – MODELO ES 1.0*. Esta cámara no tiene controles manuales. Su operación se lleva a cabo mediante un enlace con la computadora y está sincronizada con las pulsaciones del láser para efectuar la toma de imágenes. Su resolución espacial está definida por cierto número de elementos sensibles a la luz llamados pixeles que en este caso son 1,008 (horizontalmente) x 1,016 (verticalmente). Dichos elementos convierten la luz (fotones) en carga eléctrica (electrones). La cámara tiene capacidad para tomar 30 imágenes por segundo, siendo posible el control del tiempo entre pares de imágenes. El mínimo tiempo entre pares es del orden de 1  $\mu$ s. Para su uso en la Velocimetría por Imágenes de Partículas, este modelo de cámara presenta un área activa de 1008 (horizontalmente) x 1016 (verticalmente) pixeles. Los pixeles son áreas cuadradas de 9  $\mu$ m de lado.

El sistema de iluminación empleado para hacer visibles las partículas trazadoras consistió en un láser pulsante de doble cavidad del tipo Nd:YAG. Se trata de un láser de estado sólido que está constituido por una barra de aluminio – yttrium (*yttrium aluminum garnet, YAG*) en la cual hay presencia de neodymium (*Nd*).

Cada cavidad puede ser controlada desde un tablero y un dispositivo electrónico regula el intervalo de tiempo entre las emisiones de luz de cada láser. El haz de luz generado en cada cavidad es dirigido mediante espejos a un punto común de salida donde gracias a un prisma se forma un plano de luz cuyo espesor mínimo puede variarse entre 0.6 y 2.6 mm gracias a un telescopio Galileano ajustable, el cual provee una distancia focal también ajustable simultáneamente con la expansión del láser. La instalación del láser en el dispositivo experimental resulta muy sencilla dado que la fuente de luz puede moverse fácilmente. En cada pulsación del láser, la cámara de alta resolución toma una imagen. Esta condición es dominada por la unidad de sincronización que da la orden a las cavidades del láser de encender sus lámparas como también permitir a otros controles abrir el obturador de la cámara.

Para los láseres del tipo Nd:YAG se requiere una combinación de diferentes lentes con el fin de generar delgados planos de luz de alta densidad. Al final, un lente adicional se utiliza para enfocar la luz con un espesor apropiado.

La mayoría de los láseres empleados con el PIV, son generalmente clasificados como muy peligrosos y tal es el caso de los láser tipo Nd:YAG, en los cuales la potencia de un rayo láser Nd:YAG simple es de 25 MW. Un 2 % de su reflexión en la superficie de un lente tiene un nivel de potencia de 500 kW a pesar de que la duración de la pulsación es de solo 8 ns. El ojo humano no tiene un mecanismo natural de autoprotección y por eso resulta conveniente tomar precauciones cuando se utilicen estos dispositivos. El empleo de lentes protectores debe ser obligatorio al momento de realizar experimentos. En términos generales los láser de doble cavidad Nd:YAG son una excelente alternativa, lo cual se refleja en la posibilidad de emplearlos tanto en modo continuo como también de forma pulsante. Lo anterior implica gran versatilidad frente a otros láser como el de rubí que sólo pueden operarse en forma pulsante. La alta razón de repetición de las pulsaciones del láser tipo Nd:YAG también lo hacen una buena opción.

### **3.4 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES POR MEDIO DEL PIV**

El procesamiento de las imágenes se lleva a cabo mediante el programa *FlowManager 3.5*. Inicialmente se debe crear la estructura de la base de datos (ver figura 3.4). Se parte de la creación de una base de datos (1), de donde se desprenden los niveles que constituyen la estructura del árbol. La rama principal en el primer nivel recibe el nombre de fólder del proyecto (2) y sirve para almacenar cantidades considerables de datos. Luego se crean otras ramas (3), cada una de las cuales contendrá un proceso de toma y análisis de imágenes.

Por medio de la cámara de alta resolución se toman secuencias de imágenes, las cuales son transferidas al procesador del PIV. Allí, a esas

imágenes, se les da un nuevo formato que recibe el nombre de mapa de imagen. A estos mapas de imágenes se les aplica una rutina que permite la obtención del campo de velocidades y la concentración de partículas de la fase sólida.

Las ecuaciones empleadas en cada rutina pueden consultarse con detalle en el manual del usuario que edita la empresa fabricante del equipo PIV (*FlowMap Particle Image Velocimetry Instrumentation – Installation & User's guide*).

### 3.5 CÁLCULO DE VELOCIDADES

En el presente proyecto dicha rutina se llevó a cabo de la forma como se explica en los siguientes incisos.

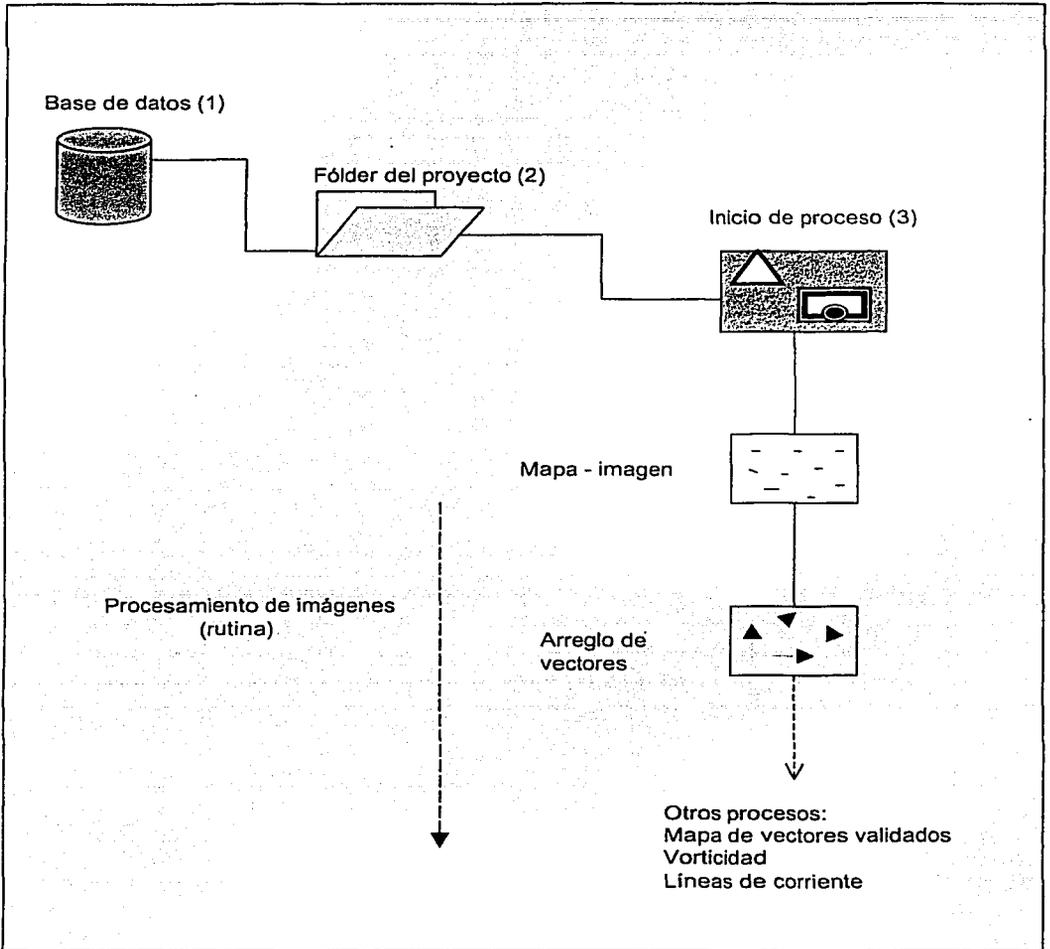


Figura 3.4 Estructura de la base de datos.

### **3.5.1 ENFOQUE**

Luego de crear la base de datos y el fólder del proyecto se procede al enfoque de la cámara. Este enfoque debe hacerse de tal forma que la imagen de una partícula ocupe dentro de lo posible al menos tres pixeles. Se considera además que el enfoque más fino no siempre es el más adecuado. Cerrando o abriendo el obturador se controla el paso de luz emitida por las partículas, por lo tanto es posible tener imágenes en donde sólo se aprecien partículas con alta emisión de luz que corresponden a las partículas trazadoras y a las partículas sólidas. Ver figura 3.5.

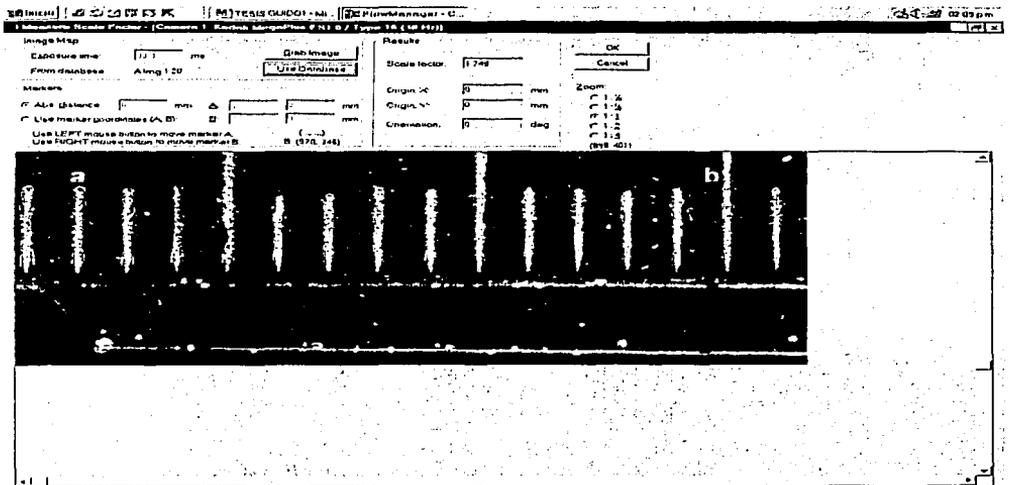


**Figura 3.5 Imagen tomada al momento de enfocar en uno de los experimentos de la presente investigación.**

### **3.5.2 CALIBRACIÓN DEL EQUIPO**

Una vez enfocada la cámara, se procede a calibrar para obtener un factor de escala. Esto se hizo sumergiendo una regla en el fondo del canal y tomando varias imágenes consecutivas hasta conseguir una en donde se apreciara con claridad las graduaciones de la regla. Una vez obtenida dicha imagen, se colocan

marcas sobre dos graduaciones de la regla, una a la izquierda y otra a la derecha, teniendo en cuenta que sea una distancia horizontal (en la presente investigación se verificó que las elevaciones de los puntos seleccionados fueran la misma). Se determina entonces la distancia en milímetros entre las dos marcas y se le introduce el dato al programa. De esta forma el programa podrá calcular la distancia recorrida por las partículas a partir de la distancia medida en las imágenes. Ver figura 3.6.



**Figura 3.6** Proceso de calibración del equipo PIV. Se observa la definición de una longitud determinada entre dos graduaciones de la regla sumergida.

El factor de escala establece la relación entre las coordenadas reales definidas por el usuario y las coordenadas locales de la cámara; dicho de otra manera, determina la relación entre las dimensiones en espacio del objeto y en el espacio de la imagen. En la presente investigación se obtuvo un valor de 1.867 como factor de escala.

### 3.5.3 MÁSCARA (MASKING)

Consiste en cubrir las zonas de las imágenes que no son de interés o que pueden inducir error en la obtención del campo de velocidad. En la presente investigación, el programa empleado asigna una velocidad de cero en las zonas enmascaradas. Ver figura 3.7.

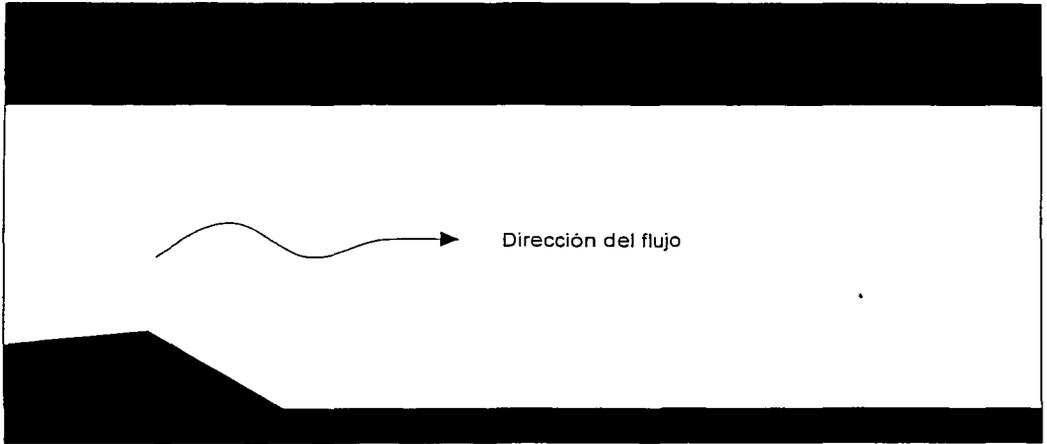


Figura 3.7 Las zonas en negro conforman la máscara empleada en la presente investigación. Cubre la zona superior a la superficie libre del flujo, el fondo del canal y la forma de fondo. Solo queda visible el flujo.

