



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA U. ZAC.
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO.
DIRECCIÓN DE POSGRADO

**“EVALUACIÓN Y APLICACIÓN DE LA TÉCNICA
DE LSPIV PARA ESTIMAR LA VELOCIDAD
SUPERFICIAL EN OBRAS HIDRÁULICAS”.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN
INGENIERÍA CIVIL**

P R E S E N T A

JORGE ENRIQUE CINSEL GUTIÉRREZ

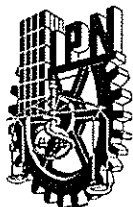
DIRECTORES DE TESIS

M. en C. PINO DURÁN ESCAMILLA

Dr. PEDRO ANTONIO GUIDO ALDANA



MÉXICO D.F., JUNIO DE 2012



SIP-14-BIS

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F., siendo las 14:30 horas del día 15 del mes de junio del 2012 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de ESIA UZ para examinar la tesis titulada:

"Evaluación y aplicación de la técnica de LSPIV para estimar la velocidad superficial en Obras Hidráulicas."

Presentada por el alumno:

CINSEL

Apellido paterno

GUTIÉRREZ

Apellido materno

JORGE ENRIQUE

Nombre(s)

Con registro:

B	1	0	1	2	7	5
---	---	---	---	---	---	---

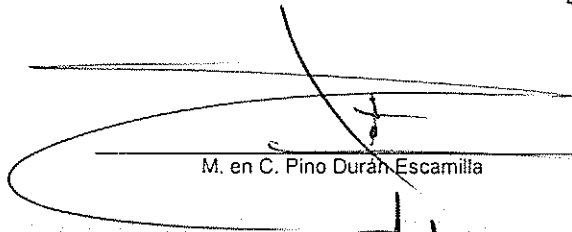
aspirante de:

MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL

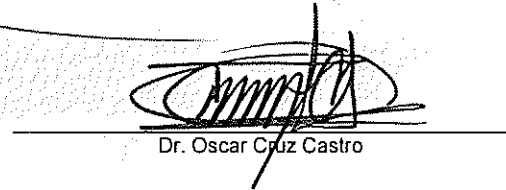
Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

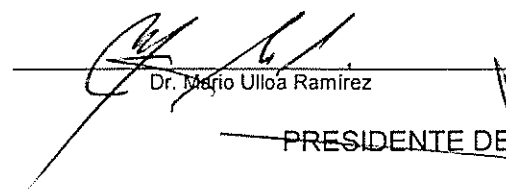
Directores de tesis

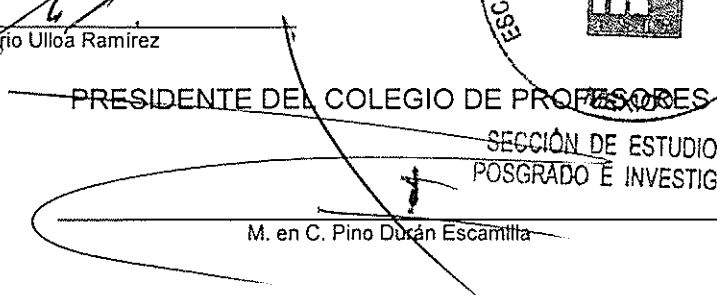

M. en C. Pino Durán Escamilla


Dr. Pedro Antonio Guido Aldana


Dr. Oscar Cruz Castro


Dr. Juan Manuel Navarro Pineda

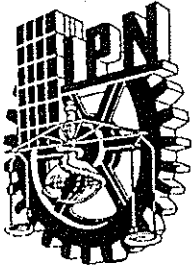

Dr. Mario Ulloa Ramírez


PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN

M. en C. Pino Durán Escamilla





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México el día 15 del mes Junio del año 2012, el que suscribe Cinsel Gutiérrez Jorge Enrique alumno del Programa de la Maestría en Ingeniería Civil con número de registro B101275, adscrito a la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, U.Z., manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del M. en C. Pino Durán Escamilla y el Dr. Pedro Antonio Guido Aldana y cede los derechos del trabajo intitulado “Evaluación y Aplicación de la técnica de LSPIV para estimar la velocidad superficial en Obras Hidráulicas”, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección cinsel_@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Cinsel Gutiérrez Jorge Enrique

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por haber permitido realizar mis estudios de posgrado, y todas las pruebas que me ayudo a superar.

Al CONACyT por la beca otorgada para realizar los estudios de posgrado a nivel maestría.

A la SEPI de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura U. Z. del Instituto Politécnico Nacional, por haber permitido cursar el programa de Maestría en Ingeniería Civil y apoyado durante mi estancia.

A mis directores de tesis el M.C. Pino Durán Escamilla y al Dr. Pedro Antonio Guido Aldana por sus consejos y apoyo en la realización de este proyecto, así como a todo mi comité de sinodales y profesores.

Al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), por permitirme realizar toda la experimentación necesaria para este proyecto en su laboratorio de Hidráulica (IMTALAB), principalmente al Dr. Serge Tamari por su apoyo incondicional y permanente en las pruebas, sugerencias y comentarios.

A mis padres, que me han guiado y formado en este gran camino de la vida, por sus consejos y oraciones que me fortalecen y me ayudan a seguir adelante. A mi esposa Lluvia e hija Eliphelet que formaron parte de este gran proyecto, a mis hermanos Hanzel y Miriam, a mis primos, a mis tíos Magda y Manuel por sus consejos y apoyo en la redacción de este documento. A mis amigos que me alentaron a seguir adelante y por esos momentos de diversión. A mi gran amigo David García quien fue compañero en esta gran aventura.

Muy especialmente al Ing. Cuahutemoc Zamorano García que ha sido uno de los grandes pilares para realizar este proyecto, gracias por todo su apoyo y buenos consejos.

Agradezco a todas las personas que estuvieron conmigo y me apoyaron.

Contenido

LISTADO DE FIGURAS	I
LISTADO DE TABLAS	VI
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT	IX
CAPÍTULO 1. Introducción a las Técnicas de Velocimetría por Imágenes de Partículas.	1
1.1. Antecedentes.	1
1.2. Planteamiento del problema.	7
1.3. Objetivos.	8
Objetivo General	8
Objetivos Específicos	9
1.4. Solución propuesta.	9
1.5. Estructura de la tesis.	10
CAPÍTULO 2 La Técnica de Velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escala (LSPIV).	11
2.1. Introducción.	11
2.2. Partículas trazadoras.	11
2.3. Fuente de luz.	14
2.4. Captura y almacenamiento de imágenes.	15
2.5. Ortorectificación de las imágenes	18
2.6. Evaluación de las imágenes.	18
2.7. Procesamiento	20
CAPÍTULO 3 Metodología.....	34
3.1. Procesamiento de imágenes con Mat_LSPIV	34
3.1.1 Ortorectificación	34
3.1.2 Análisis de PIV	37
3.1.3 Post-procesamiento	43
3.2. Verificación del programa MAT_LSPIV	47
3.2.1 Verificación de Ortorectificación.	47

3.2.2 Verificación del procesamiento de PIV.	48
CAPÍTULO 4 Dispositivos experimentales y mediciones.	53
4.1. Campaña de campo.	53
4.1.1. Descripción del sitio	53
4.1.2. Datos medidos en campo y resultados del aforo	53
4.1.3. Toma de imágenes de video y puntos de control sobre la imagen.....	55
Diseño del sistema	55
Puntos de Control.....	56
4.2. Datos de Laboratorio - IMTALAB-	58
4.2.1. Descripción del sitio	58
4.2.2. Montaje y diseño del sistema	60
4.2.3. Toma de datos, puntos de control y rectificación de las imágenes.....	63
CAPÍTULO 5 Análisis y resultados.	66
5.1. Resultados y discusión de la campaña de campo.....	66
5.2. Resultados y discusión de la campaña de laboratorio	77
5.2.1. Pruebas de LSPIV en ambientes sin controlar	77
5.2.2. Pruebas de trazadores aplicados a la técnica de LSPIV	81
5.3. Incertidumbre de la técnica de LSPIV	95
CAPÍTULO 6 Conclusiones y trabajos futuros.	97
Bibliografía	99

LISTADO DE FIGURAS

FIGURA 1. SISTEMA BÁSICO DE VELOCIMETRÍA POR IMÁGENES DE PARTÍCULAS.	2
FIGURA 2. ESQUEMA DE PROCESAMIENTO DE PIV (PAGINA WEB DANTEC DYNAMICS).	4
FIGURA 3. (KIM. ET. AL. 2008) SISTEMA DE LSPIV MÓVIL.....	6
FIGURA 4. (A) (B): IMÁGENES DE PARTÍCULAS EN DOS TIEMPOS CONSECUTIVOS, (C) (D): MAPA DE VECTORES DE VELOCIDAD	7
FIGURA 5. (IMAGEN TOMADA DE MUSTE 2008): SECUENCIA DE MEDICIÓN CON LSPIV DEL FLUJO EN UN CANAL: (A) IMAGEN DEL ÁREA QUE VA A SER MEDIDA (LOS PATRONES BLANCOS INDICAN LOS TRAZADORES NATURALES O ARTIFICIALES USADOS PARA LA VISUALIZACIÓN DE LA SUPERFICIE LIBRE), (B) IMAGEN OBLICUA DISTORSIONADA, (C) IMAGEN RECTIFICADA CON LOS VECTORES DE VELOCIDAD SUPERPUESTOS.....	11
FIGURA 6. TRAZADORES ARTIFICIALES UTILIZADOS PARA MEDICIÓN CON LSPIV: (A) ESFERAS DE POLIESTIRENO, (B) TIRAS DE PAPEL, (C) BIOBOLAS.	14
FIGURA 7. ALGUNO MODELOS DE LÁMPARAS DE HALÓGENO UTILIZADAS PARA LA ILUMINACIÓN EN LA TÉCNICA DE LSPIV DE LABORATORIO.....	14
FIGURA 8. (A) CÁMARA MARLIN F131C Y (B) CÁMARA STINGRAY F-080B/C.	15
FIGURA 9. (A) IMAGEN CON UNA EXPOSICIÓN, (B) IMAGEN CON DOBLE EXPOSICIÓN, (C) IMAGEN CON MÚLTIPLE EXPOSICIÓN.	17
FIGURA 10. (A) DOS IMÁGENES CON UNA EXPOSICIÓN, (B) MÚLTIPLES IMÁGENES CON UNA EXPOSICIÓN.....	17
FIGURA 11. (IMAGEN TOMADA DE MUSTE 2008): RELACIÓN ENTRE LA CÁMARA Y EL SISTEMA COORDENADO DEL TERRENO. (A) COORDENADAS REALES (X,Y,Z) Y (B) COORDENADAS SOBRE LA IMAGEN (U,V).	18
FIGURA 12. ADQUISICIÓN DE IMÁGENES CON PIV.	19
FIGURA 13. REPRESENTACIÓN DE LA FUNCIÓN BIDIMENSIONAL DE LA INTENSIDAD LUMINOSA. .	20
FIGURA 14. LOS TRES TIPOS DE CONCENTRACIONES DE PARTÍCULAS EN LAS IMÁGENES: (A) BAJA (PTV), (B) MEDIA (PIV), Y (C) ALTA (LSV).....	21
FIGURA 15. (A) IMAGEN DE PARTÍCULAS TOMADA EN EL TIEMPO T_0 , (B) IMAGEN DE PARTÍCULAS TOMADA EN EL TIEMPO T_1 , (C) DESPLAZAMIENTO DE LAS PARTÍCULAS EN EL INTERVALO T_0-T_1	22
FIGURA 16. IMAGEN DE PARTÍCULAS DE PIV CON LA AMPLIFICACIÓN DE UNA PARTE DE LA IMAGEN.	23
FIGURA 17. DOS IMÁGENES DE PIV DIVIDIDAS EN ZONAS DE INTERROGACIÓN.	24
FIGURA 18. CORRELACIÓN DE DOS ZONAS DE INTERROGACIÓN.	26
FIGURA 19. (A) Y (B) IMÁGENES DE PARTÍCULAS, (C) Y (D) PLANO DE CORRELACIÓN CRUZADA..	27
FIGURA 20. (A) (B) IMÁGENES DE PARTÍCULAS 512 POR 512 PÍXELES, (C) MAPA DE VECTORES CON ZONAS DE 256 POR 256 PÍXELES (D) MAPA DE VECTORES CON ZONAS DE 32 POR 32 PÍXELES.	28
FIGURA 21. (A) IMAGEN DE PARTÍCULAS TOMADA EN EL TIEMPO T_0 , (B) IMAGEN DE PARTÍCULAS TOMADA EN EL TIEMPO T_1	29
FIGURA 22. MAPA DE VECTORES CON ZONAS DE (A) 128 X 128 PÍXELES (B) 64 X 64 PÍXELES.....	30