### 3.5.4 CORRELACIÓN CRUZADA

Una vez enmascaradas las imágenes, se da inicio al cálculo de los campos vectoriales bidimensionales de velocidad. La técnica empleada por el programa FlowManager 3.5 para el análisis de dos imágenes es la correlación cruzada (*Cross - Correlation*) cuya fórmula es la siguiente :

$$R_{II}(x, y) = \sum_{i=-K}^K \sum_{j=-L}^L I(i, j) \cdot I'(i+x, j+y) \quad (3)$$

en donde  $I(i, j)$  e  $I'(i+x, j+y)$  son las intensidades de luz registradas en cada área de interrogación en un tiempo  $t$  y otro  $t+\Delta t$  respectivamente para cada valor del corrimiento  $(x, y)$ .

El cálculo de la correlación cruzada aplicando la ecuación (3) resulta muy tedioso y extenso, necesiándose de un tiempo considerable en la obtención de los resultados, tal como lo comenta Raffel *et al.* (1988) en el inciso 5.4 de su libro *Particle Image Velocimetry*. La función de correlación cruzada puede calcularse también considerando el teorema de correlación, el cual establece que la correlación cruzada de dos funciones es equivalente a la multiplicación del conjugado complejo de sus transformadas de Fourier:

$$R_{II} \longrightarrow \hat{I} \cdot \hat{I}'^* \quad (4)$$

en donde  $\hat{I}$  e  $\hat{I}'$  son las transformadas de Fourier de las funciones  $I$  e  $I'$  respectivamente. El programa FlowManager 3.5 utiliza la transformada rápida de Fourier con el fin de llevar a cabo la correlación. El proceso se reduce a calcular dos transformadas de Fourier bidimensionales y realizar la multiplicación del complejo conjugado de cada par de coeficientes de Fourier correspondientes. Al

resultado del conjugado de coeficientes de Fourier se le aplica la transformada inversa para obtener así la correlación cruzada. Teniendo en cuenta que se tienen datos discretos, usando la transformada rápida de Fourier se reduce considerablemente el tiempo de cómputo de las operaciones (Jaehne, 1997). Un resumen del procedimiento se muestra en la figura 3.8.

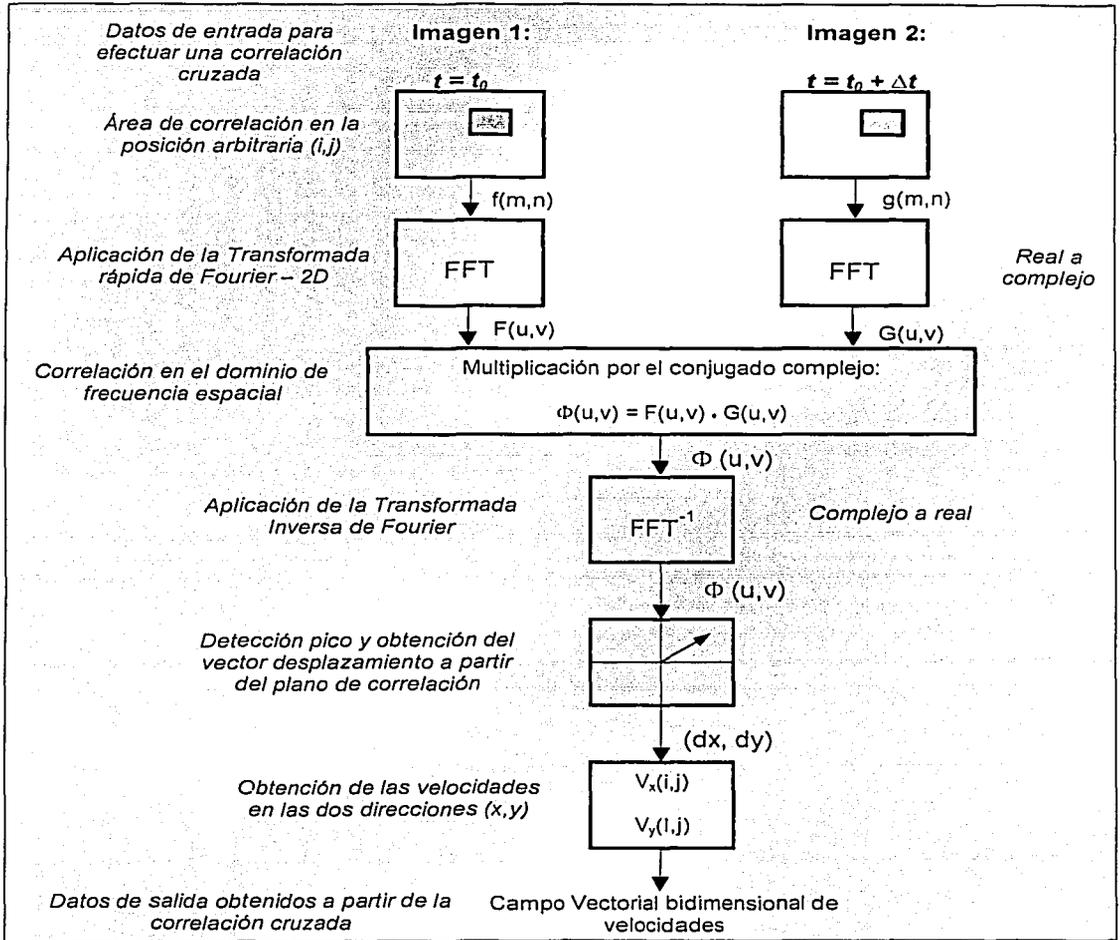
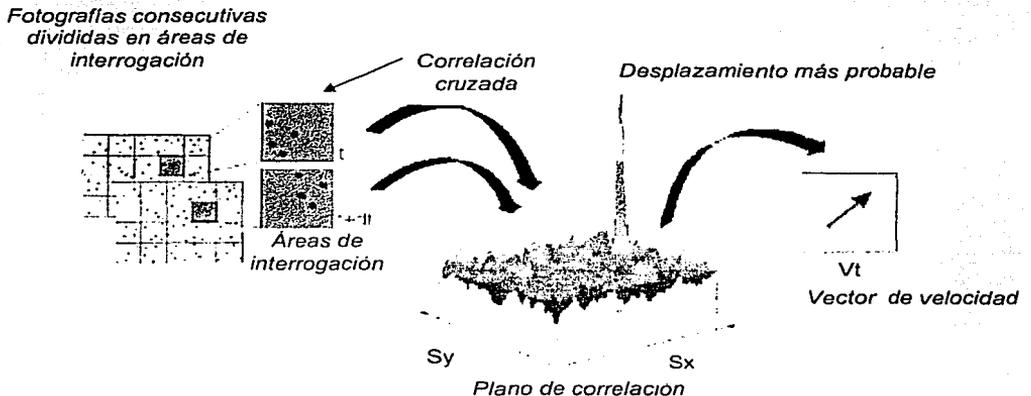


Figura 3.8 Esquema ilustrativo del proceso de correlación cruzada.

La implementación de la correlación cruzada utilizando las transformadas rápidas de Fourier implica pasar de un dominio o plano real a un plano complejo y al final traer nuevamente la información al plano real, esto último por medio de una transformada inversa.

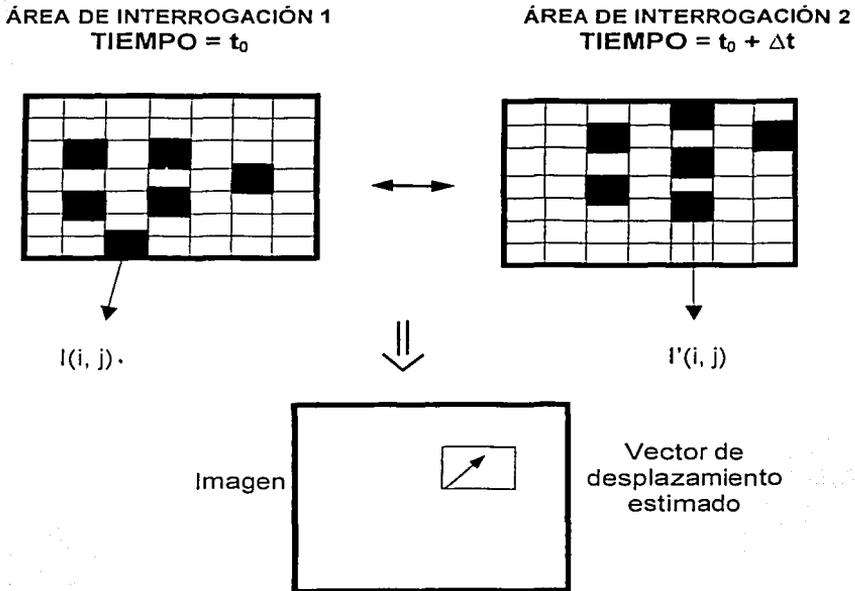
En la figura 3.10 se aprecia la aplicación de la correlación cruzada a dos imágenes, a partir de lo cual se obtiene información sobre la dirección del movimiento de las partículas en cada área de interrogación y al final del proceso el vector de velocidad. Además muestra la existencia de muchos picos en el plano de correlación, de los cuales uno supera en magnitud a los demás. El pico de mayor altura y el segundo más alto sirven para que el programa efectúe la validación por alturas de picos que se explica en el inciso 3.6.



**Figura 3.10** Esquema de aplicación de la correlación cruzada.

Es de resaltar que el programa define un sistema coordenado X - Y en pixeles (convertible a milímetros) por medio del plano de luz generado por el láser y la orientación de la cámara. La primera etapa de la técnica divide cada imagen

en pequeñas áreas a las que se les conoce como áreas de interrogación (ver figura 3.10). Al interior de cada una de ellas se tendrán partículas cuyo número se recomienda no sea menor de cinco. El paso siguiente consiste en obtener un campo vectorial de desplazamientos lineales, donde cada vector es el resultado de la correlación que efectúa el programa en un área de interrogación entre dos imágenes consecutivas.



**Figura 3.10** Esquema que muestra un par de imágenes divididas en áreas de interrogación.

Una de las implicaciones de la técnica es que se calcula un desplazamiento promedio de grupos de partículas. El tamaño de las áreas de interrogación deberían seleccionarse lo suficientemente pequeñas de tal forma que se minimicen los gradientes de desplazamiento.

Las principales características que presenta el método de correlación cruzada son las siguientes:

- La correlación cruzada se realiza sobre áreas correspondientes sin ningún desplazamiento de la segunda imagen.
- El proceso de correlación cruzada se lleva a cabo sólo una vez durante la comparación de las áreas de interrogación.

Tales características se convierten, en casos de fuertes gradientes de velocidad o bajo número de partículas, en verdaderas limitantes que obligan al uso de técnicas de correlación más eficientes tal como se explicará en el siguiente inciso.

### **3.5.5 VELOCIDADES DE LA FASE SÓLIDA**

Ya que en este trabajo se pretende estudiar el flujo de un fluido bifásico, formado por agua (fase líquida) y partículas (fase sólida), se tiene que adaptar la técnica de PIV para medir las velocidades en cada fase. Como se dijo en la sección anterior, para medir las velocidades en el fluido se tienen que añadir pequeñas partículas usadas como trazadores. En el presente caso se añadieron además partículas que conforman la parte sólida; obviamente estas últimas fueron de mayor tamaño y en este caso su concentración fue menor.

El contar con un número reducido de partículas por unidad de área complica el cálculo de las velocidades. Como se mencionó, el área de cálculo se tiene que subdividir en áreas en las que se tenga al menos cinco partículas y así poder aplicar la técnica de correlación cruzada. Esto implica la necesidad de usar áreas de medición muy grandes con una pérdida de resolución espacial. En la literatura se encontró una técnica propuesta por Scarano y Riethmuller (1999) y que es la correlación de adaptación. En la presente investigación se probó para el caso de pocas partículas, obteniéndose buenos resultados.

### **3.5.6 CORRELACIÓN DE ADAPTACIÓN**

El análisis para obtener el campo de velocidades de la fase sólida merece especial atención debido a la baja concentración de partículas en suspensión dentro de la masa de fluido. Con miras a enfrentar esta situación, surge como primera idea seleccionar áreas grandes para efectuar la correlación, teniendo en cuenta que el programa FlowManager 3.5 da la opción de escoger áreas de hasta 256 x 256 pixeles. Procediendo de esta manera, la malla integrada por todas las áreas de interrogación sería muy gruesa, muy burda, y si bien es cierto que se podrían capturar al menos las partículas necesarias para cumplir el mínimo requisito de 5 por área de interrogación, la resolución espacial no sería buena. En forma contraria si se usara una malla más fina se podría dar el caso en el que los desplazamientos menos probables serían casi iguales a los desplazamientos probables, con la consecuencia de obtener un campo vectorial bidimensional con muchos vectores no validados. Es de resaltar que entre mayor sea el número de partículas que permanezcan en una imagen y su correspondiente, el pico de correlación estará mejor definido. La figura 3.12 resume esquemáticamente los pasos que sigue la correlación de adaptación.

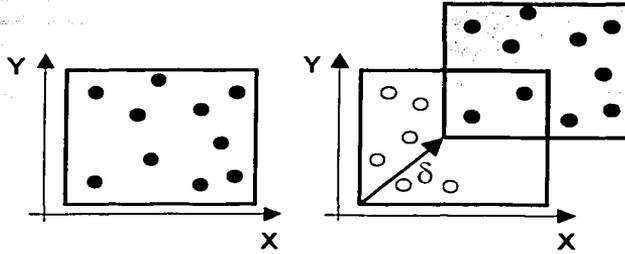
Prestando atención a esta situación, se optó por aplicarle a las imágenes adquiridas una correlación de adaptación por medio de la cual es posible hacer una refinación de la malla que inicialmente se seleccione con la ventaja de poder tener, al final del proceso, un mayor número de vectores, sin perder la precisión en los valores de los vectores de desplazamientos.

La correlación de adaptación fue concebida con el propósito de que el número de partículas en la primera imagen con respecto a la segunda, permanezcan en el área de interrogación que se está comparando. Aquí se presenta la aplicación de esta técnica para la medición en zonas donde el número de partículas es bajo. Lo anterior se consigue mediante el desplazamiento del área de medición de la segunda imagen, de tal forma que se recuperen la mayor

cantidad posible de partículas que de otra manera saldrían de ésta debido a su movimiento en el plano. Este desplazamiento de la segunda imagen se hace teniendo en cuenta el desplazamiento calculado con áreas de interrogación más grandes. De esta forma, se obtiene una resolución más fina espacialmente, en comparación con la técnica tradicional de correlación cruzada.

La correlación de adaptación se lleva a cabo por etapas, asumiendo inicialmente cero desplazamiento. Al programa se le suministra el área de interrogación con el que debe empezar y terminar. También se define el porcentaje de superposición de las áreas de interrogación y el tipo de validación que se aplicará, la cual puede ser la validación de picos, la validación de promedios movidos o ambas (ver inciso 3.6 para explicación de las validaciones). Se procede al cálculo del campo de velocidades utilizando una malla gruesa (grandes áreas de interrogación iniciales) que asegure obtener vectores con una buena validación. El máximo desplazamiento previsto debe ser tal que se cumpla la regla de un cuarto de la medida del área de interrogación y de esta forma garantizar la captura de partículas. Con este resultado se estiman los vectores de desplazamiento que son utilizados en una malla refinada para dar un corrimiento a las áreas de interrogación de la segunda fotografía y así maximizar el número de pares. El programa calcula los nuevos vectores de velocidad teniendo en cuenta que la segunda imagen se ha desplazado. Esto puede ser el resultado final o la información para un nuevo refinamiento. El campo vectorial bidimensional obtenido en cada paso se valida de acuerdo a la opción seleccionada. A continuación se hace una explicación más detallada de la técnica.

En un área lo suficientemente grande se estima mediante la correlación cruzada un vector de desplazamiento  $\delta=(\delta x, \delta y)$ , el cual tiene lugar en el intervalo de tiempo  $\Delta t$  entre la toma de dos imágenes. Con este dato se puede seleccionar un corrimiento  $\delta_p$  para la nueva posición del área de interrogación de la segunda imagen. Esto se hace de tal manera que se maximice el número de partículas que no han salido del área de interrogación que se analiza (ver figura 3.11).



**Figura 3.11 Vector desplazamiento estimado y selección de una nueva área de interrogación**

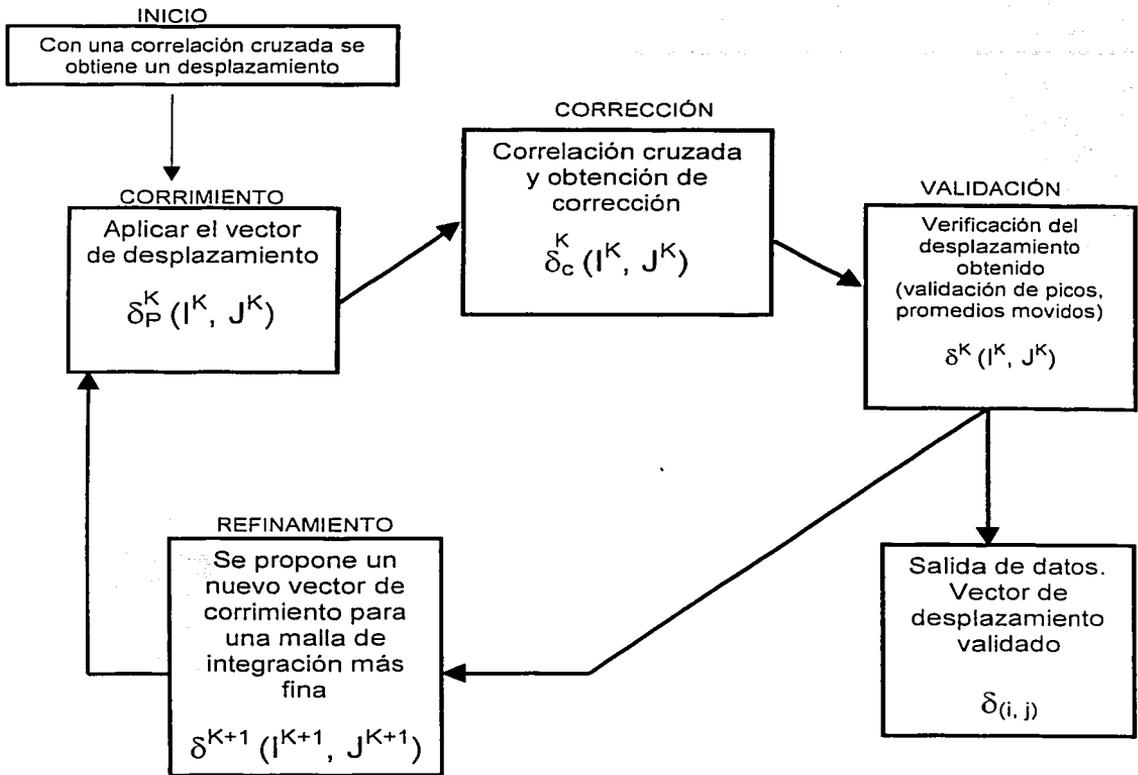
Con las partículas en la segunda imagen en su nueva posición se calcula la corrección en el desplazamiento  $\delta_c$  y junto con el valor del corrimiento se calcula nuevamente el desplazamiento.

$$\delta(x, y) = \delta_p(x, y) + \delta_c(x, y) \quad (5)$$

Conocido el desplazamiento se obtiene el campo bidimensional de velocidades, cuya validación mostrará si el resultado obtenido es o no exitoso. Si se logra un buen resultado, se puede refinar aún más la malla. En caso contrario, el proceso termina en el resultado anterior.

La forma iterativa de la ecuación (5) es:

$$\delta^k(x, y) = \delta_p^k(x, y) + \delta_c^k(x, y) \quad (6)$$



**Figura 3.12 Esquema del proceso de análisis que lleva a cabo la correlación de adaptación**

En forma ideal, se preferiría que el 100% de los vectores de velocidad calculados sean válidos, pero en la práctica el resultado es menor. Con el fin de asegurar que la mayor parte de los vectores calculados sean válidos se debe aplicar alguno de los criterios de validación mencionados anteriormente y que se explicarán en el siguiente inciso.

Las condiciones iniciales y finales que se fijen al momento de implementar la correlación de adaptación son muy importantes, con el fin de mantener una buena validación en las subsecuentes iteraciones.

### 3.6 VALIDACIÓN DE LOS VECTORES CALCULADOS

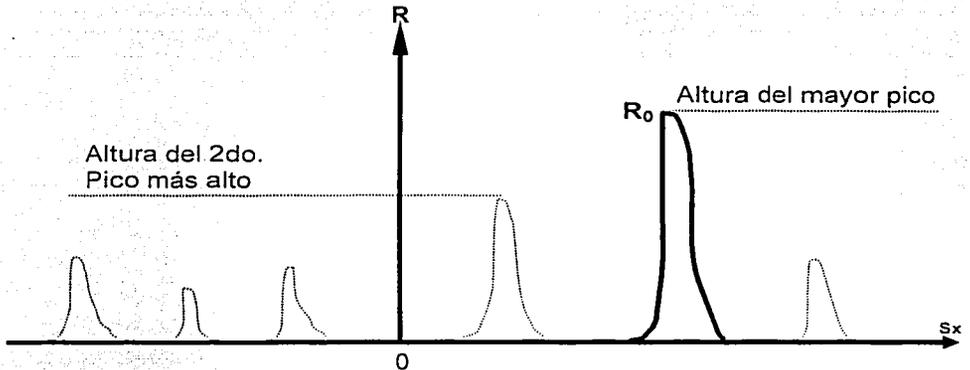
Como una forma de detectar los vectores que erróneamente fueron calculados con las técnicas de correlación implementadas en el programa FlowManager 3.5, se lleva a cabo el proceso de validación de los desplazamientos más probables o validación de picos. En la presente investigación, se empleó ésta validación para conocer el número de vectores erróneos calculados y no se aceptaron más de un 5 % de ellos. Si en un principio no se llega a tener un 95 % de vectores válidos, se recomienda reducir el tiempo entre imágenes en proporción de un 2.5 %. En lo posible debe cumplirse con tener al menos 5 partículas en cada área de interrogación. Al final del siguiente capítulo se muestran los resultados obtenidos, los cuales se encuentran dentro de los rangos que menciona la literatura, por ejemplo Westerweel (1994).

Con la aplicación del criterio de validación de picos, el procesador rechaza o hace válidos los vectores obtenidos. En la práctica, el procesador localiza en el plano de correlación el pico más alto, que se considera como el desplazamiento más probable, y el que le sigue en altura (segundo desplazamiento más probable).

Para que el vector sea aceptado, se debe cumplir:

$$\frac{\text{Desplazamiento más probable}}{\text{Segundo desplazamiento más probable}} \geq 1.2 \quad (7)$$

Este criterio se conoce como *criterio de detección*. Keane & Adrian (1992) recomiendan que el cociente entre el desplazamiento más probable y el segundo desplazamiento más probable debe ser mayor o igual a 1.2. El no cumplimiento de esta condición ocasiona que el vector de desplazamiento calculado sea rechazado. En la correlación cruzada el pico más alto representa el desplazamiento más probable. La figura 3.13 ilustra al respecto.



**Figura 3.13** Gráfico de correlación en una dimensión donde se aprecia el mayor pico y el segundo pico más alto.

La razón entre el primer y segundo desplazamiento más probable es un parámetro muy importante en las mediciones con PIV. Existe una gran dependencia de la razón mencionada con la pérdida de pares debido al movimiento de las partículas fuera del plano de iluminación. A continuación se mencionan otros parámetros que contribuyen a que no se lleve a cabo una buena correlación:

- Altos gradientes de velocidad.
- Movimiento turbulento.

Una vez que se ha efectuado la correlación cruzada, es posible conocer el número de vectores rechazados. Es necesario verificar si el tiempo entre imágenes estimado con la ecuación (2) fue el correcto aplicando un criterio de máximo desplazamiento de las partículas, comúnmente del 25%, donde el número de vectores rechazados no debe ser mayor del 5% del total de vectores calculados. Si es mayor, se debe repetir el experimento reduciendo el tiempo entre imágenes.

La validación por promedios movidos (*Moving Average Validation*) valida o rechaza vectores basándose en una comparación entre vectores vecinos. Los vectores rechazados pueden ser sustituidos por otros estimados de valores que rodeen a tales vectores rechazados. El método consiste en calcular el promedio de la magnitud de los vectores en una vecindad rectangular del vector que se va a validar y compararlo con el vector seleccionado. Considerando que el vector a validar tiene una posición  $(x, y)$ , y la vecindad tiene un tamaño  $(m, n)$ , el promedio se calcula con la fórmula:

$$\overline{V}(x, y) = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=x-(n-1)/2}^{x+(n-1)/2} \sum_{j=y-(m-1)/2}^{y+(m-1)/2} V(i, j) \quad (8)$$

El vector se rechaza si:

$$\|V(x, y) - \overline{V}(x, y)\| > k \quad (9)$$

donde  $k$  es un número que se calcula multiplicando el llamado factor de aceptación "a" por la máxima diferencia entre cada vector del área de la vecindad y el vector promedio:

$$k = a \cdot \max \| V_i(x, y) - \bar{V}(x, y) \| \quad (10)$$

Si el factor de aceptación se fija en 1, todos los vectores se validan, mientras que si se fija en 0, todos los vectores son rechazados. La empresa fabricante del equipo PIV recomienda un valor entre 0.1 y 0.01 para el factor de aceptación. Si el vector es rechazado, puede ser sustituido por otro vector que está dado por el promedio local  $\bar{V}(x, y)$ .

### 3.7 VELOCIDAD MEDIA Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR

Una vez obtenidos los datos de velocidad en un tiempo, es de interés en este estudio obtener valores para diferentes tiempos y mediante estadística conocer el valor medio de la velocidad y su desviación estándar. Estos datos serán de gran utilidad al comparar el comportamiento de la fase líquida y la fase sólida.

La velocidad media se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$U_m = \frac{\sum_{i=1}^N U_i}{N} \quad (11)$$

en donde  $u_m$  es la velocidad media,  $u_i$  es el valor instantáneo de la velocidad y N el número total de datos.

La desviación estándar  $\sigma_u$  de las velocidades se calculó con la siguiente ecuación:

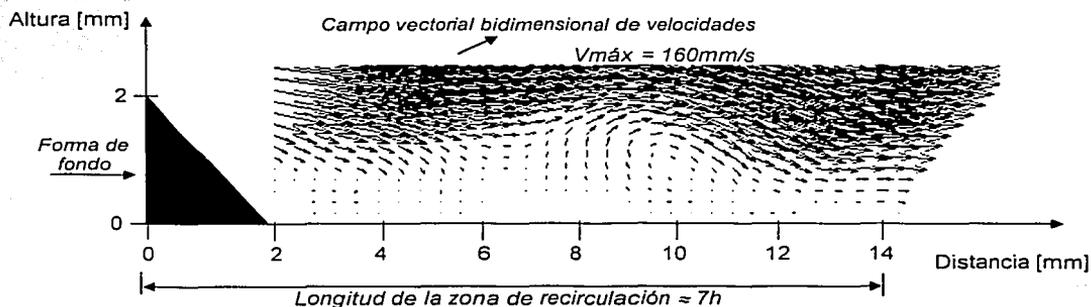
$$\sigma_u = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_i - u_m)^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

## Capítulo 4

# RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1 DESCRIPCIÓN DEL FLUJO AGUAS ABAJO DE LA FORMA DE FONDO

Con el fin de establecer el comportamiento del flujo aguas abajo de la forma de fondo se hicieron mediciones de velocidad del agua sin fase sólida. Se distinguieron dos zonas, una inferior con un vórtice de bajas velocidades que nunca supera la altura de la forma de fondo y una zona superior con altas velocidades en la dirección principal del flujo como se muestra en la figura 4.1.