FIGURA 23. MAPA DE VECTORES CON ZONAS DE (A) 32 X 32 PÍXELES (B) 16 X 16 PÍXELES.	30
FIGURA 24. MAPA DE VECTORES CON ZONAS DE (A) 8 X 8 PÍXELES (B) 4 X 4 PÍXELES.	31
FIGURA 25. (A) INGRESO MANUAL DE LOS PUNTOS DE REFERENCIA EN LA IMAGEN A ORTORECTIFICAR, (B) ASIGNACIÓN DE VALORES DE LOS GRPS DENTRO DE LA IMAGEN.	35
FIGURA 26. VENTANA GRÁFICA DE MAT_LSPIV PARA INGRESAR LOS VALORES DE PARAMETRIZACIÓN PARA ORTORECTIFICAR LAS IMÁGENES.	36
FIGURA 27. (A) IMAGEN CON UNA RESOLUCIÓN DE 0.1 QUE EQUIVALE A DIMENSIONES DE PÍXEL DE 1DM ² , (B) IMAGEN CON UNA RESOLUCIÓN DE 0.01 QUE EQUIVALE A DIMENSIONES DE PÍXEL DE 1CM ² , (C) IMAGEN CON UNA RESOLUCIÓN DE 0.001 QUE EQUIVALE A DIMENSIONES DE PÍXEL DE 1MM ² , (D) IMAGEN CON UNA RESOLUCIÓN DE 0.0005 QUE EQUIVALE A DIMENSIONES DE PÍXEL DE 0.5MM ²	37
FIGURA 28. VENTANA GRÁFICA DE MAT_LSPIV PARA INGRESAR LOS VALORES DE PARAMETRIZACIÓN PARA PIV.	39
FIGURA 29. VENTANA GRÁFICA DE MAT_LSPIV PARA DEFINIR LA MALLA COMPUTACIONAL PARA PIV.	40
FIGURA 30. MALLA COMPUTACIONAL DE 10 X10.	41
FIGURA 31. MALLA COMPUTACIONAL DE 25 X 25.	41
FIGURA 32. MALLA COMPUTACIONAL DE 50 X 50.	42
FIGURA 33. FORMA DE PROCESAR LAS IMÁGENES.	42
FIGURA 34. INTERFAZ GRÁFICA PARA INTRODUCIR UMBRAL EN EL MÍNIMO Y EL MÁXIMO DE LA INTENSIDAD DE LA VELOCIDAD.	43
FIGURA 35. CAMPO DE VELOCIDADES PROMEDIO OBTENIDOS DEL POS-PROCESAMIENTO CON MAT_LSPIV.	44
FIGURA 36. MAPA DE CONTORNOS DE INTENSIDAD DE LAS VELOCIDADES OBTENIDOS DEL POS- PROCESAMIENTO CON MAT_LSPIV.	44
FIGURA 37. LÍNEAS DE CORRIENTE OBTENIDAS DEL POS-PROCESAMIENTO CON MAT_LSPIV.	45
FIGURA 38. CAMPO DE VORTICIDAD OBTENIDOS DEL POS-PROCESAMIENTO CON MAT_LSPIV.	45
FIGURA 39. VELOCIDADES A LO LARGO DE UNA SECCIÓN TRANSVERSAL OBTENIDOS DEL POS- PROCESAMIENTO CON MAT_LSPIV.	46
FIGURA 40. VIDEOGRABACIÓN DE IMÁGENES A UN ÁNGULO DE 60°.	47
FIGURA 41. LA IMAGEN DE LA IZQUIERDA ES LA IMAGEN SIN PROCESAR CAPTURADA DESDE UN ÁNGULO DE 60° Y LA DERECHA ES LA IMAGEN YA CORREGIDA MOSTRANDO UNA ORTORECTIFICACIÓN ACEPTABLE.	48
FIGURA 42. IMÁGENES DISEÑADAS EN AUTOCAD PARA SIMULAR UN FLUJO HIPOTÉTICO.	49
FIGURA 43. VECTORES DE VELOCIDAD RESULTANTES DEL PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES SINTÉTICAS PARA LA VALIDACIÓN DE MAT_LSPIV.	49
FIGURA 44. MAPA DE VELOCIDADES RESULTANTES DEL PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES SINTÉTICAS PARA LA VALIDACIÓN DE MAT_LSPIV.	50
FIGURA 45. PERFIL DE VELOCIDADES RESULTANTES DEL PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES SINTÉTICAS PARA LA VALIDACIÓN DE MAT_LSPIV.	50
FIGURA 46. VECTORES INTERPOLADOS DEL PERFIL DE VELOCIDADES RESULTANTES DEL PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES SINTÉTICAS PARA LA VALIDACIÓN DE MAT_LSPIV.	51
FIGURA 47. VECTORES INTERPOLADOS DEL PERFIL DE VELOCIDADES CON ETIQUETAS, LOS EJES X E Y ESTÁN EN METROS, U EN M/S Y V EN GRADOS.	51

FIGURA 48. UBICACIÓN GENERAL DEL SITIO DISPUESTO PARA LA TOMA DE DATOS. PARQUE NATURAL “LAS ISABELES”, ESTADO DE MORELOS. (IMAGEN TOMADA DE GOOGLE EARTH, ENERO DEL 2012).	54
FIGURA 49. VIDEOCÁMARA SONY HDR-CX110, UTILIZADA PARA LA APLICACIÓN DE LSPIV EN CAMPO.	56
FIGURA 50. HOJAS DE ÁRBOL SECAS UTILIZADAS COMO TRAZADORES EN EL CANAL.	56
FIGURA 51. IMAGEN INSTANTÁNEA DEL ÁREA DE ESTUDIO Y PUNTOS DE CONTROL MARCADOS PARA EL CÁLCULO DE LA GEOMETRÍA Y RECTIFICACIÓN DE LA IMAGEN	57
FIGURA 52. MODELO DE LA PRESA “VELADERO DE CAMOTLÁN” UBICADO DENTRO DE LAS INSTALACIONES DEL IMTALAB.	59
FIGURA 53. ESQUEMA EN PLANTA DEL MODELO DE LA PRESA “VELADERO DE CAMOTLÁN”.	59
FIGURA 54. A) FONDO DEL CANAL ANTES DE COLOCAR EL LECHO DE TIERRA; B) FONDO DE CANAL CON LECHO DE TIERRA CON EL FIN DE UNIFORMIZAR LA FORMA DEL MISMO.	60
FIGURA 55. DIRECCIONADORES DE FLUJO A LA ENTRADA DEL CANAL DE AFORO.	61
FIGURA 56. MONTAJE DEL SISTEMA DE TOMA DE DATOS. (A) Y (C) CORRENTÓMETRO ELECTROMAGNÉTICO FLO-MATE. (B) Y (D) TRÍPODE Y UBICACIÓN DE LA CÁMARA Y EQUIPO DE COMPUTO DE CAPTURA, ASÍ COMO LA LÁMPARA DE LUZ HALÓGENA.	62
FIGURA 57. IMÁGENES DE TRAZADORES UTILIZADOS EN LA TÉCNICA DE LSPIV. (A) ESFERAS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO, (B) BIO-BOLAS, (C) CONFETI DE PAPEL Y (D) CARTÓN.	63
FIGURA 58. PUNTOS DE CONTROL CONSIDERADOS PARA EL PROCESO DE ORTORECTIFICACIÓN DE LAS IMÁGENES.	64
FIGURA 59. IMAGEN INSTANTÁNEA (A) Y SU CORRESPONDIENTE IMAGEN ORTO RECTIFICADA (B) OBTENIDA DURANTE EL EXPERIMENTO UTILIZANDO CONFETI COMO TRAZADOR.	65
FIGURA 60. VECTORES DE VELOCIDADES OBTENIDAS CON MAT_LSPIV DEL CANAL EN ESTUDIO.	67
FIGURA 61. MAPA DE VELOCIDADES OBTENIDAS CON MAT_LSPIV DEL CANAL EN ESTUDIO.	67
FIGURA 62. MAPA DE VELOCIDADES CON VECTORES OBTENIDAS CON MAT_LSPIV.	68
FIGURA 63. SECCIÓN TRANSVERSAL DEL PERFIL DE VELOCIDADES OBTENIDAS CON MAT_LSPIV.	68
FIGURA 64. PERFIL DE VELOCIDADES OBTENIDAS CON MAT_LSPIV DEL CANAL EN ESTUDIO.	69
FIGURA 65. LÍNEAS DE CORRIENTE OBTENIDAS CON MAT_LSPIV DEL CANAL EN ESTUDIO.	69
FIGURA 66. PERFIL DE VELOCIDADES EN LA EN EL EJE $x = -0.5$ EXTRAÍDO DE LOS RESULTADOS EN BLOCK DE NOTAS DEL PROCESAMIENTO CON MAT_LSPIV DEL CANAL EN ESTUDIO.	71
FIGURA 67. PERFIL DE VELOCIDADES EN LA EN EL EJE $x = 0.0$ EXTRAÍDO DE LOS RESULTADOS EN BLOCK DE NOTAS DEL PROCESAMIENTO CON MAT_LSPIV DEL CANAL EN ESTUDIO.	71
FIGURA 68. PERFIL DE VELOCIDADES EN LA EN EL EJE $x = 0.5$ EXTRAÍDO DE LOS RESULTADOS EN BLOCK DE NOTAS DEL PROCESAMIENTO CON MAT_LSPIV DEL CANAL EN ESTUDIO.	72
FIGURA 69. PERFIL DE VELOCIDADES EN LA EN EL EJE $x = 1.0$ EXTRAÍDO DE LOS RESULTADOS EN BLOCK DE NOTAS DEL PROCESAMIENTO CON MAT_LSPIV DEL CANAL EN ESTUDIO.	72
FIGURA 70. PERFILES DE VELOCIDADES EXTRAÍDO DE LOS RESULTADOS EN BLOCK DE NOTAS DEL PROCESAMIENTO CON MAT_LSPIV DEL CANAL EN ESTUDIO.	73
FIGURA 71. PERFILES DE VELOCIDADES OBTENIDOS A PARTIR DE 5 VELOCÍMETROS EN LA SECCIÓN $x = -0.5$ DEL CANAL EN ESTUDIO.	74