**FIGURA 4.1** Imagen que muestra la zona de recirculación. La altura de la forma de fondo  $h$  es de 2mm.

Las velocidades en la zona superior fueron del orden de los 160 mm/s y en la zona inferior varió entre valores positivos y negativos de acuerdo a la evolución del vórtice que muestra la figura 4.1. La longitud de la zona de recirculación fue del orden de  $7h$  ( $h$  es la altura de la forma de fondo empleada), y este resultado está de acuerdo con las mediciones realizadas previamente por Palacios y Rojas (2001).

## 4.2 CONCENTRACIÓN DE LA FASE SÓLIDA

Con el fin de verificar la concentración de partículas sólidas en el flujo, se llevaron a cabo 3 pruebas. En cada prueba se emplearon 2 g, 2.5 g y 3 g de partículas en tres litros de agua destilada, obteniéndose por lo tanto concentraciones de 0.67 g/l, 0.83 g/l y 1 g/l respectivamente.

En cada prueba se hicieron tres ensayos espaciados media hora. Cada ensayo consistió en tomar una secuencia de 20 pares de fotografías con el fin de contar las partículas presentes en tres zonas a diferente altura del flujo: a 1 mm, 7 mm y 14 mm. Éstas distancias se midieron a partir del fondo del canal.

Conociendo el número de partículas, su volumen y su densidad es posible calcular la concentración en unidades de masa sobre volumen mediante la siguiente ecuación:

$$C = \frac{NP \cdot VP \cdot DP}{VC} \cdot 1000 \quad (13)$$

de donde:

- C : concentración en [g/l]
- NP : número de partículas en área de medición [ - ]
- VP : volumen de una partícula [cm<sup>3</sup>]
- DP : densidad de las partículas [g/cm<sup>3</sup>]
- VC : volumen de control [cm<sup>3</sup>]

El volumen de control se tomó como el área de la zona en las fotografías donde se contabilizaron las partículas multiplicada por el espesor del plano de luz generado por el láser que fue de 1.8 mm. El área de la zona en cuestión fue de 6 mm de ancho y 2 mm de alto.

Para cada secuencia de fotografías se contabilizaron las partículas tanto en la imagen A como en la B. Además, se calculó la concentración promedio y su desviación estándar (ver tabla 4.1). Calculadas las desviaciones estándar para cada una de las secuencias, se obtuvo el promedio de las tres. Lo anterior se repitió en cada una de las pruebas. A continuación se muestran los cálculos para la primera prueba :

**Tabla 4.1 Resultados de desviación estándar para los tres ensayos de la prueba 1 de concentraciones a) para la imagen A, b) para la imagen B**

a)

<b>IMAGEN A</b>			
<b>DESVIACION ESTANDAR DE LA CONCENTRACION EN CADA ENSAYO [g/l]</b>			
<b>SECUENCIA</b>	<b>ZONA INFERIOR</b>	<b>ZONA MEDIA</b>	<b>ZONA SUPERIOR</b>
1	$0.70 \pm 0.16$	$0.52 \pm 0.11$	$0.49 \pm 0.11$
2	$0.66 \pm 0.11$	$0.51 \pm 0.08$	$0.44 \pm 0.08$
3	$0.63 \pm 0.12$	$0.49 \pm 0.08$	$0.43 \pm 0.09$
<b>PROMEDIO</b>	<b><math>0.67 \pm 0.13</math></b>	<b><math>0.51 \pm 0.09</math></b>	<b><math>0.45 \pm 0.09</math></b>

b)

<b>IMAGEN B</b>			
<b>DESVIACION ESTANDAR DE LA CONCENTRACION EN CADA ENSAYO [g/l]</b>			
<b>SECUENCIA</b>	<b>ZONA INFERIOR</b>	<b>ZONA MEDIA</b>	<b>ZONA SUPERIOR</b>
1	$0.68 \pm 0.15$	$0.51 \pm 0.11$	$0.47 \pm 0.10$
2	$0.64 \pm 0.12$	$0.48 \pm 0.08$	$0.42 \pm 0.10$
3	$0.61 \pm 0.12$	$0.47 \pm 0.08$	$0.42 \pm 0.11$
<b>PROMEDIO</b>	<b><math>0.64 \pm 0.13</math></b>	<b><math>0.49 \pm 0.09</math></b>	<b><math>0.44 \pm 0.10</math></b>

En las siguiente tabla de datos se resumen los resultados obtenidos del valor promedio de la desviación estándar para cada prueba.

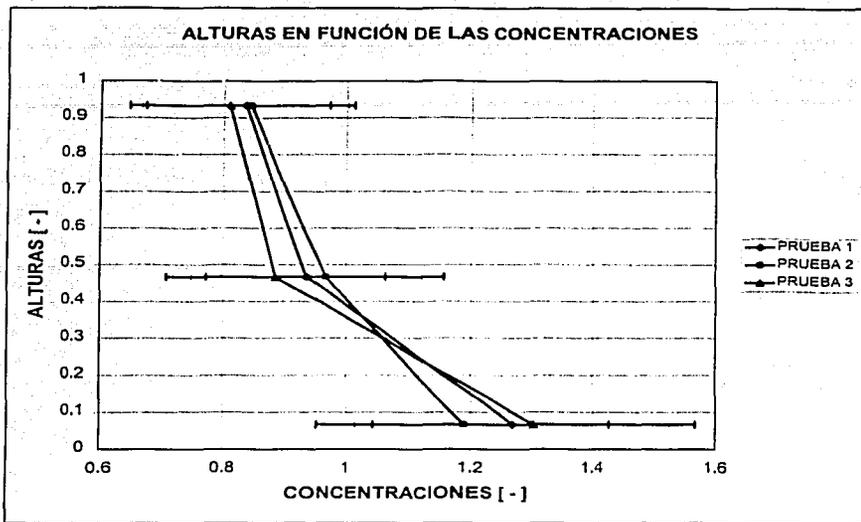
**Tabla 4.2 Promedio de las concentraciones y desviación estándar para las tres pruebas efectuadas.**

PRUEBA	PROMEDIOS DE CONCENTRACIONES Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR [g/l]		
	ZONA INFERIOR	ZONA MEDIA	ZONA SUPERIOR
1	0.67 ± 0.13	0.51 ± 0.09	0.45 ± 0.09
2	0.78 ± 0.15	0.63 ± 0.11	0.55 ± 0.11
3	1.29 ± 0.27	0.88 ± 0.17	0.80 ± 0.12

Este procedimiento se aplicó a los demás datos y los resultados se recogen en la tabla 4.3. El promedio general de la variación de las concentraciones fue de 19.13 %.

**Tabla 4.3 Resultados de la variación de la concentración en las tres pruebas**

PRUEBA	VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN PARA CADA PRUEBA EFECTUADA [%]		
	ZONA INFERIOR	ZONA MEDIA	ZONA SUPERIOR
1	± 20	± 20	± 20
2	± 19	± 17.93	± 19.25
3	± 21	± 19.80	± 15.19



**FIGURA 4.2** Gráfico de alturas en función de las concentraciones por conteo en pantalla (unidades adimensionalizadas).

La sección de medición de concentración reportada se localizó 13.4 mm aguas abajo de la cresta de la forma de fondo. La recirculación de baja velocidad contribuyó a que cerca del fondo se presentaran las concentraciones más altas.

La variación de las concentraciones de partículas en el tiempo está asociada al comportamiento del flujo. Fessler *et al.* (1994) menciona que las estructuras turbulentas del flujo pueden mover las partículas de manera organizada y producir fluctuación de las concentraciones aún si en un principio las partículas están uniformemente distribuidas.

### **4.3 MEDICIÓN DE VELOCIDADES DE LA FASE SÓLIDA Y LÍQUIDA SIMULTÁNEAMENTE.**

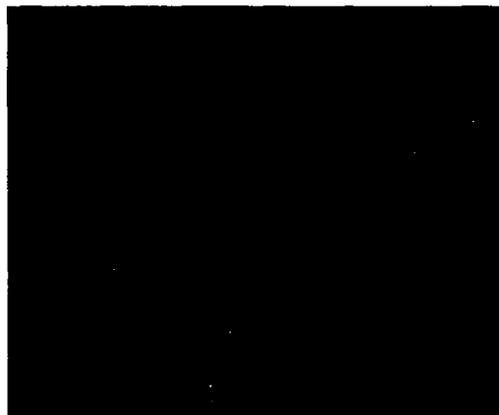
La medición simultánea de las velocidades de la fase sólida y de la fase líquida permitió conocer el comportamiento de cada una de ellas como también las ventajas y limitaciones del equipo PIV.

#### **4.3.1 ENSAYOS CON LA CAJA DE VIDRIO**

En la sección 2.3.1, se mencionó el uso de una caja de vidrio como parte del desarrollo de la metodología usando la técnica PIV para la medición bidimensional de velocidades en un flujo bifásico. Un ejemplo de los resultados se presenta en las imágenes de la figura 4.3 las cuales corresponden al plano central, perpendicular al eje entre las dos cámaras, y a un área de 3.5 cm x 3.5 cm, separada del fondo a 2.5 cm y de las paredes laterales a 3.25 cm. Las dimensiones de la caja de vidrio fueron de 10 cm x 10 cm x 10 cm.



a)



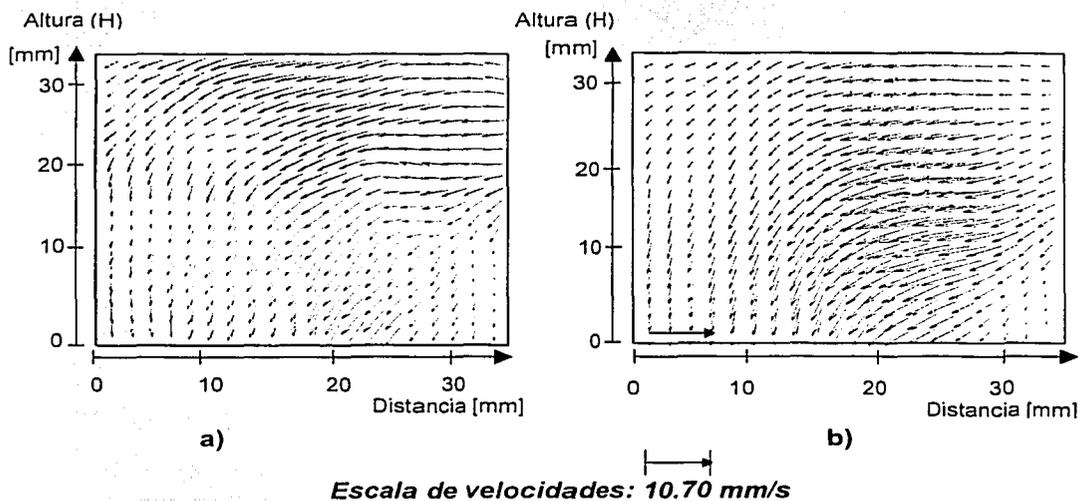
b)

**FIGURA 4.3**

- a) Imagen de la fase sólida: partículas teñidas con rodamina ( $63\mu\text{m} < \phi < 105\mu\text{m}$ )  
b) Imagen de la fase líquida: partículas fluorescentes ( $\phi=15\mu\text{m}$ )

En estas pruebas se añadió gran cantidad de partículas correspondientes a la fase sólida, y, sin cuantificar la concentración, sólo se buscó que el número de partículas en las áreas de interrogación fuera mayor a cinco.

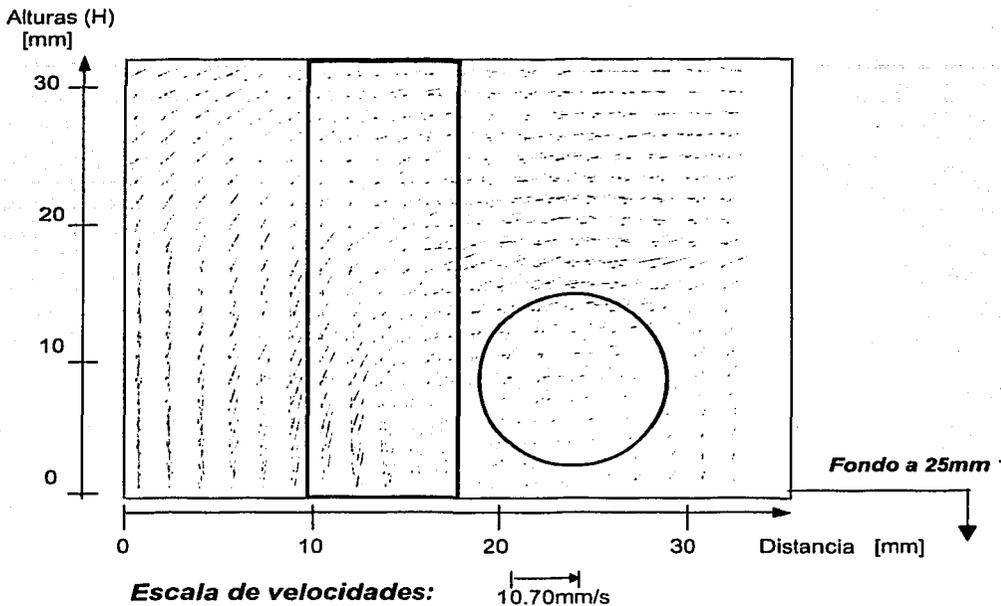
El programa permite definir el tiempo entre dos imágenes consecutivas que más tarde serán procesadas, como también del siguiente par de imágenes. El tiempo entre imágenes para correlacionar fue de  $1750 \mu\text{s}$  y el tiempo entre pares distintos de imágenes fue de  $125 \text{ ms}$ . Los campos vectoriales bidimensionales de velocidad que se obtuvieron son los mostrados en la figura 4.4.