FIGURA 72. GRAFICA DE LAS VELOCIDADES PROMEDIO Y MEDIANA ENTRE LOS 5 VELOCÍMETROS PUNTUALES.	76
FIGURA 73. PERFILES DE VELOCIDADES OBTENIDOS CON MAT_LSPIV Y DEL PROMEDIO DE VELOCIDADES OBTENIDAS CON LOS VELOCÍMETROS PUNTUALES EN LA SECCIÓN DEL CANAL EN ESTUDIO.	76
FIGURA 74. IMAGEN DEL CANAL SIN MODIFICACIONES PARA SER PROCESADA EN LA CUAL SE OBSERVAN REFLEJOS ESTÁTICOS SOBRE LA SUPERFICIE.	78
FIGURA 75. VECTORES DE VELOCIDAD OBTENIDOS DEL PROCESAMIENTO CON MAT_LSPIV DEL CANAL SIN MODIFICACIONES	78
FIGURA 76. CAMPOS DE VELOCIDAD OBTENIDOS DEL PROCESAMIENTO CON MAT_LSPIV DEL CANAL SIN MODIFICACIONES	79
FIGURA 77. LÍNEAS DE FLUJO OBTENIDAS DEL PROCESAMIENTO CON MAT_LSPIV DEL CANAL SIN MODIFICACIONES.....	79
FIGURA 78. PERFIL TRANSVERSAL DE VELOCIDADES OBTENIDO DEL PROCESAMIENTO CON MAT_LSPIV CANAL SIN MODIFICACIONES.	80
FIGURA 79. VECTORES DEL PERFIL TRANSVERSAL DE VELOCIDADES OBTENIDAS DEL PROCESAMIENTO CON MAT_LSPIV DEL CANAL SIN MODIFICACIONES	80
FIGURA 80. VECTORES DE VELOCIDAD OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS CON PARTÍCULAS DE CARTÓN UTILIZADAS COMO TRAZADORES ARTIFICIALES EN EL MODELO HIDRÁULICO DEL IMTALAB.	81
FIGURA 81. CAMPO DE VELOCIDAD OBTENIDO DE LAS PRUEBAS CON PARTÍCULAS DE CARTÓN UTILIZADAS COMO TRAZADORES ARTIFICIALES EN EL MODELO HIDRÁULICO DEL IMTALAB.	82
FIGURA 82. LÍNEAS DE FLUJO OBTENIDAS DE LAS PRUEBAS CON PARTÍCULAS DE CARTÓN UTILIZADAS COMO TRAZADORES ARTIFICIALES EN EL MODELO HIDRÁULICO DEL IMTALAB.	82
FIGURA 83. PERFIL TRANSVERSAL DE VELOCIDADES OBTENIDO DE LAS PRUEBAS CON PARTÍCULAS DE CARTÓN UTILIZADAS COMO TRAZADORES ARTIFICIALES EN EL MODELO HIDRÁULICO DEL IMTALAB.	83
FIGURA 84. PERFIL TRANSVERSAL DE VELOCIDADES OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS CON PARTÍCULAS DE CARTÓN UTILIZADAS COMO TRAZADORES ARTIFICIALES EN EL MODELO HIDRÁULICO DEL IMTALAB.	83
FIGURA 85. VECTORES DE VELOCIDAD OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS CON PARTÍCULAS DE POLIESTIRENO UTILIZADAS COMO TRAZADORES ARTIFICIALES EN EL MODELO HIDRÁULICO DEL IMTALAB.	84
FIGURA 86. CAMPO DE VELOCIDAD OBTENIDO DE LAS PRUEBAS CON PARTÍCULAS DE POLIESTIRENO UTILIZADAS COMO TRAZADORES ARTIFICIALES EN EL MODELO HIDRÁULICO DEL IMTALAB.	85
FIGURA 87. LÍNEAS DE FLUJO OBTENIDAS DE LAS PRUEBAS CON PARTÍCULAS DE POLIESTIRENO UTILIZADAS COMO TRAZADORES ARTIFICIALES EN EL MODELO HIDRÁULICO DEL IMTALAB.	85
FIGURA 88. PERFIL TRANSVERSAL DE VELOCIDADES OBTENIDO DE LAS PRUEBAS CON PARTÍCULAS DE POLIESTIRENO UTILIZADAS COMO TRAZADORES ARTIFICIALES EN EL MODELO HIDRÁULICO DEL IMTALAB.	86

FIGURA 89. PERFIL TRANSVERSAL DE VELOCIDADES OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS CON PARTÍCULAS DE POLIESTIRENO UTILIZADAS COMO TRAZADORES ARTIFICIALES EN EL MODELO HIDRÁULICO DEL IMTALAB.	86
FIGURA 90. VECTORES DE VELOCIDAD OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS CON BIOBOLAS UTILIZADAS COMO TRAZADORES ARTIFICIALES EN EL MODELO HIDRÁULICO DEL IMTALAB.	88
FIGURA 91. CAMPO DE VELOCIDAD OBTENIDO DE LAS PRUEBAS CON BIOBOLAS UTILIZADAS COMO TRAZADORES ARTIFICIALES EN EL MODELO HIDRÁULICO DEL IMTALAB.	88
FIGURA 92. LÍNEAS DE FLUJO OBTENIDOS DE DE LAS PRUEBAS CON BIOBOLAS UTILIZADAS COMO TRAZADORES ARTIFICIALES EN EL MODELO HIDRÁULICO DEL IMTALAB.	89
FIGURA 93. PERFIL TRANSVERSAL DE VELOCIDADES OBTENIDO DE LAS PRUEBAS CON BIOBOLAS UTILIZADAS COMO TRAZADORES ARTIFICIALES EN EL MODELO HIDRÁULICO DEL IMTALAB.	89
FIGURA 94. PERFIL TRANSVERSAL DE VELOCIDADES OBTENIDO DE LAS PRUEBAS CON BIOBOLAS UTILIZADAS COMO TRAZADORES ARTIFICIALES EN EL MODELO HIDRÁULICO DEL IMTALAB.	90
FIGURA 95. VECTORES DE VELOCIDAD OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS CON CONFETI DE PAPEL UTILIZADO COMO TRAZADORES ARTIFICIALES EN EL MODELO HIDRÁULICO DEL IMTALAB.	91
FIGURA 96. CAMPO DE VELOCIDAD OBTENIDO DE LAS PRUEBAS CON CONFETI DE PAPEL UTILIZADO COMO TRAZADORES ARTIFICIALES EN EL MODELO HIDRÁULICO DEL IMTALAB.	92
FIGURA 97. LÍNEAS DE FLUJO OBTENIDAS DE LAS PRUEBAS CON CONFETI DE PAPEL UTILIZADO COMO TRAZADORES ARTIFICIALES EN EL MODELO HIDRÁULICO DEL IMTALAB.	92
FIGURA 98. PERFIL TRANSVERSAL DE VELOCIDADES OBTENIDO DE LAS PRUEBAS CON CONFETI DE PAPEL UTILIZADO COMO TRAZADORES ARTIFICIALES EN EL MODELO HIDRÁULICO DEL IMTALAB.	93
FIGURA 99. PERFIL TRANSVERSAL DE VELOCIDADES OBTENIDO DE LAS PRUEBAS CON CONFETI DE PAPEL UTILIZADO COMO TRAZADORES ARTIFICIALES EN EL MODELO HIDRÁULICO DEL IMTALAB.	93
FIGURA 100. GRAFICA DE COMPARACIÓN DE VECTORES ERRÓNEOS QUE RESULTARON DE LA APLICACIÓN DE LSPIV EN LAS PRUEBAS DE LOS 4 DISTINTOS TRAZADORES.	94
FIGURA 101. PERFILES TRANSVERSALES OBTENIDOS DEL POS-PROCESAMIENTO CON MAT_ LSPIV EN LAS PRUEBAS DE LOS 4 DISTINTOS TRAZADORES.	95

LISTADO DE TABLAS

TABLA I. MEDICIONES DE VELOCIDAD EN M/S CON 5 VELOCÍMETRO EN LA SECCIÓN ESTUDIADA DEL CANAL “LAS ESTACAS” (ESTADO DE MORELOS).....	55
TABLA II. PUNTOS DE CONTROL (GRP’S) Y SUS COORDENADAS EN LA IMAGEN (I, J) Y SUS CORRESPONDIENTES VALORES DE (X, Y) MEDIDAS EN EL TERRENO.....	57
TABLA III. PUNTOS DE CONTROL Y SUS COORDENADAS EN LA IMAGEN (I, J) Y SUS CORRESPONDIENTES VALORES DE (X, Y) MEDIDAS EN EL MODELO DE LABORATORIO.	64
TABLA IV. DATOS DE VELOCIDADES PARA PERFILES.	70
TABLA V. DATOS DE VELOCIDADES DE LOS 5 VELOCÍMETROS PUNTUALES.	73
TABLA VI. DATOS DE VELOCIDADES PROMEDIO, MEDIANA Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LOS 5 VELOCÍMETROS PUNTUALES.	75

RESUMEN

La Velocimetría por Imágenes de Partículas es una técnica de medición óptica no intrusiva que, a través del procesamiento de imágenes, logra obtener de manera indirecta campos bidimensionales de velocidad de flujo, con base en la medición de la velocidad de partículas o diversos elementos conocidos como trazadores del flujo. Estos trazadores pueden ser partículas sólidas, burbujas o patrones impulsados por turbulencias producidas en el fluido. La técnica PIV se ha empleado tradicionalmente en laboratorio con experimentos muy controlados. Sin embargo, desde hace algunos años su aplicación se ha llevado a campo, recibiendo el nombre de Velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escala (LSPIV), con la cual ha sido posible obtener velocidades de referencia en la superficie de un río y en modelos físicos a escala en laboratorios.

El presente trabajo está dedicado al diseño y puesta en operación de un sistema de LSPIV con la finalidad de evaluar la técnica, así como hacer propuestas sobre nuevos trazadores y tratar de resolver algunas limitantes que en este contexto han planteado diversos investigadores. El sistema de LSPIV se implementó para determinar las velocidades superficiales del flujo en canales y modelos hidráulicos y para su aplicación se consideraron cinco componentes: Visualización del flujo (trazadores), iluminación, grabación, ortorectificación y procesamiento de las imágenes.

Para la siembra se probaron diferentes tipos de trazadores y técnicas, siendo los más eficientes el confeti de papel y las biobolas ; la iluminación se realizó con luz natural en campo y lámparas de halógeno en laboratorio; para la captura de imágenes se utilizó una cámara de video semi-profesional, mientras que la ortorectificación y el procesamiento se realizaron con el programa MAT_LSPIV, el cual fue implementado en Matlab por el Instituto de Ingeniería Hidráulica de Iowa y cuenta con una interfaz grafica para facilitar su uso. Para la obtención de las velocidades se aplicó una correlación cruzada estándar.

Una vez puesto en operación se logró medir la velocidad superficial en un canal ubicado en el parque ecológico Santa Isabel, en el estado de Morelos, y velocidades superficiales en un modelo de laboratorio del IMTALAB, utilizando cuatro trazadores diferentes y luz artificial

producida con lámparas de halógeno. Los avances obtenidos en la realización de este proyecto de investigación abren las puertas a nuevas investigaciones en este campo con el fin de obtener valiosos datos de velocidad en ríos con los cuales pueda conocerse el gasto de avenidas, o en situaciones donde no es posible la instalación de equipos medidores.

ABSTRACT

Particle Image Velocimetry (PIV) is a non-intrusive optic measuring technique which obtains, in an indirect way through image processing, the bi-dimensional speed flow based on the speed measure of the particles or different elements known as flow tracers. These tracers can be solid particles, bubbles or patterns driven by fluids turbulence. PIV technique has been used traditionally in labs with highly controlled experiments. However, the application has been performed in the field through several years with the name of LSPIV and it has helped acquiring speed references on river surfaces and physical model scales inside laboratories.

This project is dedicated to the design and operation of a LSPIV system assembled as a means to evaluate the technique and also to propose alternatives and new tracers. Moreover, it has been proposed to try to solve several obstacles that investigators have found out in the context shown. The LSPIV system has been implemented to determine the superficial speed flows and use on hydraulic channels and models using components such as flow visualization (tracers), lighting, recording, orthorectification and image processing.

For the sowing of the lands, several kinds of tracers and techniques were used. Consequently, the most efficient ones were the paper confetti and biobolas ones. The lighting was set to be daylight in the outdoors and halogen lighting inside the laboratories. A semi-professional video camera was used for the image capturing, while the orthorectification and image processing were performed with MAT_LSPIV (such program was performed in Matlab by Iowa's "IIHR" which has a graphic interface to simplify its use). Speed measures were obtained using a standard cross-correlation.