**FIGURA 4.4 a) Campo vectorial correspondiente a la fase sólida  
b) Campo vectorial correspondiente a la fase líquida**

Superponiendo estos campos vectoriales, el resultado es el que muestra la figura 4.5. El flujo generado por el agitador es muy complejo y su estudio no se contempla en este trabajo. se trata de un flujo en tres dimensiones y el equipo PIV con el que se cuenta hace análisis en dos dimensiones sólomente. Lo único que se pretendió fue distinguir las velocidades de las dos fases. Todas estas

observaciones contribuyeron con el desarrollo de la metodología de medición simultánea de velocidades.



**FIGURA 4.5 Superposición de los campos vectoriales fase sólida (vectores rojos) y líquida (vectores azules).**

Se puede apreciar que en algunos sectores, por ejemplo el marcado con el rectángulo, donde se presentaron las mayores velocidades, las partículas siguen razonablemente la trayectoria del flujo. La zona encerrada por el círculo muestra gran diferencia en las trayectorias de ambas fases. Las partículas grandes tienden a precipitarse mientras que el fluido sigue una trayectoria distinta.

Las velocidades en la parte central del rectángulo mostrado en la figura 4.5 como función de la altura están registradas en las tablas 4.5 y 4.6.

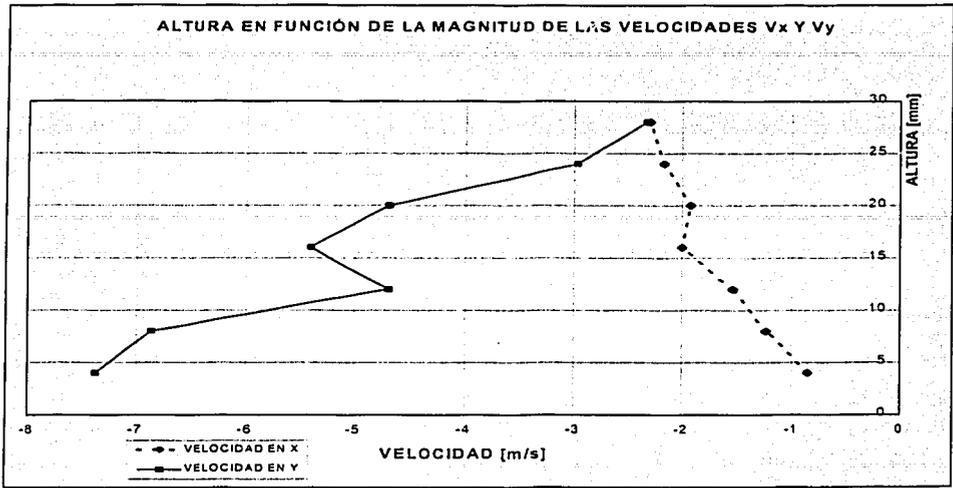
<b>ALTURA H [mm]</b>	4	8	12	16	20	24	28
<b>V<sub>x</sub> [mm/s]</b>	-0.848	-1.240	-1.540	-2.000	-1.920	-2.170	-2.300
<b>V<sub>y</sub> [mm/s]</b>	-7.368	-6.870	-4.700	-5.400	-4.700	-2.970	-2.330

**Tabla 4.4 Velocidades de la fase sólida en las direcciones X y Y desde los primeros 4mm de altura a partir del fondo del rectángulo en la figura 4.5.**

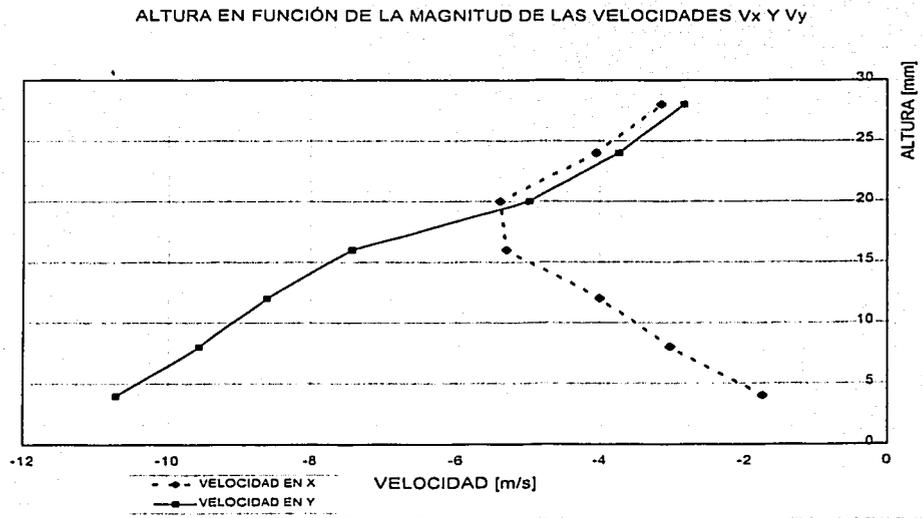
<b>ALTURA H [mm]</b>	4	8	12	16	20	24	28
<b>V<sub>x</sub> [mm/s]</b>	-1.750	-3.020	-4.000	-5.310	-5.400	-4.050	-3.140
<b>V<sub>y</sub> [mm/s]</b>	-10.700	-9.560	-8.620	-7.430	-4.990	-3.740	-2.820

**Tabla 4.5 Velocidades de la fase líquida en las direcciones X y Y desde los primeros 4mm de altura a partir del fondo del rectángulo en la figura 4.5.**

Obsérvese que en el caso de la fase sólida, la velocidad  $V_x$  va disminuyendo a medida que se aproxima a la parte inferior de la imagen pero la velocidad  $V_y$  se incrementa. En la fase líquida, su velocidad  $V_y$  aumenta a medida que la altura disminuye, pero en el caso de la velocidad  $V_x$ , el comportamiento es variable incrementándose entre los 28mm y 24mm de altura para luego disminuir en los 4mm. En la figura 4.6 se han graficado los resultados de las tablas 4.5 y 4.6.



a)



b)

**FIGURA 4.6** Variación de la magnitud de la velocidad en los ejes X e Y dentro de la caja de vidrio, a) para la fase sólida, b) para la fase líquida

#### **4.3.2 RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS EN EL CANAL DE ACRÍLICO MEDICIÓN SIMULTÁNEA DE VELOCIDADES**

Al igual que en la sección 4.1 se analizan los resultados correspondientes al flujo aguas abajo de la forma de fondo en donde, como se mencionó anteriormente, se presentan dos zonas: una de recirculación con velocidades muy bajas y otra por encima de la forma de fondo de mayor velocidad. En términos generales no es posible para el PIV resolver ambas zonas con un mismo tiempo entre imágenes, pues mientras que las partículas que representan la zona superior se mueven velozmente, las correspondientes a la zona inferior lo hacen muy lentamente. Entonces, la selección del tiempo más apropiado entre imágenes depende de la zona del flujo que se quiera estudiar.

En los resultados que se presentan a continuación se seleccionó un tiempo entre imágenes de  $2000 \mu\text{s}$ , que en un área de medición de  $32 \times 32$  pixeles permite que las partículas de la zona superior recorran una cuarta parte de dicha área. En la zona de recirculación el movimiento de las partículas fue prácticamente nulo, razón por la cual no se consideró en el análisis. Por tanto, el área total de medición fue de  $18 \text{ mm} \times 8.4 \text{ mm}$ .

La figura 4.6a muestra las partículas teñidas con rodamina mientras que la figura 4.6b muestra los trazadores fluorescentes correspondientes al mismo instante de tiempo; se observan además sus respectivos campos vectoriales de velocidades obtenidos a partir de una correlación de adaptación. En la figura 4.6c se han superpuesto los campos vectoriales de velocidad de la fase sólida y líquida.

En los perfiles de velocidad que se muestran en la figura 4.8 es posible distinguir en la altura adimensionalizada de 0.4, que la magnitud de las velocidades de la fase sólida es un poco inferior a las de la fase líquida, y por arriba de esta altura los valores de las velocidades son casi iguales. La circunferencia de línea punteada encierra parte de dos perfiles, en donde claramente se puede apreciar la diferencia de velocidades entre las fases.

FIGURA 4.6a

CAMPO VECTORIAL BIDIMENSIONAL DE VELOCIDADES DE LA FASE SÓLIDA

SB

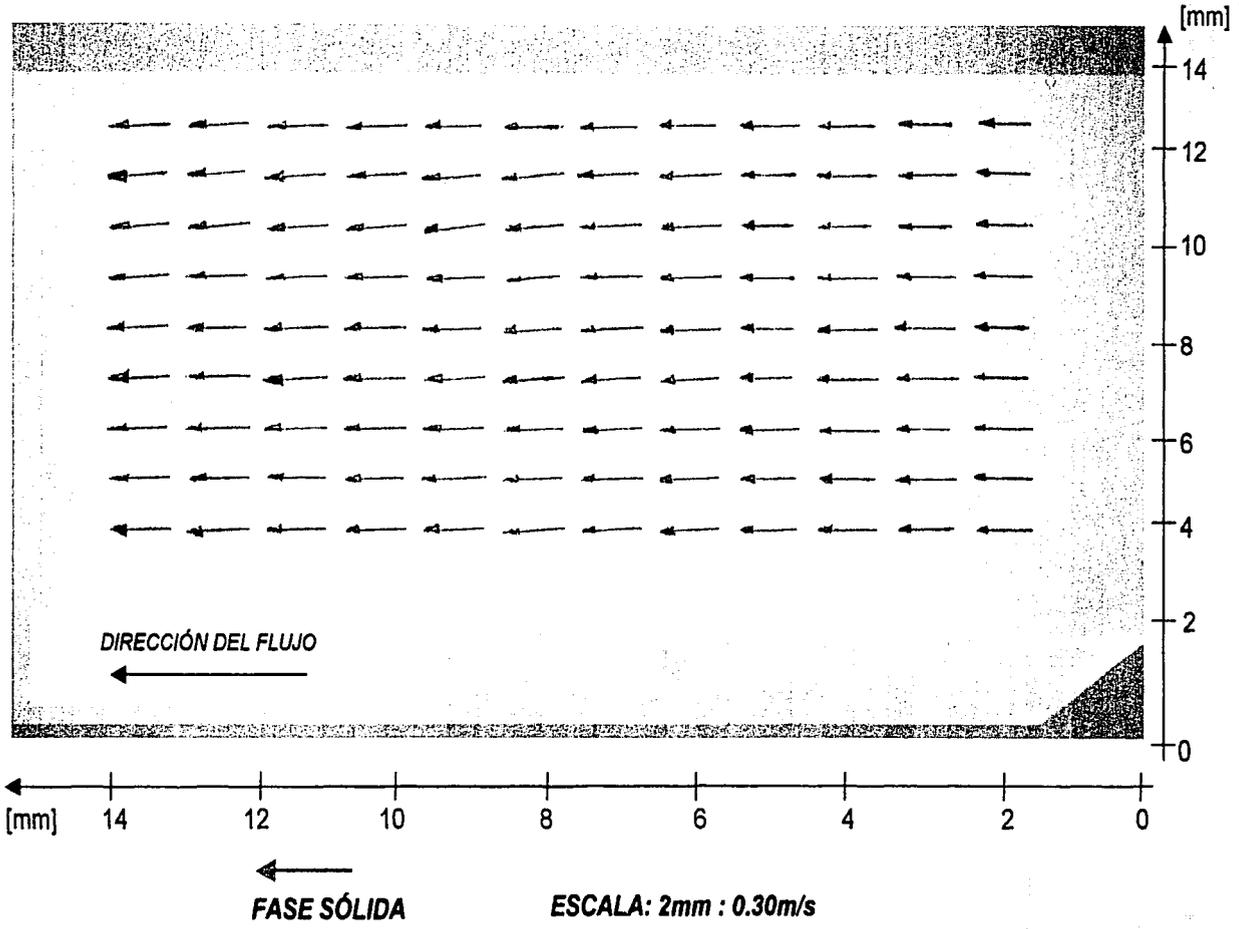
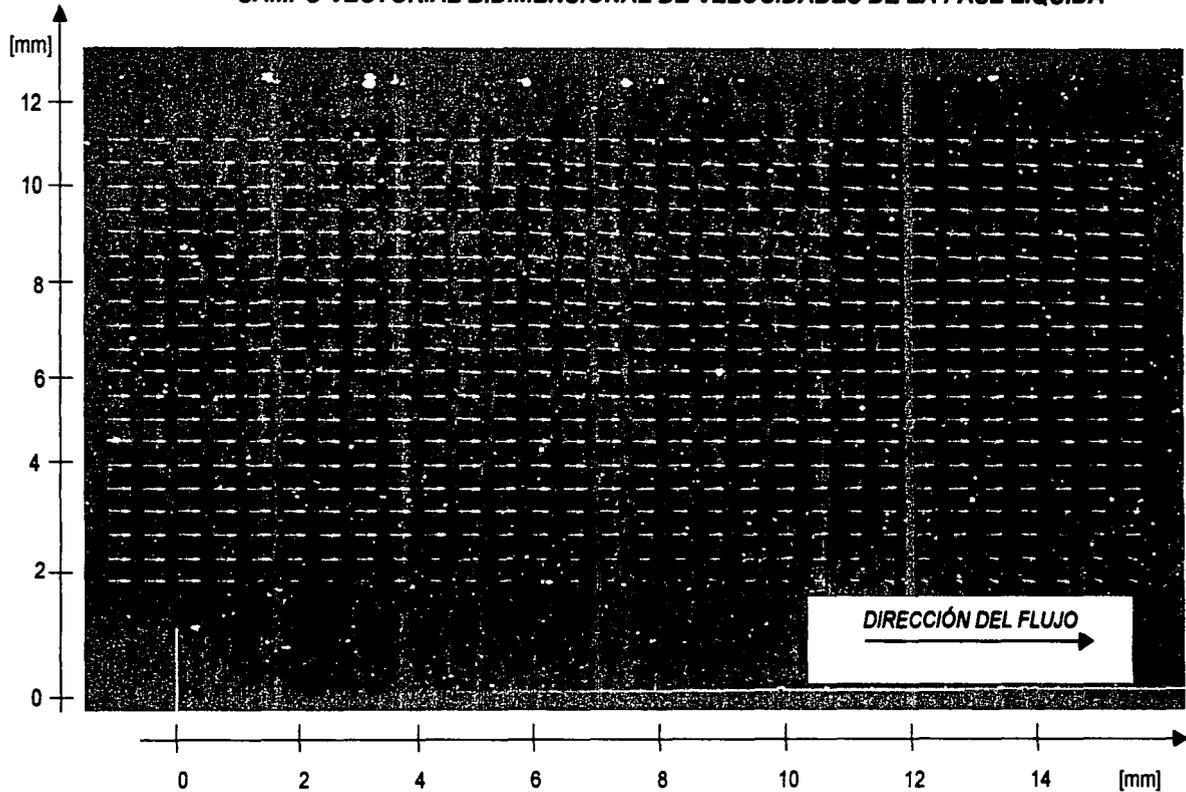