Once in use, the superficial speed was successfully measured in a channel located in Santa Isabel ecological park, Morelos. In addition, some other superficial speeds were measured in an IMTALAB laboratory model using four different tracers and artificial light produced by halogen lamps. The significant results of this project open up new ways of research in the field to acquire valuable speed data in rivers. As a result, this will help us know expenses and some situations where the installation of measurement equipment won't be possible.

CAPÍTULO 1.

Introducción a las Técnicas de Velocimetría por Imágenes de Partículas.

1.1. Antecedentes.

En las últimas tres décadas, una nueva generación de instrumentos basados en el procesamiento digital de imágenes agrupados bajo el nombre de Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV por la siglas en inglés de Particle Image Velocimetry) ha aprovechado los recientes acontecimientos en la óptica, láser, electrónica, video y procesadores para mejorar la forma en que los fluidos y sus características pueden ser estudiados. A través de sistemas de procesamiento de imágenes fotográficas se pueden obtener de forma automática, rápida y precisa, características importantes de los fluidos, como campos bidimensionales o tridimensionales de velocidad que permiten identificar estructuras propias del flujo cuando este se encuentre en movimiento.

Las mediciones de flujo proporcionan información crítica para numerosas aplicaciones de la ingeniería hidráulica en relación con los cuerpos de agua, por ejemplo, la dispersión de contaminantes en ríos y zonas costeras, los problemas asociados con el comportamiento de las cuencas hidrográficas (erosión, sedimentación, inundaciones y la degradación del medio ambiente), y los planes de mitigación de hielo, por mencionar algunos. En la hidráulica, la asignación de velocidades en flujos superficiales es útil para definir el gasto, la influencia de nuevos elementos y estructuras en los componentes de la velocidad, como vertedores, obras de toma, la construcción de obras en ríos, etc.

La Velocimetría por Imágenes de Partículas es una técnica de medición óptica no intrusiva que, a través del procesamiento de imágenes, logra obtener de manera indirecta campos de velocidad de flujo bidimensional usando trazadores de flujo como partículas sólidas, burbujas o patrones impulsados por turbulencias producidas en el fluido.

El principio general de la PIV es iluminar partículas trazadoras en el campo de flujo de interés con un abanico de luz y adquirir dos imágenes del mismo con una separación de

tiempo conocida (Δt). Conociendo el desplazamiento de grupos de partículas, el tiempo entre las dos imágenes consecutivas y el factor de escala S obtenido al momento de realizar la calibración del sistema, es posible obtener campos de velocidades. Para las imágenes expuestas es desplazamiento más probable se determina aplicando métodos estadísticos como la correlación cruzada de las aéreas de interrogación correspondientes a las primeras y segundas imágenes. La localización del pico más alto en el plano de correlación corresponde al desplazamiento más probable del grupo de partículas el área de interrogación. Este proceso es repetido para todas las zonas de interrogación y se construye un mapa con todos los vectores de velocidad calculados. La información puede exportarse a un archivo de Excel para realizar otros cálculos.

En la Figura 1 se muestra un sistema básico de PIV. Se utiliza un láser como fuente de luz, una cámara digital de alta resolución para capturar las imágenes y una computadora para procesar los datos.

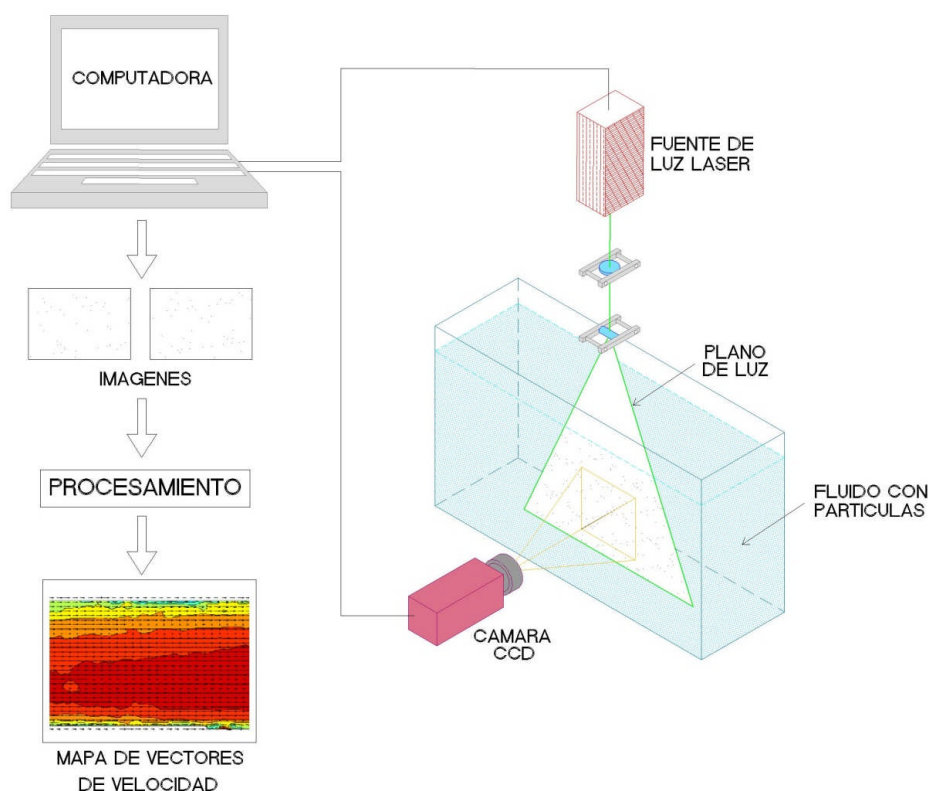


FIGURA 1. Sistema básico de Velocimetría por Imágenes de Partículas.

A continuación se describen brevemente las principales características de la técnica de PIV.

- El proceso es rápido. Determina el campo de velocidades en tiempo real, lo que permite encontrar estructuras en flujos no estacionarios.
- Se pueden determinar dos componentes de velocidad debido a la iluminación por medio de un plano (dos dimensiones).
- PIV es una técnica no invasiva, es decir, no se necesita introducir ningún dispositivo en el fluido. Para medir la velocidad se utilizan pequeñas partículas, pero éstas no perturban el flujo de forma significativa a diferencia de los sensores utilizados en otras técnicas como es el caso de los molinetes.
- La medición de velocidad del flujo se hace de forma indirecta, ya que realmente se calcula la velocidad de las partículas que se encuentran en el flujo.
- La resolución espacial del mapa de vectores de velocidad obtenido con PIV depende principalmente de la concentración de partículas y del tamaño de la imagen. Las imágenes de PIV tienen una concentración de partículas y resolución espacial de resultados media. Debido a que para su procesamiento las imágenes son divididas en zonas de interrogación, la resolución del mapa de vectores es inversamente proporcional al tamaño de las zonas de interrogación. Por lo tanto, para maximizar la resolución espacial de los resultados, es necesario minimizar el tamaño de las zonas de interrogación. Sin embargo, si las zonas son muy pequeñas puede que no se encuentre ninguna partícula y no se podrá determinar la velocidad en esa región.

En la figura 2 se muestra el esquema de procesamiento de la técnica tradicional de PIV la cual se extrajo de la página Web de Dantec Dynamics.

En los inicios de la técnica de PIV, a principios de los ochentas del siglo pasado, las imágenes de fluidos eran tomadas con cámaras analógicas para después ser procesadas y estudiadas de forma manual. Este proceso era muy lento; montar el experimento, tomar un par de fotografías y procesarlas, podía tardar hasta una semana.

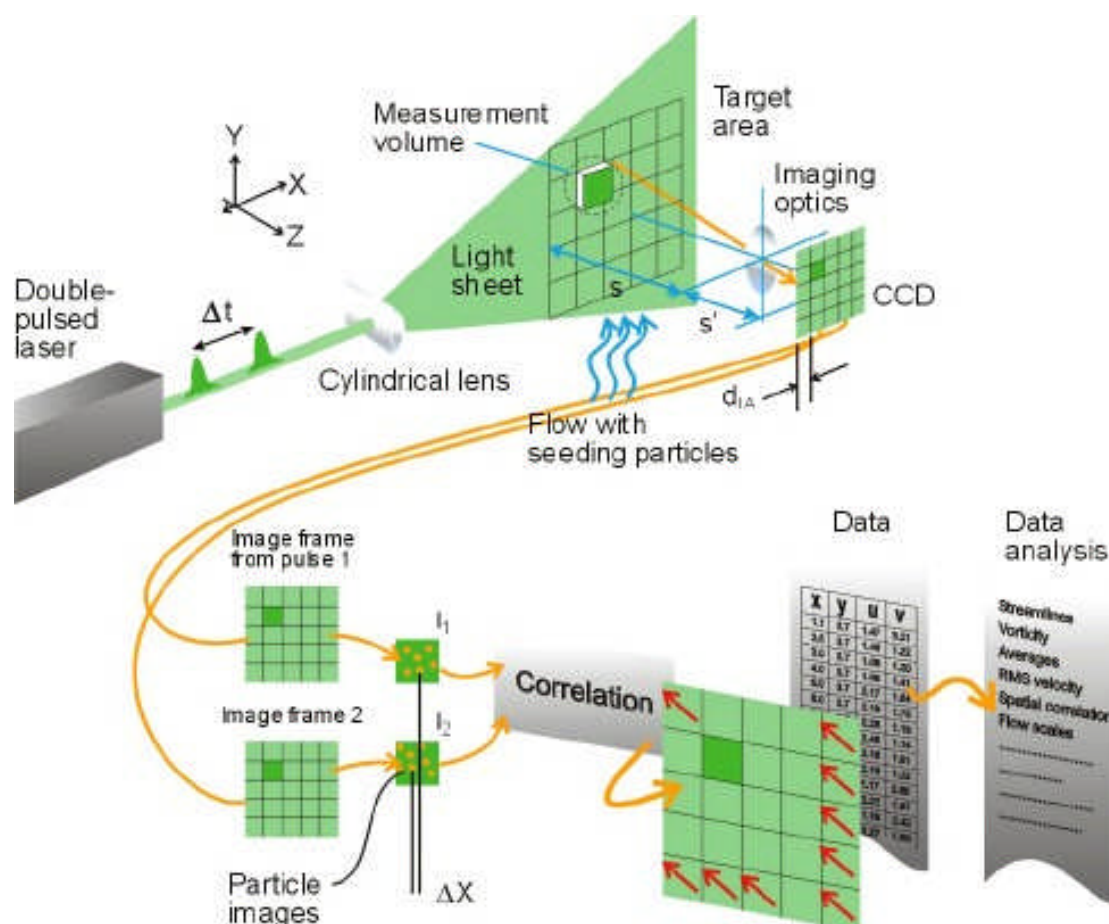


FIGURA 2. Esquema de procesamiento de PIV (Pagina Web Dantec Dynamics).

El principal avance de la técnica de PIV sucedió cuando la toma analógica de datos y las técnicas de evaluación manual se reemplazaron por cámaras digitales y la evaluación realizada por computadora. Este cambio permitió reducir el tiempo de la adquisición de las imágenes y su procesamiento a segundos.

Una de las limitantes de esta técnica es que tanto el fluido como el contenedor del fluido deben ser transparentes.

Adrian (1991) menciona que los velocímetros gráficos de partículas han mejorado sobremanera nuestra capacidad de medir los vectores instantáneos de velocidad en numerosos caudales generados en el entorno controlado de un laboratorio, sin embargo se han realizado modificaciones a esta técnica para ser aplicada en entornos naturales de gran

escala, adoptando el nombre genérico de Velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escala (LSPIV por las siglas en inglés de Large Scale Particle Image Velocimetry).

Algunos de los primeros intentos de investigar las corrientes naturales utilizando un método basado en imágenes (imagen-velocidad) fueron los de Leese et al. (1971) utilizando imágenes de satélite para realizar un seguimiento del movimiento de las nubes en la atmósfera, Collins y Emery (1988) el hielo marino, y Holland et al. (1997) para cuantificar la turbulencia del oleaje en regiones costeras.

Las primeras mediciones de velocimetría gráfica en entornos fluviales fueron realizadas en Japón por Fujita y Komura (1994) y requerían la captura de imágenes de grandes sectores de la superficie del río, motivo por el que esta técnica se bautizó como “Large-Scale Particle Image Velocimetry” (LSPIV) o Velocimetría de Imágenes de Partícula a Gran Escala, seguido por Aya et al., (1995) y nuevamente Fujita et al., (1997).

Desde 1995 y hasta hoy el IIHR- Hydrosience & Engineering (anteriormente el Instituto de Investigaciones Hidráulicas de Iowa) y la Universidad de Kobe han aplicado con éxito la LSPIV en varios experimentos de laboratorio y de campo (Fujita et al. 1998; Muste et al. 1999; Muste et al. 2000; Xiong 2000; Li 2002; Schone 2002, por mencionar algunos).

En la figura 3 se muestra el sistema de LSPIV móvil el cual fue implementado por Kim en el 2008 para un rápido desplazamiento y montaje del sistema en la rivera de un flujo en caso de eventos normales o extremos como avenidas.

En la revisión de la literatura referente a la técnica de LSPIV y su aplicación, se mencionan problemas que enfrenta la técnica, uno de los principales es la necesidad de trazadores visibles en el flujo con el fin de estimar las velocidades (Muste et al., 2004, Creutin et al., 2003, Fujita et al., 2007) y métodos de siembra de trazadores artificiales en flujos de gran escala, así como los problemas referentes a las condiciones de captura de las imágenes, tal es el caso de reflejos estáticos sobre la superficie que producen vectores erróneos.

La Figura 4 (a), (b) muestra dos imágenes de partículas tomadas en tiempos consecutivos es un flujo que circula en un canal abierto.

Al aplicar la técnica de LSPIV a estas imágenes, se obtiene el mapa de vectores de velocidad de la Figura (c); en la Figura (d) se muestra este mismo mapa dibujado sobre la imagen (a). Cada vector representa el movimiento de las partículas dentro de una zona de interrogación y generalmente es dibujado en el centro de cada zona.

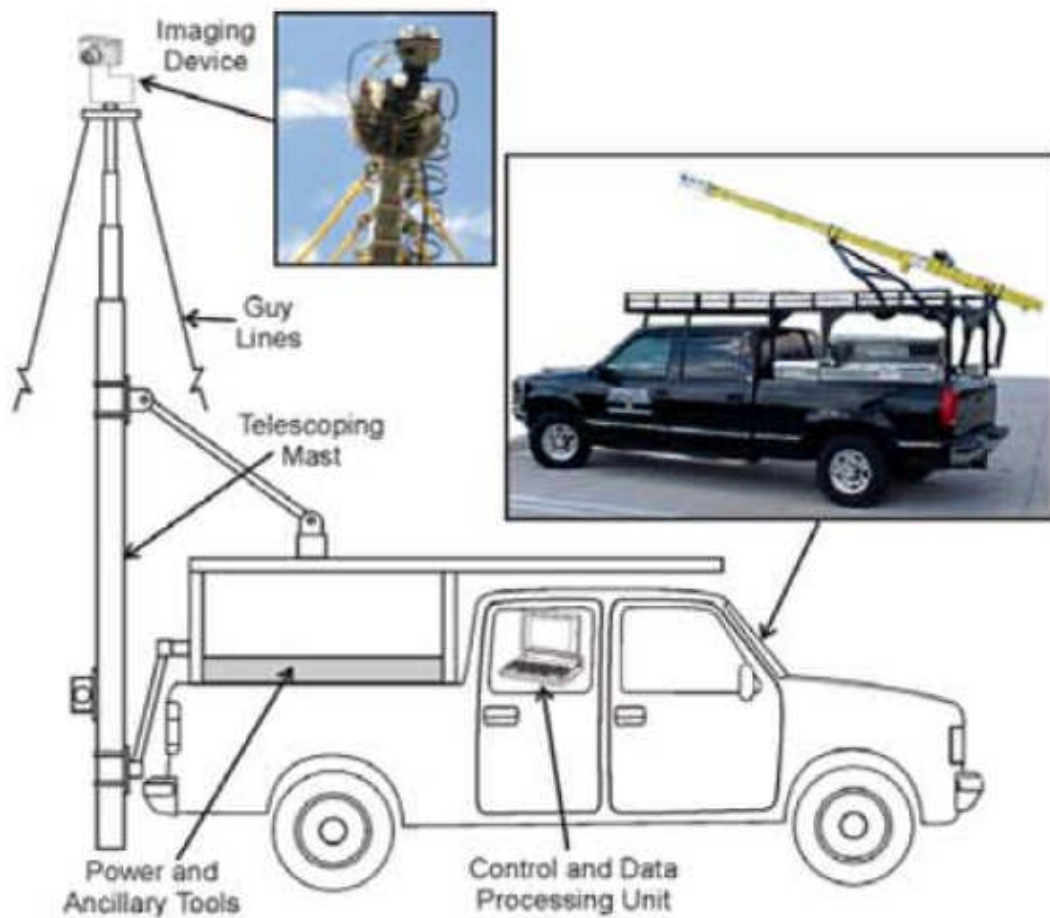


FIGURA 3. (Kim. et. al. 2008) Sistema de LSPIV móvil.

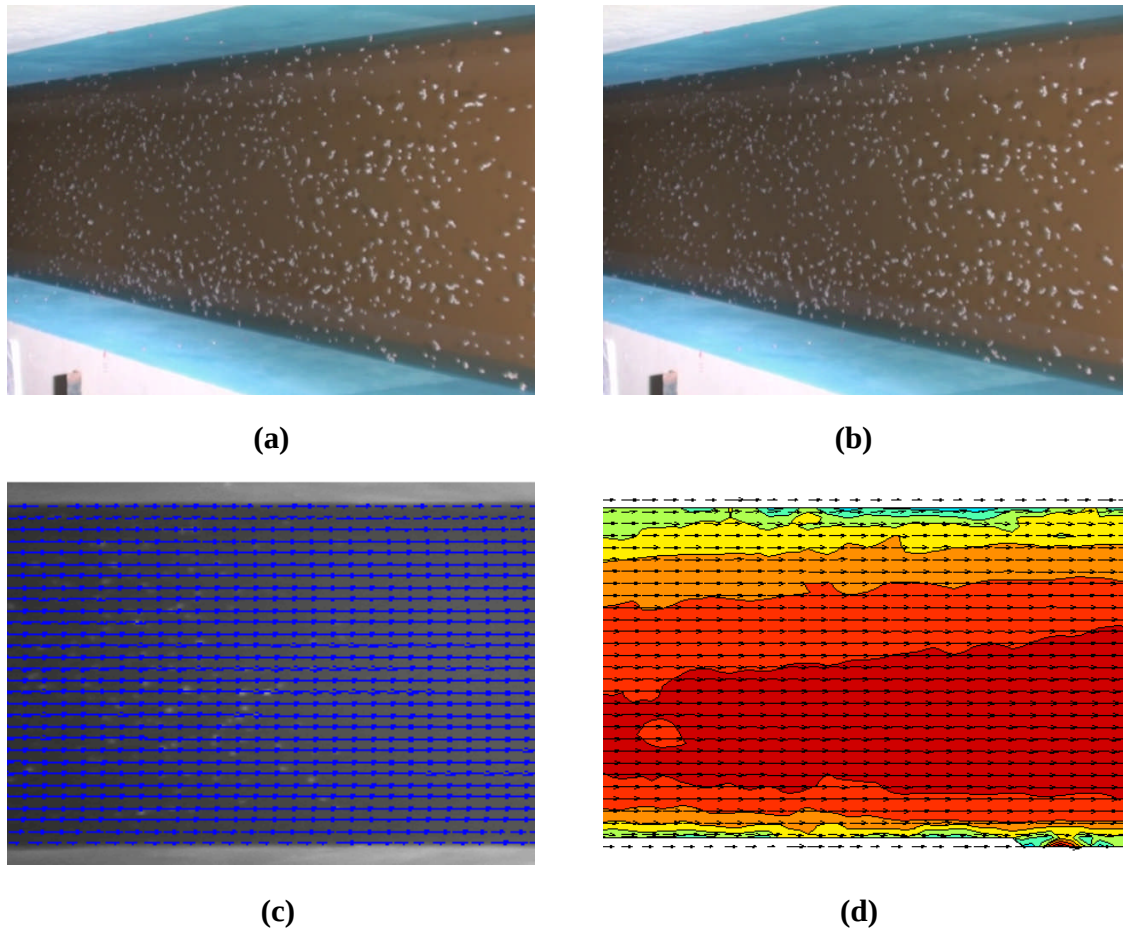


FIGURA 4. (a) (b): Imágenes de partículas en dos tiempos consecutivos, (c) (d): Mapa de vectores de velocidad

La técnica de LSPIV se considera como una técnica emergente, debido a que no se han realizado suficientes estudios que puedan validarla; por lo tanto sigue siendo necesario la investigación y aportaciones en el desarrollo de la misma.

1.2. Planteamiento del problema.

En la actualidad se continúan investigando y proponiendo novedosas técnicas para obtener velocidades superficiales en flujos, así como la dinámica superficial del agua en obras hidráulicas. La actividad de aforar resulta muy importante cuando se requiere conocer el gasto y velocidades de flujo en algunas obras, sin embargo, bajo condiciones adecuadas es

necesario implementar métodos alternativos que no pongan en riesgo los equipos o la vida de las personas. Las mediciones de las velocidades, gastos y dinámica que se obtienen en un flujo son datos cruciales al momento de diseñar obras hidráulicas de conducción, control y de protección.

Una técnica emergente, no intrusiva para obtener velocidades superficiales en flujos de agua a gran escala es la técnica de Velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escala (LSPIV), con la cual es posible medir la distribución de la velocidad en la superficie de un río entero, ser utilizada en modelos a escala en laboratorio o en pequeños ríos.

Para poner en operación esta técnica intervienen infinidad de condiciones y parámetros, como son calibración, adaptación y diseño del sistema, es así que la LSPIV puede dar como resultado una gran cantidad de vectores erróneos, ya que quizá no se cuente con las partículas trazadoras necesarias y suficientes para la aplicación de la técnica. Por otro lado, hay imágenes en las que, debido a una iluminación deficiente durante el experimento, las partículas prácticamente no se ven; o en el caso contrario se presenten refracciones de luz, las cuales producen distorsiones en las imágenes y en este caso la técnica también falla y genera resultados erróneos.

Por lo tanto, es necesario diseñar y poner en operación un sistema de LSPIV con la finalidad de evaluar la técnica, así como proponer soluciones los problemas mencionados y lograr obtener mejores resultados que ayuden a mejorar la técnica.

1.3. Objetivos.

Objetivo General

El objetivo principal de este trabajo es poner en operación la técnica de LSPIV para estimar las velocidades superficiales del agua en canales y modelos hidráulicos de laboratorio. Además, evaluar los alcances y limitaciones de la técnica, así como también la incidencia de la luz sobre la superficie del agua para ser utilizada como trazador.

Objetivos Específicos

Comprender los componentes, funcionamiento, aplicaciones e importancia de la técnica de velocimetría por imágenes de partículas.

Probar nuevos trazadores de flujo que permitan obtener resultados con mínima incertidumbre al momento de aplicar la técnica de LSPIV.

1.4. Solución propuesta.

La solución que se presenta en esta tesis consiste en habilitar un sistema de LSPIV para determinar campos bidimensionales de velocidades superficiales del flujo en canales y modelos hidráulicos de laboratorio. Para determinar los campos vectoriales se requiere de 5 componentes: visualización del flujo (trazadores), iluminación, grabación, ortorectificación y procesamiento de las imágenes.