FIGURA 4.6b

CAMPO VECTORIAL BIDIMENSIONAL DE VELOCIDADES DE LA FASE LÍQUIDA



ESCALA: 6mm : 2m/s

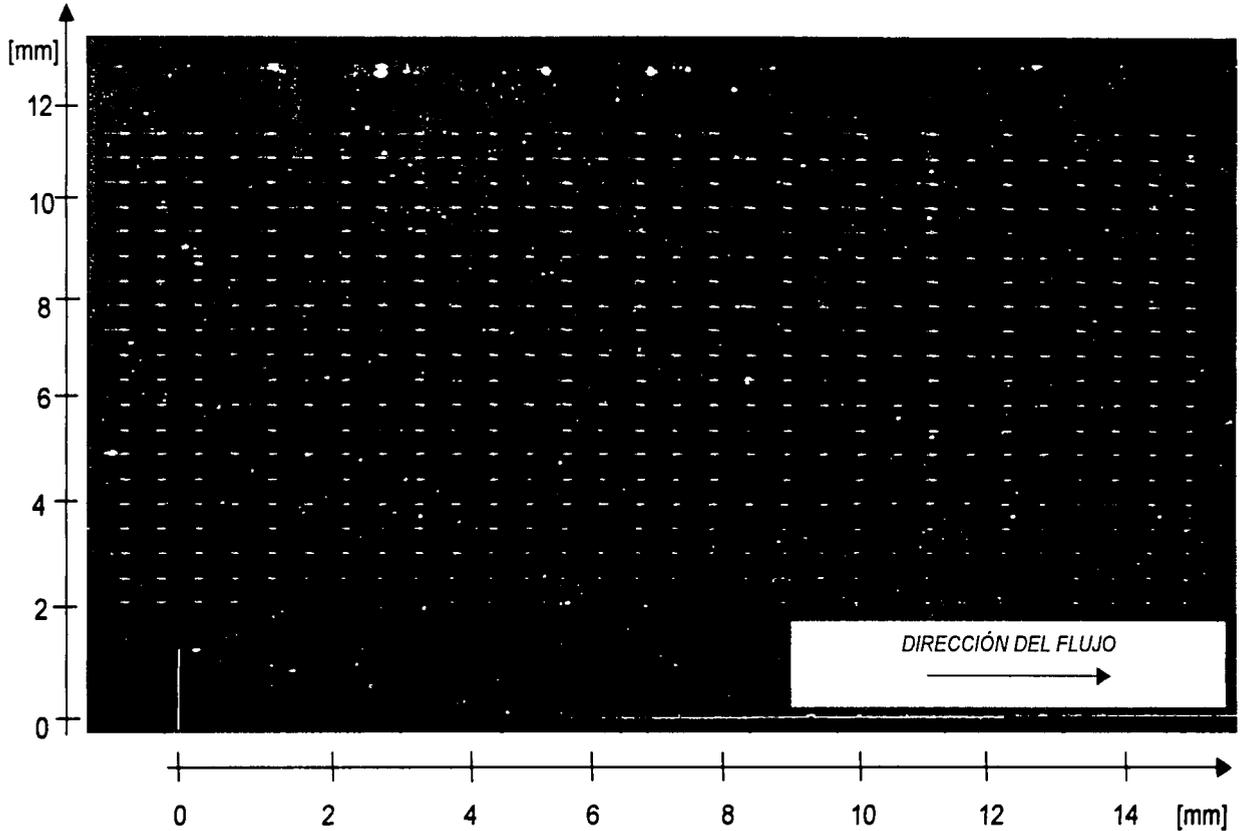


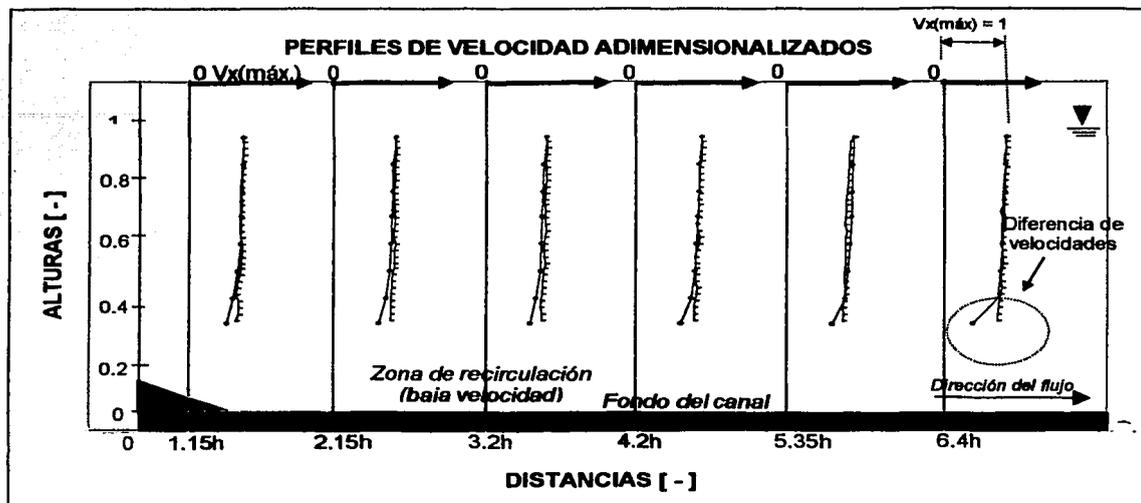
59

TESIS CON  
FALTA DE AVANCE

FIGURA 4.6c

**SUPERPOSICIÓN DE LOS CAMPOS VECTORIALES BIDIMENSIONALES DE VELOCIDAD DE LAS FASES LÍQUIDA Y SÓLIDA SOBRE UNA IMAGEN DE FASE LÍQUIDA**





**FIGURA 4.8** Perfiles de velocidad adimensionalizados.

La adimensionalización se hizo en el caso de las alturas, dividiendo cada elevación entre el tirante registrado; para las velocidades se dividieron los valores respectivos por la mayor velocidad, que en todos los casos se presentó muy cerca de la superficie libre. Las tablas 4.8 y 4.9 recopilan los resultados. Los perfiles que se graficaron corresponden a la zona de alta velocidad, donde se logró un 95% de vectores válidos.

**TABLA 4.6 Resultados de velocidad instantánea para la fase sólida.**  
**Las alturas se miden a partir del fondo del canal y las**  
**distancias a partir de la cresta de la forma de fondo.**

VELOCIDADES FASE SÓLIDA, $V_x$ [m/s]						
DISTANCIA [mm]						
ALTURA [mm]	2.2	4.3	6.5	8.6	10.8	12.9
5.2	0.120	0.124	0.124	0.124	0.125	0.126
6.3	0.126	0.129	0.130	0.129	0.129	0.130
7.4	0.130	0.131	0.131	0.131	0.132	0.133
8.5	0.131	0.132	0.132	0.133	0.134	0.135
9.5	0.132	0.133	0.133	0.134	0.135	0.136
10.6	0.133	0.133	0.134	0.134	0.136	0.137
11.7	0.133	0.138	0.139	0.138	0.138	0.138

**TABLA 4.7 Resultados de velocidad instantánea para la fase líquida.**  
**Las alturas se miden a partir del fondo del canal y las**  
**distancias a partir de la cresta de la forma de fondo.**

ALTURA [mm]	VELOCIDADES FASE LÍQUIDA, $V_x$ [m/s]					
	DISTANCIA [mm]					
	2.30	4.30	6.40	8.40	10.70	12.80
5.2	0.126	0.127	0.129	0.128	0.127	0.125
5.5	0.130	0.128	0.129	0.128	0.128	0.125
5.8	0.130	0.128	0.127	0.128	0.127	0.126
6.1	0.130	0.128	0.128	0.129	0.128	0.127
6.4	0.127	0.128	0.129	0.131	0.130	0.129
6.7	0.128	0.129	0.13	0.132	0.131	0.131
7.0	0.129	0.129	0.13	0.129	0.129	0.130
7.3	0.132	0.130	0.131	0.130	0.129	0.129
7.6	0.133	0.132	0.132	0.130	0.130	0.130
7.8	0.133	0.132	0.134	0.130	0.131	0.133
8.1	0.134	0.132	0.132	0.129	0.131	0.132
8.4	0.134	0.132	0.132	0.131	0.131	0.132
8.7	0.134	0.135	0.132	0.134	0.131	0.130
9.0	0.133	0.131	0.133	0.135	0.131	0.131
9.3	0.132	0.132	0.135	0.133	0.133	0.131
9.6	0.132	0.133	0.134	0.131	0.130	0.131
9.9	0.132	0.134	0.133	0.133	0.131	0.132
10.2	0.132	0.133	0.134	0.133	0.132	0.129
10.5	0.132	0.133	0.133	0.134	0.132	0.133
10.7	0.132	0.132	0.133	0.133	0.132	0.132
11.0	0.132	0.132	0.134	0.134	0.133	0.133
11.3	0.132	0.132	0.134	0.134	0.134	0.133
11.6	0.133	0.134	0.135	0.135	0.135	0.134
11.9	0.134	0.134	0.135	0.135	0.135	0.135
12.2	0.134	0.133	0.135	0.135	0.136	0.136
12.5	0.135	0.134	0.134	0.137	0.136	0.134
12.8	0.136	0.135	0.135	0.137	0.137	0.135
13.1	0.136	0.135	0.136	0.138	0.138	0.137
13.4	0.136	0.134	0.136	0.138	0.138	0.136
13.6	0.135	0.132	0.133	0.136	0.144	0.137

En la aplicación de la correlación de adaptación para la fase líquida se inició con un área de 256 x 256 píxeles hasta llegar a la de 64 x 64 píxeles y sobreposición (overlap) del 50 %. El área activa en las imágenes se redujo a 1008 x 768 píxeles. Con esta condición, el programa FlowManager sólo hizo cálculos en la zona superior del flujo. Ver la figura 4.7. La aplicación de la correlación de adaptación debe llevarse a cabo realizando pruebas sucesivas en cada una de las cuales se debe definir un área de interrogación inicial y final como también el porcentaje de sobreposición. Las pruebas se llevan a cabo hasta que se obtiene un mínimo de vectores rechazados (5 % de acuerdo con la literatura existente).

En el caso de la fase sólida, la aplicación de la correlación de adaptación se inició con un área de 512 x 512 píxeles hasta llegar a la de 256 x 256 píxeles. La sobreposición aplicada fue del 75 %.

Es de anotar que el programa FlowManager 3.5 sólo calcula en áreas de interrogación completas. Por tal razón resulta muy conveniente emplear la opción de Área Activa pues en ella es posible seleccionar un área activa en la que quepan exactamente una cierta cantidad de áreas de interrogación del tamaño que previamente se haya seleccionado. La opción Área Activa respeta y emplea toda el área definida para hacer el cálculo del campo vectorial.

### **4.3 CÁLCULO DE LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR EN LAS MEDICIONES Y COMENTARIOS**

Con el fin de conocer el comportamiento de la velocidad con respecto al tiempo en un punto específico de la zona del flujo en estudio, se calculó la desviación estándar. Los cálculos que permitieron obtener la desviación estándar de la velocidad de las partículas a través de las áreas de interrogación, tanto para la fase líquida como para la fase sólida, se muestra en las tablas 4.8 y 4.9.