Para la siembra se probarán diferentes tipos trazadores y técnicas de sembrado con el fin de lograr una óptima dispersión y representación del flujo que ha de ser analizado, los trazadores deberán cumplir con características específicas como lo son la densidad y color. Para la siembra se realizarán pruebas puntuales y generales.

La captura de imágenes presenta uno de los mayores retos, ya que se busca aplicar un sistema de bajo costo, lo cual implica utilizar una cámara de video semi-profesional, considerando que para la técnica de PIV se utilizan cámaras de alta resolución y velocidad con costos muy altos. Como iluminación se utilizará la luz natural y lámparas de halógeno.

Para el pre-procesamiento de las imágenes se aplicará una ortorectificación a las mismas, ya que éstas serán capturadas en un plano inclinado al flujo. En la fase de procesamiento se aplica el algoritmo básico de PIV, basado en correlación cruzada de imágenes. Finalmente en la etapa de post-procesamiento se hace uso de un algoritmo de validación, mapeo de vectores y el cálculo de aforo considerando la velocidad superficial como representación de la velocidad media en un flujo.

El algoritmo fue programado totalmente en Matlab por el Instituto de Ingeniería Hidráulica de Iowa y cuenta con una interfaz gráfica para facilitar su uso. El sistema recibe como entradas pares de imágenes de partículas, el tiempo que transcurrió entre la toma de ellas y la configuración de procesamiento deseada. El resultado es el mapa con los vectores de velocidad del fluido.

1.5. Estructura de la tesis.

En este trabajo se realiza una revisión referente a la Velocimetría por Imágenes de Partículas, y está dedicado al diseño y puesta en operación de un sistema de LSPIV con la finalidad de evaluar la técnica, así como proporcionar soluciones a problemas mencionados por algunos investigadores y lograr obtener mejores resultados que ayuden a mejorarla. Este informe consta de seis capítulos distribuidos según se detalla a continuación.

En el Capítulo 2 se realiza una revisión del estado del arte de la Técnicas de Velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escala (LSPIV), para la medición de velocidades superficiales en canales y modelos de laboratorio. Se presenta además los componentes que se requieren para las técnicas basadas en sistemas de video, las cuales están siendo utilizadas por su facilidad de manejo, bajos costos y la posibilidad de lograr información con una resolución espacio-temporal adecuada para su aplicación en la hidráulica.

En el Capítulo 3 se presentan en detalle la metodología aplicada en esta técnica de LSPIV y el procesamiento de imágenes con el programa de MAT_LSPIV y su validación, así como los elementos teóricos y las ecuaciones fundamentales para abordar la técnica.

En el Capítulo 4 se describen los dispositivos experimentales que serán objeto de estudio en esta tesis, así como los elementos o componentes principales para la puesta en marcha de la técnica de LSPIV. Se describe además la información empleada y los datos medidos para la evaluación y validación de las técnicas propuestas.

En el Capítulo 5 se analizan los resultados obtenidos de las mediciones realizadas en campo al aplicar la técnica de LSPIV en un canal de sección rectangular y en laboratorio al ser

aplicado a un modelo hidráulico. De igual forma se discute sobre los rangos de aplicación de las técnicas propuestas.

Finalmente en el Capítulo 6 se presentan las conclusiones generales de este trabajo y se proponen futuras líneas de investigación.

CAPÍTULO 2

La Técnica de Velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escala (LSPIV).

2.1. Introducción.

La técnica PIV convencional implica 4 componentes: visualización del flujo, iluminación, grabación y procesamiento de las imágenes. Dado que LSPIV cubre grandes áreas obtenidas a través de imágenes oblicuas del flujo en superficie, es necesario un paso adicional: Ortorectificación de la imagen. La secuencia de mediciones de LSPIV se ilustra en la Figura 5.

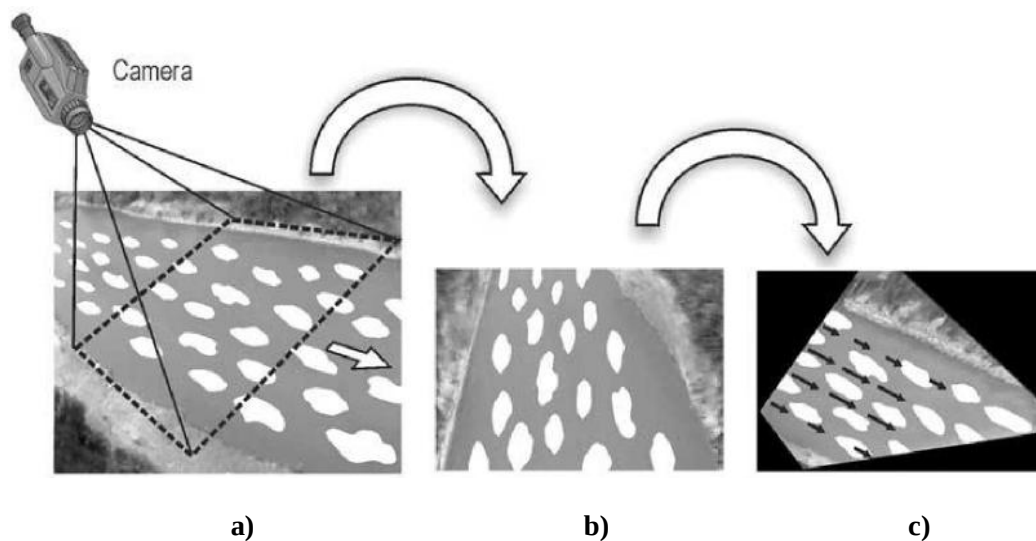


FIGURA 5. (Imagen tomada de Muste 2008): Secuencia de medición con LSPIV del flujo en un canal:
(a) Imagen del área que va a ser medida (los patrones blancos indican los trazadores naturales o artificiales usados para la visualización de la superficie libre), (b) Imagen oblicua distorsionada, (c) Imagen rectificada con los vectores de velocidad superpuestos.

2.2. Partículas trazadoras.

La técnica de LSPIV es utilizada para determinar la velocidad superficial de un fluido en forma indirecta. La velocidad es calculada mediante el procesamiento de imágenes del

fluido con partículas. Las partículas son llamadas “partículas trazadoras” y por sus características, su movimiento será muy parecido al del fluido (forma homogénea y densidad ligeramente menor al del flujo). Por lo tanto la velocidad de una partícula será prácticamente la misma que la velocidad del fluido en cada punto.

Las partículas empleadas en LSPIV deben satisfacer tres condiciones: ser capaces de seguir el movimiento superficial del fluido, reflejar la suficiente luz para ser capturadas adecuadamente por el obturador de la cámara, y ser biodegradables. Lo ideal es encontrar partículas que al ser insertadas en el fluido, sigan el movimiento del fluido de forma exacta, sin modificar el flujo, ni interactuar entre ellas. Sin embargo, es difícil satisfacer estas condiciones y en la práctica se utilizan aquellas que simplemente sigan el flujo sin perturbarlo demasiado y sean biodegradables. Las partículas deben tener una densidad poco menor que la del fluido, para que al insertarlas, éstas permanezcan parcialmente sumergidas en el fluido, si las partículas son demasiado ligeras, éstas flotarán demasiado manteniendo la mayoría de su volumen fuera del fluido interactuando con el aire y la capa límite del fluido. Si las densidades de las partículas son mayores que las del fluido, las partículas se hundirán y no seguirán apropiadamente el movimiento superficial del fluido y en consecuencia, no podrán ser capturadas en las imágenes.

También es necesario que las partículas dispersen de manera óptima la luz, de lo contrario éstas no serían captadas apropiadamente por la cámara. En general la luz dispersada por las partículas está en función de su índice de refracción y del índice del fluido que las rodea, así como del tamaño y forma de las partículas. La luz dispersada también depende del ángulo de observación, el cual generalmente es de 90° con respecto a la luz incidente, por ser una de las posiciones con mayor dispersión de luz.

En la técnica de LSPIV es favorable si las partículas son de diferentes tamaños, esto garantiza que no se repitan patrones en la correlación, y su elección es un compromiso entre los beneficios y desventajas, según el tamaño y cantidad utilizados. Las partículas grandes son las que reflejan mejor la luz. Sin embargo las partículas pequeñas siguen mejor el movimiento del fluido y distorsionan menos el flujo. La cantidad de partículas utilizada también es muy importante. Tener muchas partículas o muy pocas afectará los resultados obtenidos. Si se utilizan muchas partículas, se modifica el flujo y si se utilizan pocas

partículas, no se obtiene suficiente información para calcular la velocidad en todos los puntos del área de estudio. La distribución de las partículas debe ser homogénea, para poder obtener la velocidad en todas las regiones del fluido. La elección del tipo de partículas en cada experimento depende del fluido y del tipo de flujo que se desee estudiar.

Una situación favorable es cuando el flujo superficial puede ser estimado a partir de trazadores naturales visibles en la imagen (por ejemplo desechos, troncos o cortezas, hojas, flores, espuma, resaltos creados en la superficie por la turbulencia, entre otros). Sin embargo, estos trazadores no siempre están disponibles o no pasan la cantidad suficiente con la frecuencia adecuada en flujos naturales, por tanto en muchos casos deben ser agregados de manera artificial a la superficie libre del cauce.

Una alternativa de trazador natural puede ser la reflexión especular formada cuando la incidencia de la luz interactúa con las irregularidades de la superficie libre, de manera que pueda ser usada como un trazador sustituto. Estas deformaciones con longitudes de onda típicas entre 2 y 4 cm, son generadas por viento o por estructuras turbulentas de gran escala que intersectan la superficie libre. Usando la variación de la intensidad de la luz asociada con las deformaciones en la superficie libre, las mediciones de campo pueden ser obtenidas exitosamente usando estos trazadores sustitutos (Creutin et al., 2002; Fujita y Hino, 2003). Cuando ninguna de las condiciones favorables ocurren, es necesario entonces el uso de trazadores artificiales. Algunos factores adversos para el flujo de los trazadores pueden ser fuertes vientos en la superficie o la agregación de partículas de trazadores inducida por electrostática partícula a partícula.

Algunos de los trazadores artificiales utilizados en la técnica de LSPIV se ilustran en la Figura 6.

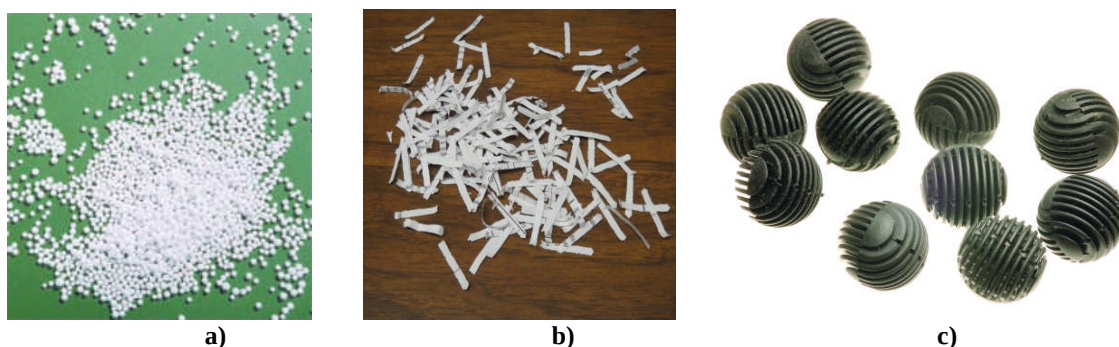


FIGURA 6. Trazadores artificiales utilizados para medición con LSPIV: (a) Esferas de poliestireno, (b) Tiras de papel, (c) Biobolas.

2.3. Fuente de luz.

La técnica de LSPIV utiliza como iluminación la luz natural producida por el Sol, sin embargo puede ser proporcionada por fuentes artificiales cuando se aplica en laboratorio. Las lámparas o reflectores de halógeno pueden ser utilizados en la técnica de LSPIV de laboratorio por su potencia y bajo costo, así como su fácil operación (figura 7). La técnica de LSPIV de campo al ser diseñada para aplicarse en flujos a gran escala como es el caso de ríos o canales, sólo puede utilizar la iluminación natural y por ello enfrenta una de sus grandes desventajas, ya que no puede ser operada de noche, otro de los problemas que enfrenta esta técnica es la refracción de luz inmóvil que se produce en la superficie del flujo, debido a sombras o reflejos, los cuales producen ruido en las imágenes y con ellos zonas con vectores espurios. Una solución para mitigar la refracción sobre la superficie es utilizar lentes especiales en las cámaras de video, tal es el caso de lentes polarizados.



FIGURA 7. Alguno Modelos de lámparas de halógeno utilizadas para la iluminación en la técnica de LSPIV de laboratorio.

2.4. Captura y almacenamiento de imágenes.

Es necesario tener un sistema de captura que permita obtener imágenes del fluido con partículas. Actualmente el medio más utilizado es la cámara digital con CCD (Charge-Coupled Device o Dispositivo Acoplado por Carga por sus siglas en inglés), aunque estas imágenes pueden ser capturadas por otro tipo de cámaras. El CCD está formado por millones de sensores fotosensibles acomodados en una cuadrícula. Cada sensor del CCD representará un píxel en la imagen final. La resolución de una cámara es el número de sensores que tiene el CCD y por lo tanto el número de píxeles de la cual está formada la imagen.

En LSPIV la resolución es muy importante, pues cuando las partículas son muy pequeñas sólo pueden ser capturadas por cámaras de alta resolución. Sin embargo una imagen con mayor resolución ocupa mayor espacio de memoria y también involucra más tiempo de procesamiento. Las cámaras digitales con CCD convencionales necesitan pasar los datos del CCD a memoria y después borrar los valores de los sensores, antes de poder tomar una nueva imagen. Existen cámaras especiales, llamadas de “correlación cruzada”, que son capaces de tomar dos imágenes en el mismo CCD sin tener que borrar ni guardar los datos entre una imagen y otra. En PIV, estas cámaras son útiles para analizar fluidos rápidos, ya que pueden tomar imágenes con una frecuencia muy alta.

En la Figura 8 se muestra dos tipos de cámaras de alta velocidad utilizadas en las técnicas de PIV, una cámara MARLIN del tipo de sensor CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) y una cámara STINGRAY del tipo CCD.



FIGURA 8. (a) Cámara Marlin F131C y (b) Cámara Stingray F-080B/C.

El intervalo de tiempo que debe haber entre cada par de imágenes depende de la velocidad del fluido. Si el fluido es muy rápido y el intervalo entre las imágenes es muy grande, dos imágenes consecutivas no tendrán ninguna partícula en común y será imposible determinar correctamente la velocidad del fluido. Por otro lado, el intervalo de tiempo entre imágenes consecutivas debe ser lo suficientemente largo para que las partículas tengan un desplazamiento.

Existen diferentes formas de registro de imágenes de PIV y éstas pueden dividirse en dos grandes grupos: métodos que generan una sola imagen o los métodos que generan una imagen por cada exposición. Estos grupos son conocidos como: PIV de una imagen con múltiples exposiciones (single frame/multi-exposure PIV) y PIV de múltiples imágenes con una exposición (multi-frame/single exposure PIV) respectivamente. En las siguientes figuras se muestran estos dos tipos de registro. En la Figura 9 se muestra el caso de una imagen con una partícula con diferentes exposiciones. En la Figura (a) el obturador estuvo abierto durante un prolongado intervalo de tiempo, por lo tanto la trayectoria de la partícula se registró formando una línea. En las Figuras (b) y (c) se muestran imágenes sobreexpuestas, donde el obturador estuvo abierto varias veces en cortos periodos de tiempo y sólo se registró la posición de la partícula durante cada una de esas exposiciones. Cada exposición fue realizada en el tiempo $t_k = \Delta t \cdot k$, para $k = 0, 1$ y 2 . Como se puede ver en estas últimas imágenes también es posible ver la trayectoria de la partícula sin embargo el problema es que existe ambigüedad entre la dirección de la trayectoria.

En la Figura 10 se muestran múltiples imágenes con diferentes exposiciones. A diferencia de las imágenes anteriores, en este tipo de registro no se generan imágenes sobreexpuestas. Por cada exposición se genera una imagen y al tener múltiples imágenes se tiene de forma inherente el orden de las imágenes de partículas y su evaluación es más sencilla. En cada imagen se muestra la posición de la partícula durante una exposición. Como referencia se muestra la posición de la partícula en las exposiciones anteriores de cada imagen.

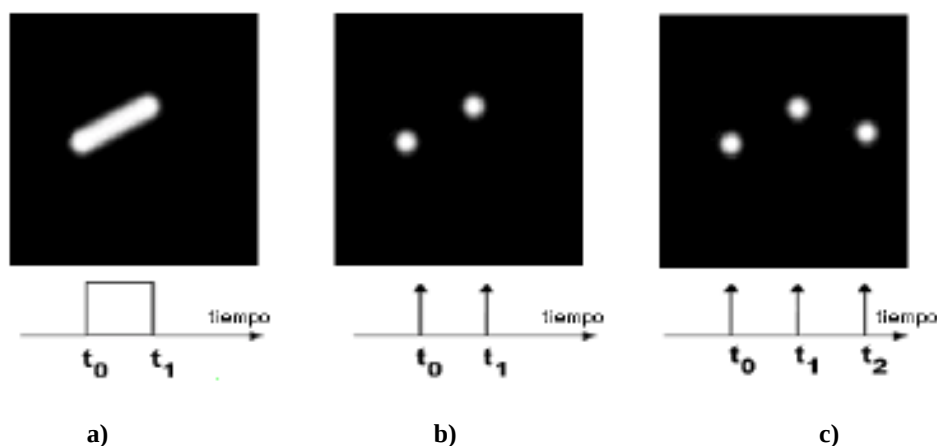


FIGURA 9. (a) Imagen con una exposición, (b) Imagen con doble exposición, (c) Imagen con múltiple exposición.

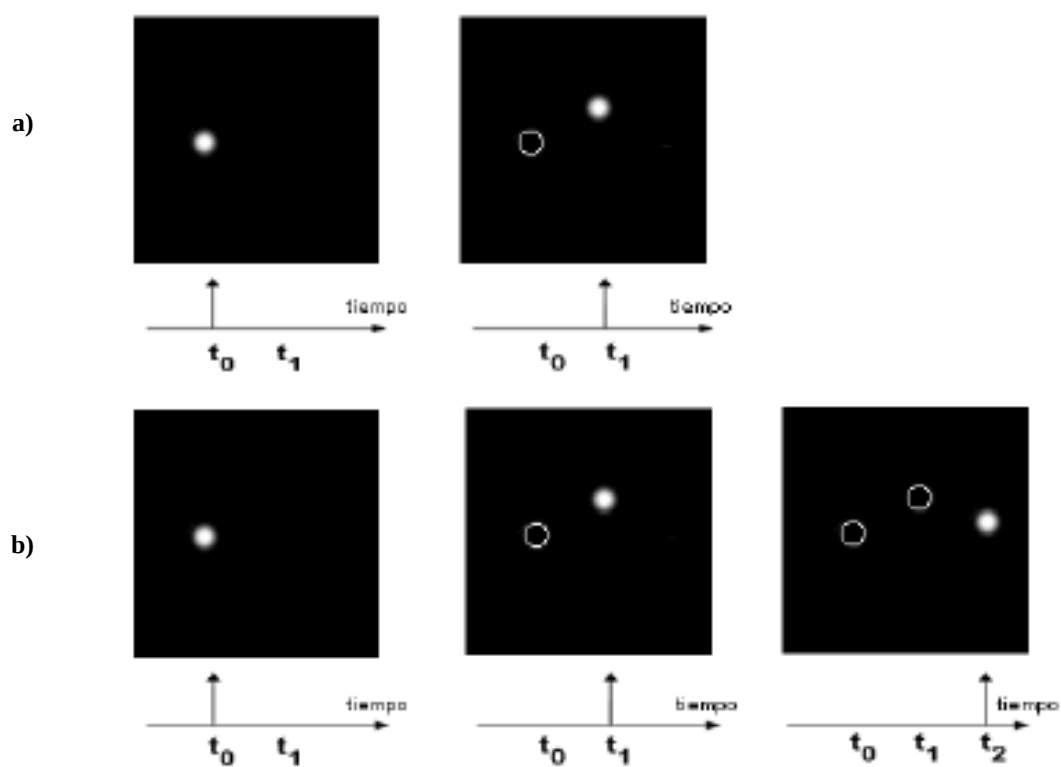


FIGURA 10. (a) Dos imágenes con una exposición, (b) Múltiples imágenes con una exposición.

2.5. Ortorectificación de las imágenes

Las imágenes de las superficies de los ríos son usualmente tomadas desde un puente o la margen de un río usando un ángulo oblicuo en relación con el plano de la superficie del mismo (ver Figura 11a). Con el fin de obtener datos precisos del flujo en movimiento a partir de las imágenes, éstas deben ser rectificadas por un esquema de transformación de la imagen apropiado. Generalmente una relación fotogramétrica convencional se aplica para producir orto-imágenes usando coordenadas conocidas de puntos de control sobre el terreno (GCPs, puntos de referencia en el terreno) en el sistema de coordenadas real (X, Y, Z) y en el sistema de coordenadas de la imagen (u, v), como se muestra en la Figura 11b. La selección de estos puntos de control depende a menudo de lo que es accesible en el campo (por ejemplo, árboles, postes de tendido eléctrico, las esquinas en las construcciones, un techo, una roca fija, etc.).

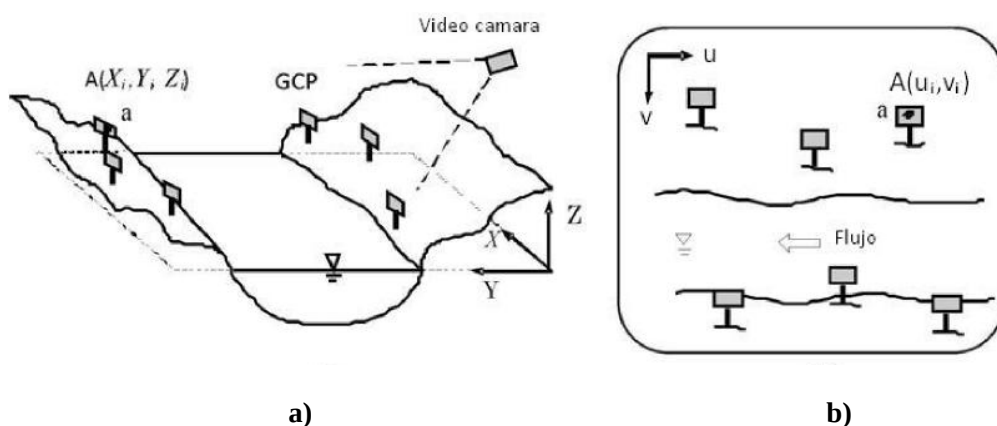


FIGURA 11. (Imagen tomada de Muste 2008): Relación entre la cámara y el sistema coordenado del terreno. (a) Coordenadas reales (X, Y, Z) y (b) Coordenadas sobre la imagen (u, v).

2.6. Evaluación de las imágenes.

Las imágenes empleadas en la técnica tradicional de PIV son capturadas por la cámara digital y son el resultado de la exposición de las partículas iluminadas. Estas imágenes son la representación bidimensional del volumen del fluido iluminado por el plano láser (ver Figura 12). Sin embargo en la técnica de LSPIV son el resultado de la exposición de las

partículas iluminadas que flotan sobre la superficie libre y son la representación bidimensional del flujo superficial.