La coordenada que se fijó para la fase líquida fue (x=9mm, y=11.9mm) y para la fase sólida (x=8.6mm, y=11.8mm). Como regla general no se tuvo en cuenta ni el mayor ni el menor valor de velocidad más distante en magnitud del valor medio.

#### **4.3.1 COMENTARIOS SOBRE LAS DESVIACIONES ESTÁNDAR**

Para la fase sólida la desviación estándar de la muestra de datos de velocidad fue  $\sigma_u = \pm 0.008$  m/s. Este resultado con respecto al valor medio de la velocidad de 0.135 m/s representa una variación de 6 %. Para el caso de la fase líquida se tuvo una desviación estándar de  $\sigma_u = \pm 0.0066$  m/s, es decir, un 5.22 % de variación con respecto al valor medio de 0.134 m/s.

Es de resaltar que los resultados de velocidad obtenidos tanto para la fase sólida como para la fase líquida en la zona de alta velocidad ponen de manifiesto lo bien que se resolvió la fase sólida gracias al uso de la correlación de adaptación, a pesar de haber contado con tan pocas partículas. Los perfiles obtenidos corresponden a las expectativas que se tenían sobre el comportamiento simultáneo de ambas fases y comprueban la afinación de la técnica.

**TABLA 4.8**

a) Resultados del cálculo de la desviación estándar de la velocidad para la fase sólida empleando la media de una serie de datos.

Dato No.	VELOCIDAD (m/s)	(VELOCIDAD - MEDIA) (m/s)	(VELOCIDAD - MEDIA) <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )
1	0.137	0.002	6.06E-06
2	0.139	0.004	1.99E-05
3	0.127	-0.008	5.68E-05
4	0.120	-0.015	0.0002
5	0.117	-0.018	0.0003
6	0.136	0.001	2.14E-06
7	0.140	0.005	2.98E-05
8	0.141	0.006	4.17E-05
9	0.139	0.004	1.99E-05
10	0.144	0.009	8.95E-05
11	0.142	0.007	5.57E-05
12	0.129	-0.006	3.07E-05
13	0.138	0.003	1.20E-05
PROMEDIO:	0.135 m/s	Suma (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ):	0.00088
		Promedio (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ):	0.00006794
		$\sigma_u$ (m/s):	± 0.008

**TABLA 4.9**

a) Resultados del cálculo de la desviación estándar de la velocidad para la fase líquida empleando la media de una serie de datos.

DATO No.	VELOCIDAD (m/s)	(VELOCIDAD - MEDIA) (m/s)	(VELOCIDAD - MEDIA) <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )
1	0.141	0.007	5.22E-05
2	0.135	0.001	1.51E-06
3	0.126	-0.008	6.04E-05
4	0.118	-0.016	0.00025
5	0.121	-0.013	0.00016
6	0.136	0.002	4.98E-06
7	0.144	0.010	0.000105
8	0.136	0.002	4.97E-06
9	0.138	0.004	1.79E-05
10	0.136	0.002	4.98E-06
11	0.136	0.002	4.98E-06
12	0.136	0.002	4.98E-06
13	0.136	0.002	4.98E-06
PROMEDIO:	0.134 m/s	Suma (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ):	0.0007
		Promedio (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ):	0.000052178
		$\sigma_u$ (m/s):	± 0.0072234

También se debe tener en cuenta que la literatura referente al análisis del error cometido en mediciones con el equipo PIV no es muy abundante. Las componentes del PIV tales como el láser, la óptica y la electrónica aportan un porcentaje de error en las mediciones. Otras fuentes de error son: las imperfecciones en la geometría de las lentes, las irregularidades en la forma de las partículas, la aproximación de los algoritmos que constituyen el programa y que efectúan las correlaciones para conocer en forma aproximada los desplazamientos de las partículas.

En cuanto al porcentaje de vectores erróneos con respecto a los vectores validados se encontró el siguiente resultado:

FASE SÓLIDA: 4.86% (7 vectores sustituidos en 144 vectores calculados)

FASE LÍQUIDA: 1.61% (30 vectores sustituidos en 1860 vectores calculados)

En la literatura se encontró que comúnmente el porcentaje de vectores rechazados debe ser menor al 5%, tal como lo comenta Westerweel (1994). Este investigador reporta que tales vectores se desvían en magnitud y dirección de los vectores válidos que están en su vecindad. Además, surgen de aquellas áreas de interrogación en donde se presentan insuficientes pares de partículas, lo que ocasiona una mala correlación. En la práctica es casi inevitable obtener este tipo de vectores.

La escasa información encontrada en la literatura sobre el cálculo de errores en las mediciones con PIV pone de manifiesto la necesidad de seguir desarrollando métodos que muestren al investigador en qué grado sus resultados son acertados.

## Capítulo 5

# CONCLUSIONES

### 5.1 CONCLUSIONES GENERALES

1. Se demostró que modificando la técnica estándar de Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV) mediante el uso de partículas fluorescentes de diferente tamaño y diferente longitud de onda de la luz dispersada en combinación con el empleo de filtros ópticos instalados en cada cámara, es posible medir simultáneamente la velocidad de la fase líquida y de la fase sólida en el flujo de agua con sólidos en suspensión.
2. Se logró la alineación de las dos cámaras, de tal forma, que el origen de las coordenadas de las imágenes de cada una de las fases coincidiera. Esto resultó crucial para el análisis de los resultados.
3. La correlación de adaptación (Adaptive correlation) permitió la obtención de un mayor número de vectores válidos para la fase sólida, que cuando se empleó la correlación cruzada (Cross correlation). Para la fase líquida, la correlación cruzada (Cross correlation) dio buenos resultados en el cálculo de los campos de velocidad, pero se optó por aplicarle también una correlación de adaptación con el fin de poder comparar resultados con la fase sólida.
4. A partir de las fotografías de las partículas sólidas obtenidas con el PIV se midió la concentración, seleccionando un área dentro del plano de luz generado por el láser y conociendo además el diámetro de las partículas, su densidad y el espesor del plano de luz. La desviación estándar fue del orden del 20 %, lo cual puede atribuirse al flujo, de acuerdo con lo reportado por Fessler *et al.* (1994).

5. Para la separación de las dos fases en caso de no contar con partículas fluorescentes, se propuso el uso de un control de escalas de grises en las imágenes de tal manera que las partículas pequeñas quedaran fuera del campo visual. Esto resultó muy útil para la medición de concentraciones.
6. Los resultados en la zona de análisis tanto para la fase sólida y la fase líquida fueron del mismo orden: velocidades de 0.134 m/s con una desviación estándar del 6 %. Los perfiles de velocidad correspondientes a cada fase coincidieron en casi todos los puntos, excepto donde la velocidad del flujo fue menor. Lo anterior implica que sólo en zonas de alta velocidad los sólidos en suspensión siguen fielmente el patrón de flujo.
7. Se utilizó la idea de Dreier *et al.* (2000) de usar partículas fluorescentes para diferenciar las partículas que representaban a cada fase, sin embargo el arreglo experimental, la toma de imágenes y el procesamiento fueron diferentes. En este caso se emplearon partículas trazadoras y sólidos en suspensión que emitieron luz con diferente longitud de onda, dos cámaras con filtros correspondientes a cada longitud de onda, y un láser pulsado sincronizado con ambas cámaras a diferencia de trazadores fluorescentes y partículas de cuarzo para la fase sólida, cuatro cámaras y un láser continuo empleado por Dreier *et al.* (2000).
8. El uso de un algoritmo de corrimiento de las áreas de interrogación de la segunda imagen similar al propuesto por Scarano *et al.* (1999) resultó exitoso en el cálculo de velocidades de la fase sólida donde las pocas partículas en las áreas de medición se presentaron desde las grandes escalas. Esto es diferente de la idea original donde la salida de las partículas de la segunda imagen se presentó por gradientes de velocidades o por lo reducido de las áreas de interrogación en el análisis de escalas pequeñas en turbulencia.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

9. En la metodología propuesta para flujo bifásico usando la velocimetría por imágenes de partículas es necesario el empleo de partículas fluorescentes de diferente tamaño, un tamaño para cada fase. Si la longitud de onda de fluorescencia es diferente se tiene la ventaja de poder separar fácilmente las fases mediante filtros ópticos pero se tiene la desventaja del alto costo de estos materiales. Esto último limita su aplicación a experimentos con flujos másicos pequeños y con un buen control del sistema de recirculación.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## 5.2 TRABAJO DE INVESTIGACIÓN A FUTURO

Comprobado el funcionamiento de la técnica de medición de velocidades en forma simultánea de las fases sólida y líquida con el PIV, es posible dar inicio a un estudio detallado del flujo en canales con transporte de sólidos en suspensión con miras a profundizar en los siguientes temas:

1. Influencia que ejercen las partículas en suspensión sobre las estructuras turbulentas del flujo.
2. Efecto de las estructuras coherentes de diferentes escalas sobre el transporte de sólidos en suspensión.

También puede considerarse la aplicación de la técnica en otras áreas de la ingeniería que involucren flujos en diferentes fases (dispersión de contaminantes, flujo de mezclas, difusión de partículas en diferentes medios, entre otros).

Un sistema de recuperación de partículas es necesario dado los altos costos de los trazadores.

Es necesario profundizar en el estudio del cálculo de error en mediciones con PIV dado lo escaso de la literatura.

## REFERENCIAS

Adrian RJ (1991). Particle-imaging techniques for experimental fluids mechanics. Ann. Rev. Fluid Mech. 23: 261-304.

Bai KJ; Kyoung JH; Kim J, 2003. Numerical computations for a nonlinear free-surface problem in shallow water. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering-transactions of the ASME. 125 (1): 33-40 Feb.

Bagnold RA (1936a). Libian Sands: Travel in a Dead World. London: Hodder and Stoughton.

Bagnold RA (1936b). The movement of desert sand. Proc. R. Soc. Lond. A 157, 594-620.

Bagnold RA (1937). The size-grading of sand by wind. Proc. R. Soc. Lond. A 163, 250-264.

Bagnold RA (1938). The movement of sand storms. Proc. R. Soc. Lond. A 167, 282-291.

Bagnold RA (1941). The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. New York: William Morrow & Co.; republished by Methuen & Co., London, 1954, 1960, 1971; to the republished by the Blackburn Press, 2001.

Bagnold RA (1954). Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. Proc. R. Soc. Lond. A 225, 49-63.

Bagnold RA (1956). The flow of cohesionless grains in fluids. Proc. R. Soc. Lond. A 249, 235-297.

Bagnold RA (1966a). An approach to the sediment transport problem from general physics. Tech. Re. 422-I US Geological Survey profesional paper.

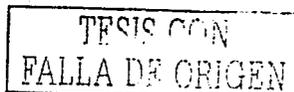
Bagnold RA (1966b). The shearing and dilation of dry sand and the 'singing' mechanism. Proc. R. Soc. Lond. A 295, 219-232.

Bagnold RA (1973). The nature of saltation and of 'bed-load' transport in water. Proc. R. Soc. Lond. A 332, 473-504.

Bagnold RA (1988). The Physics of Sediment Transport by Wind and Water: A Collection of Hallmark Papers by R. A. Bagnold (ed. C. R. Thorne, R. C. MacArthur & J. B. Bradley). New York: The American Society of Civil Engineers.

Bagnold RA (1990). Sand, Wind and war: Memoirs of a Desert Explorer. University of Arizona Press.

72



Berger TW; Kim J; Lee C; Lim J, 2000. Turbulent boundary layer control utilizing the Lorentz force. *Physics of Fluids* .12 (3): 631-649 Mar.

Dreier T; Blaser S; Kinzelbach W; Virant M; Maas H. -G (2000). Simultaneous measurement of particle and fluid velocities in a plane mixing layer with dispersion. *Experiments in Fluids* 29: 486-493.

DuBoys SP (1879). "*Le Rhone et les Rivières a Lit Affoillable*", *Annales des Ponts et Chaussées*, Serie 5, Vol. 18, 1879, pp 141-195.

Espinoza, J; Palacios M; Rojas J (2001). Numerical and experimental analysis of the flow downstream of a fixed bed form in an open-channel. V Latin American Caribbean Congress on Fluid Mechanics. Universidad Simón Bolívar, May 14-17, 2001. Caracas, Venezuela.

Fessler JR; Kulick JD; Eaton J (1994). Preferential concentration of heavy particles in a turbulent channel flow. *Phys. Fluids* 6 (11): 3742-3749.

Fredsoe, J (1982). Shape and dimensions of stationary dunes in rivers. *Journal of Hydraulic Div., ASCE*. Vol. 108. No. 8: 932-497.

Grant I (1994). Selected papers on particle image velocimetry SPIE Milestone Series MS 99, SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, Washington.

Grant I (1997). Particle image velocimetry: a review, *Proceedings Institute of Mechanical Engineers* 211: 55-76.

Hassan YA; Phillip OG; Schmidl WD (1993). Bubble collapse velocity measurements using a particle image velocimetry technique with fluorescent tracers. *ASME-FED* 172: 85-92.

Hilgers S; Merzkirch W; Wagner T (1995). PIV measurements in multiphase flow using CCD- and phot-camera. *ASME-FED* 209: 151-154.

Hirsch KD (1993). Particle image velocimetry, in *Speckle Metrology*, ed. R. S. Sirohi, Marcel Dekker, New York: 235-323.

Hunt ML; Zenit R; Campbell CS; Brennen CE (2002). Revisiting the 1954 suspension experiments of R. A. Bagnold. *J. Fluid Mech.*, 452: 1-24.

Jaehne B (1997): *Digitale Bildverarbeitung*, 4<sup>th</sup> edition, Springer Verlag, Berlin Heidelberg (Available in English: Digital image processing).

Keane D. Richard; Adrian Ronald J (1992). Theory of cross-correlation analysis of PIV images. *Applied Scientific Research* 49: 191-215.

Keane D. Richard; Adrian Ronald J (1993). Theory of cross-correlation analysis of PIV images. Flow visualisation and image analysis. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht: 1-25.

Kim J; Ryu DS; Jones TW, 2001. Three-dimensional simulations of the Parker instability in a uniformly rotating disk. Astrophysical Journal. 557 (1): 464-474 Part 1 Aug. 10.

Lauterborn W; Vogel A (1984). Modern optical techniques in fluid mechanics. Ann. Rev. Fluid Mech 16: 223-244.

Maza J. A; García M (1996). Transporte de Sedimentos. Series del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Capítulo 10 del Manual de Ingeniería de Ríos.

Nakagawa H; Nezu I (1993). Turbulence in Open – Channel Flows. International Association for Hydraulic Research. Monograph Series.

Raffel M; Willert C; Kompenhans J (1998). Particle Image Velocimetry. A practical Guide. Springer – Verlag Berlin Heidelberg 1998.

Scarano F; Riethmuller ML (1999). Iterative multigrid approach in PIV image processing with discrete window offset. Experiments in Fluids 26 (1999): 513-523.

Sridhar G; Katz J (1995). Drag and lift forces on microscopic bubbles entrained by a vortex. Phys. Fluids 7: 389-399.

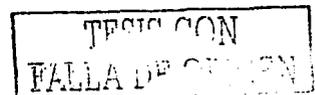
Tokuhiro A; Maekawa M; Lizuka K; Hishida K; Maeda M (1998). Turbulent flow past a bubble and an ellipsoid using shadowimage and PIV techniques. Int. J. Multiphase Flow 24: 1383-1406.

Vanoni VA; Hwang L (1967). Relation between bed forms and friction in streams. Journal of Hydraulic Div., ASCE. Vol. 93 No. 3: 121-144.

Westerweel, J (1994). Efficient detection of spurious vectors in particle image velocimetry data. Experiments in Fluids 16, 236-247.

Westerweel, J (1993). Digital particle image velocimetry – Theory and application Ph. D. Dissertation, Delft University Press, Delft.

74



# **ANEXO**

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

# REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

## TABLA DE DATOS No. 1

TÍTULO ORIGINAL DEL ARTÍCULO	AUTORES	UNIVERSIDAD	PUBLICACIÓN Y FECHA	COMENTARIOS O PALABRAS CLAVES
The structure of turbulent boundary layers.	S. J. Kline W. C. Reynolds F. A. Schraub P. W. Runstadler	Dep. of Mechanical Eng., Stanford University.	Journal of Fluid Mechanics (1967), vol. 30, part 4, pp. 741-773.	Estructuras coherentes dentro de la capa límite turbulenta y mecanismos de formación de rayas.
Open Channel Flow with Suspended Sediments.	Tadaoki Itakura Tsutomu Kishi	Hydraulic Dep. of Civil Eng., Hokkaido Univ., Sapporo, Japan.	Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 106, No. HY8, August, 1980.	Descripción de la distribución de velocidades usando la teoría de Monin-Obukhov.
Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow.	B. F. Armaly F. Durst J. C. F. Pereira B. Schönung	Inst. of Hydromechanics, Section III: Mechanics of Turbulent Flows, Univ. of Karlsruhe.	Journal of Fluid Mechanics (1983), vol. 127, pp. 473- 496.	Medición de distribuciones de velocidad y localización del punto de reattachment con LDA para flujo laminar, transición y turbulento. Diferente ubicación del Reattachment.
Coherent Structures Associated with Turbulent Transport.	Ron F. Blackwelder	Dep. of Aerospace Eng. Univ. of Southern California.	International Symposia on Transport Phenomena, 1988.	Eddies responsables del transporte de calor, masa y momento en un campo de flujo. Eddies en la región de la pared. Fenómenos de transporte.
Reynolds-number effects on the structure of a turbulent channel flow.	T. Wei W. W. Willmarth	Dep. of Aerospace Eng., Univ. of Michigan, Ann Arbor, USA.	Journal of Fluid Mechanics (1989), vol. 204, pp. 57-95.	Aplicación del LDA. Medición de dos componentes de la velocidad en un canal con flujo turbulento desarrollado. El número de Reynolds varió entre 3,000 y 40,000.
Streak Characteristic and Behavior Near Wall and Interface in Open Channel Flows.	M. Rashidi S. Banerjee	Dep. of Chemical and Nuclear Eng., Univ. of California, Santa Barbara, California.	Transactions of the ASME, Vol. 112, June 1990.	Estudio de las estructuras turbulentas cerca de fronteras (sólida y la interfase líquida-gas).
Fundamentals of fluid motion in erosion by solid particle impact.	J. A. C. Humphrey	Dep. of Mechanical Eng., Univ. of California at Berkeley, USA.	Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 11, No. 3, September 1990.	Fenómeno de erosión de materiales por el impacto de partículas sólidas.

76

FALLA DE ORIGEN

TABLA DE DATOS No. 2

TITULO ORIGINAL DEL ARTICULO	AUTORES	UNIVERSIDAD	PUBLICACIÓN Y FECHA	COMENTARIOS O PALABRAS CLAVES
Particle dispersion in the developing free shear layer. Part 1. Unforced flow.	B. J. Lázaro J. C. Lasheras	Dep. of Applied Mechanics and Eng. Sciences, Univ. of California, San Diego, La Jolla, CA, USA.	Journal of Fluid Mechanics (1992), vol. 235, pp. 143-178.	Investigación experimental sobre la dispersión de pequeñas partículas en una capa desarrollada con alto número de Reynolds y turbulenta.
Particle dispersion in the developing free shear layer. Part 2. Forced flow.	B. J. Lázaro J. C. Lasheras	Dep. of Applied Mechanics and Eng. Sciences, Univ. of California, San Diego, La Jolla, CA, USA.	Journal of Fluid Mechanics (1992), vol. 235, pp. 179-221.	Análisis de los mecanismos de dispersión de pequeñas partículas de agua en una capa de mezclado turbulenta (plano forzado acústicamente).
Origin of turbulence-producing eddies in a channel flow.	John W. Brooke T. J. Hanratty	Dep. of Chemical Eng., Univ. of Illinois, Urbana, Illinois.	Physics Fluids A 5 (4), April 1993.	Generación de turbulencia. Relación entre grandes esfuerzos de Reynold y los Eddies.
Turbulence in open-channel flows.	Iehisa Nezu Hiroji Nakagawa	Kyoto Univ., Japan.	Monograph published in 1993.	Monografía. Estructuras coherentes y técnicas desarrolladas para identificar estructuras coherentes.
Characterization of near-bed coherent structures in turbulent open channel flow using synchronized high-speed video and hot-film measurements.	M. García F. López Y. Niño	Hydrosystems Laboratory Dep. of Civil Eng., Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, USA.	Experiments in Fluids 19 (1995), pp. 16-28	Cámara de video alta velocidad. Estructuras coherentes del flujo asociadas con eyecciones cerca del fondo. Obtención de perfiles de velocidad y datos de esfuerzos cortantes en eventos de eyección.
The effect of vortex pairing on particle dispersion and kinetic energy transfer in a two-phase turbulent shear layer.	Kenneth T. Kiger Juan C. Lasheras	Dep. of Applied Mechanics and Eng. Sciences.	Journal of Fluid Mechanics (1995), vol. 302, pp. 149-178.	Estudio del transporte de partículas pesadas en la interfase de transferencia de energía cinética debido a las fuerzas viscosas de arrastre en una capa cortante turbulenta.
Particle behavior in the turbulent boundary layer. I. Motion, deposition, and entrainment.	D. Kafori G. Hetsroni S. Banerjee	Dep. of Chemical and Nuclear Eng., Univ. of California. Santa Barbara, California.	Physics Fluids 7 5 (4), May 1995.	Estudio del movimiento de partículas sólidas en la región cercana a la pared por medio de técnicas de visualización y LDA.

77

FALLA DE CASCEN

TABLA DE DATOS No. 3

TITULO ORIGINAL DEL ARTICULO	AUTORES	UNIVERSIDAD	PUBLICACION Y FECHA	COMENTARIOS O PALABRAS CLAVES
Topology of fine-scale motions in turbulent channel flow.	Hugh M. Blackburn Nagin N. Mansour Brian J. Cantwell	Dep. of Mechanical Eng. Monash Univ. Clayton, Australia. Nasa Ames Research Center, USA. Dep. of Aeronautics and Astronautics, Stanford University, USA.	Journal of Fluid Mechanics (1996), vol. 310, pp. 269-292.	Simulación numérica. Lejos de la región de la pared, los movimientos en pequeña escala tienen mucho en común con otros flujos turbulentos y de transición.
Experiments on particle-turbulence interactions in the near-wall region of an open channel flow: implications for sediment transport.	Y. Niño M. H. García	Hydrosystems Lab., Dep. of Civil Eng., Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Ill., USA.	Journal of Fluid Mechanics (1996), vol. 326, pp. 285-319	Estudio de la interacción entre partículas de sedimento y la turbulencia en la región de la pared con un sistema de video de alta velocidad.
Numerical models for two-phase turbulent flows.	C. T. Crowe T. R. Troutt J. N. Chung	School of Mechanical and Materials Eng., Washington State Univ., Pullman, Washington, USA.	Annu. Rev. Fluid. Mech. 1996. 28:11-43	Modelos numéricos para flujos turbulentos de partículas.
Hybrid digital particle tracking velocimetry technique.	E. A. Cowen S. G. Monismith	Environmental Fluid Mechanics Laboratory, Stanford University, Stanford, USA.	Experiments in Fluids 22 (1997) 199 - 211. Springer - Verlag 1997.	Velocimetría por rastreo de partículas basada en una correlación cruzada de la velocimetría de partículas digitalizada.
Particle motion in near-wall turbulence.	T. Ushijima I. A. Joia R. J. Perkins	Laboratoire de Méchanique des fluides et d'Acoustique. Ecole Centrale de Lyon, France.	The 1997 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting. FEDSM'97. June 22-26, 1997.	Dispersión de partículas pesadas en la región cercana a la pared. Partículas lanzadas fuera por vórtices y acumuladas en la subcapa viscosa.
Engelund's Analysis of Turbulent Energy and Suspended Load.	Yarko Niño Marcelo García	Hydrosystems Laboratory, Dep. of Civil Engineering, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Ill., USA.	Journal of Engineering Mechanics. April 1998.	Análisis del modelo de una ecuación para la energía cinética turbulenta en un flujo en canal abierto con sedimentos en suspensión.

87

TIPOLOGIA DEL ORIGEN  
FALLA DE ORIGEN

TABLA DE DATOS No. 4

TÍTULO ORIGINAL DEL ARTÍCULO	AUTORES	UNIVERSIDAD	PUBLICACIÓN Y FECHA	COMENTARIOS O PALABRAS CLAVES
Turbulence modification by particles in a backward-facing step flow	John R. Fessler John K. Eaton	Dep. of Mechanical Eng., Stanford Univ., USA.	Journal of Fluid Mechanics (1999), vol. 394, pp. 97-117	Comparación de las modificaciones de la turbulencia, bajo las mismas condiciones experimentales en diferentes regímenes de flujo.
PIV measurements in a particle-laden channel flow	Anthony D. Paris John K. Eaton	Stanford University, Mechanical Eng. Dep., Stanford, USA.	3 <sup>rd</sup> ASME/JSME Joint Fluids Eng. Conference. July 18-23, 1999, San Francisco, California.	Desarrollo de la técnica PIV para investigar la relación entre la rata de disipación de energía cinética y la atenuación de la turbulencia en la fase gaseosa de un flujo con partículas.
Simultaneous measurements of particle and fluid velocities in a plane mixing layer with dispersion	T. Dreier S. Blaser W. Kinzelbach M. Virant H. -G. Maas	Inst. of Hydromechanics and Water Resources Management. Swiss Federal Inst. of Tech., Zürich, Switzerland. Fac. of Civil Eng. and Geosciences. Section of Photogrammetry and Remote Sensing. Delft Univ. of Technology. The Netherlands.	Experiments in Fluids 29 (2000) 486-493	Método óptico para la medición simultánea y separada del campo de velocidades en las dos fases en flujos con carga de sedimentos. Uso de partículas fluorescentes. Uso de dos cámaras, una de ellas con filtro óptico.
Numerical and experimental analysis of the flow downstream of a fixed bed form in an open-channel	Manuel J. Palacios G. Joselina Espinoza Ayala Jorge Rojas Menéndez	Centro de Investigación en Energía, CIE, UNAM. Dep. de Termociencias. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua IMTA.	V Latin American and Caribbean Congress on Fluid Mechanics. Univ. Simón Bolívar, Mayo 14-17, 2001. Caracas, Venezuela.	Análisis del efecto del número de Reynolds en la zona de recirculación de un canal abierto con una forma de fondo. Uso de LDA, PIV y código de computador.
Estructuras turbulentas y mecanismos de transporte de sedimentos.	María Joselina Espinoza Ayala	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua IMTA.	DEPFI-UNAM, Septiembre de 2001.	Tesis de Doctorado. Estructuras turbulentas y su relación con los mecanismos de transporte.

70

FAMILIA DE OLIVERA  
 PÉREZ COMA