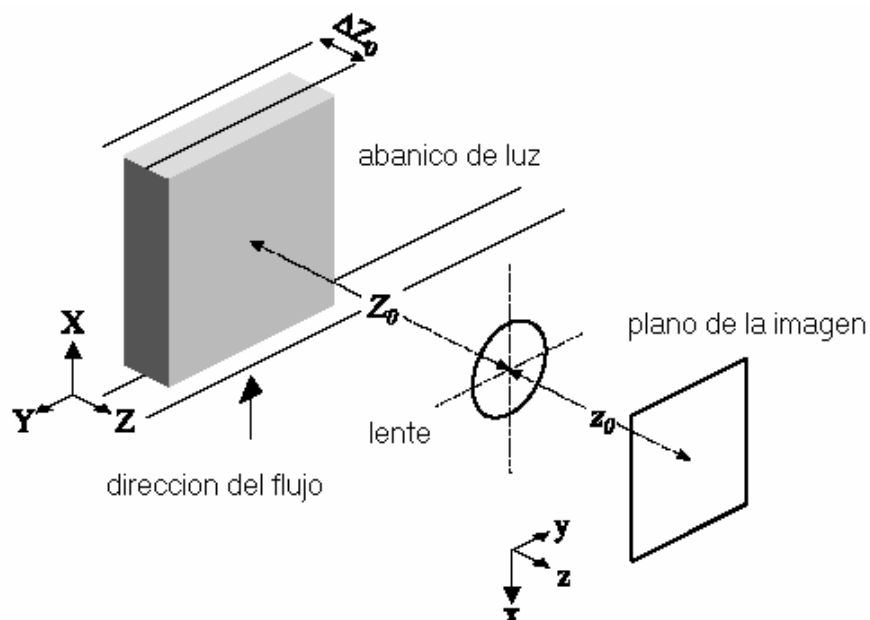


FIGURA 12. Adquisición de imágenes con PIV.

Una imagen es una función bidimensional de intensidad luminosa y se denota por $f(x, y)$, donde el valor de f en las coordenadas (x, y) da la brillantez de la imagen en ese punto. En PIV se utilizan imágenes digitales creadas por una cámara digital y están formadas por un conjunto de valores digitales llamados píxeles. Los píxeles están espaciados uniformemente y son discretos. En la Figura 13 se muestra una matriz que es la representación de una imagen digital $f(x, y)$ de tamaño $N \times M$. Los píxeles son almacenados en la memoria de la computadora en un arreglo bidimensional cuyos índices de fila y columna indican la posición de cada píxel en la imagen. Los valores de este arreglo son enteros positivos y representan la intensidad o nivel de gris de los píxeles de la imagen. La intensidad de una imagen f en las coordenadas (x, y) es el nivel de gris $f(x, y)$. El intervalo de valores que puede tener $f(x, y)$ es $[0, L]$. Donde $f(x, y) = 0$ se considera negro y $f(x, y) = L$ es el blanco en la escala y generalmente es 255. Todos los valores intermedios son tonos de gris que están igualmente espaciados y varían del negro al blanco. El procesamiento de las imágenes de partículas es realizado por una computadora de forma digital. Este procesamiento

consiste en manipular numéricamente las imágenes digitales para mejorarlas, transformarlas y obtener información útil de ellas, como el campo de velocidades del fluido. El algoritmo de la técnica de PIV en su forma más básica consta de una etapa de procesamiento en la cual se determina el campo de velocidades.

$$f(x, y) \approx \begin{pmatrix} f_{(0,0)} & f_{(0,1)} & \dots & f_{(0,M-1)} \\ f_{(1,0)} & f_{(1,1)} & & f_{(1,M-1)} \\ & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{(N-1,0)} & f_{(N-1,1)} & \dots & f_{(N-1,M-1)} \end{pmatrix}$$

FIGURA 13. Representación de la función bidimensional de la intensidad luminosa.

2.7. Procesamiento

Una vez adquiridas y orto-rectificadas las imágenes, éstas son procesadas para determinar la velocidad del fluido. El cálculo de la velocidad de un fluido mediante las técnicas de velocimetría por imágenes de partículas se basa en la relación:

$$\text{Velocidad} = K (\text{Desplazamiento} / \text{Tiempo})$$

Para calcular la velocidad es necesario determinar el desplazamiento que tuvo el fluido en un intervalo de tiempo y conocer el factor de escala K. El intervalo es un dato conocido pues es parte de la configuración inicial del experimento y el factor de escala K es la constante escalar que da la relación entre píxeles en la imagen y unidades de longitud en el experimento. Por lo tanto, solo es necesario determinar el desplazamiento del fluido en el plano x,y, para calcular la velocidad del fluido en estas dos direcciones. Estos desplazamientos se calculan considerando las partículas de un par de imágenes consecutivas. El método de procesamiento depende de la concentración de partículas en la imagen. Se pueden distinguir tres tipos de concentraciones de partículas en imágenes: baja, mediana y alta densidad; como se muestra en la Figura 14, la concentración de las

partículas en la imagen determina el método de análisis y procesamiento que debe ser utilizado para determinar la velocidad.

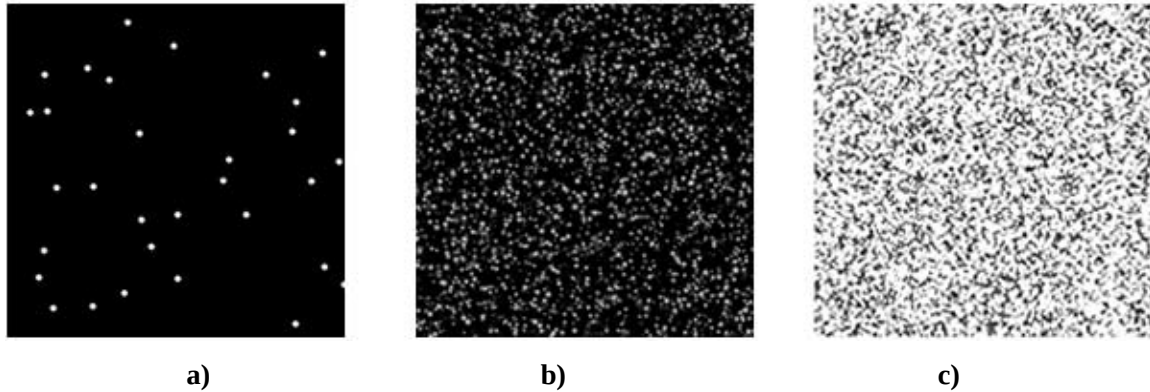


FIGURA 14. Los tres tipos de concentraciones de partículas en las imágenes: (a) Baja (PTV), (b) Media (PIV), y (c) Alta (LSV).

La concentración de partículas es pequeña cuando el promedio de separación entre ellas es considerablemente mayor a su desplazamiento. Por el contrario, la concentración de partículas es alta, cuando el promedio de separación entre las partículas es menor a su desplazamiento.

En el caso de la imagen con baja densidad de partículas, Figura 14 (a), las partículas pueden ser detectadas de forma individual. Para la evaluación de este tipo de imágenes, se requieren métodos de seguimiento de partículas para determinar el desplazamiento individual de cada una. El desplazamiento de una partícula determina la velocidad del fluido en ese punto. Sin embargo, por la baja concentración de partículas, la información de la velocidad solo se puede obtener cuando alguna partícula está presente. Así, pueden existir regiones del flujo donde no se puede obtener una velocidad local. El método para analizar un fluido en movimiento con estas características se llama “Particle Tracking Velocimetry” o “PTV” (Velocimetría por Seguimiento de Partículas por sus siglas en inglés). PTV tiene un porcentaje de error alto en imágenes con distorsiones. Este problema se debe a que las distorsiones por refracción de luz es confundido con partículas durante el procesamiento de la imagen.

Las imágenes con densidad media, Figura 14 (b), tienen partículas que también pueden ser distinguidas de forma individual, sin embargo a simple vista ya no es posible distinguir una misma partícula en las dos imágenes. Este tipo de imágenes son procesadas con la técnica convencional de PIV, la cual hace una evaluación estadística y determina el desplazamiento promedio de pequeños grupos de partículas. Al ser un promedio del desplazamiento la técnica de PIV es más tolerante a las distorsiones en las imágenes que PTV.

En el caso de imágenes de alta concentración, Figura 14(c), son tantas las partículas, que es imposible identificar partículas de forma individual porque éstas están sobrepuestas en la mayoría de los casos y se forman manchas también llamadas “speckles”. El método utilizado para éste caso es llamada “Láser Speckle Velocimetry” o “LSV” (Velocimetría de Manchas por Láser por sus siglas en inglés). LSV hace una aproximación estadística, que revela el desplazamiento de las manchas formadas por partículas. La principal desventaja que tiene este método es que, por la alta densidad de partículas, éstas tienden a afectar la dinámica original del fluido.

La Figura 15 (a) y (b) muestra dos imágenes consecutivas con baja densidad de partículas. Este tipo de imágenes son procesadas para determinar el desplazamiento individual que tuvieron las partículas entre una imagen y otra (PTV). La Figura 15 (c) muestra este desplazamiento. Cada una de estas partículas puede ser vista como una pareja de partículas (una partícula del tiempo t_0 y otra del tiempo t_1).

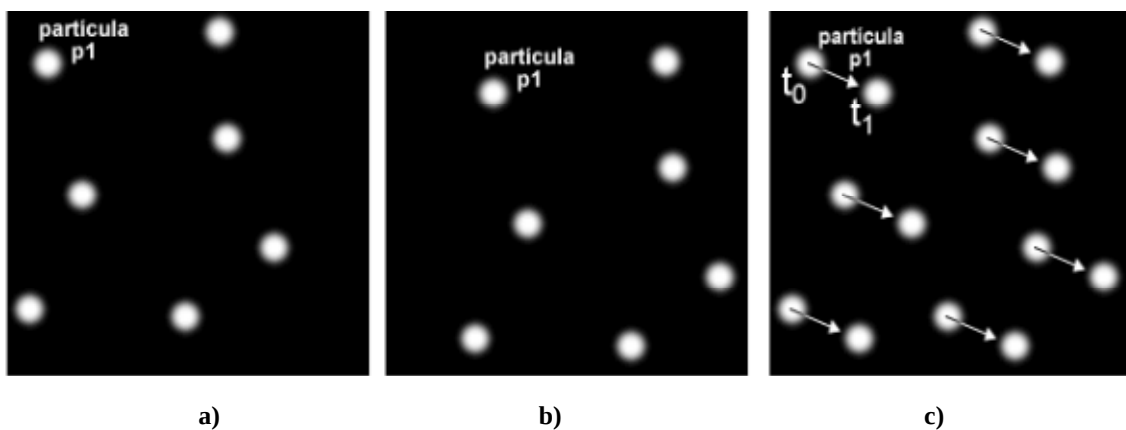


FIGURA 15. (a) Imagen de partículas tomada en el tiempo t_0 , (b) Imagen de partículas tomada en el tiempo t_1 , (c) Desplazamiento de las partículas en el intervalo t_0 - t_1 .

Las imágenes de PIV, Figura 14 (b), tienen una concentración de partículas mayor que las mostradas en la Figura 14(a) y no es posible determinar el desplazamiento individual de las partículas. Por esta razón se utilizan métodos estadísticos para determinar el desplazamiento promedio de pequeños grupos de partículas.

El método de evaluación para PIV más usado con el fin de conocer los desplazamientos más probables de los grupos de partículas es la correlación cruzada de las imágenes. En el procesamiento de imágenes, la correlación cruzada es utilizada para encontrar la posición de mayor semejanza entre dos imágenes. Para la evaluación con correlación cruzada, las imágenes de PIV son divididas en pequeñas áreas rectangulares llamadas “zonas de interrogación”. Una zona de interrogación es una región de una imagen f , es decir es una sub-imagen de f .

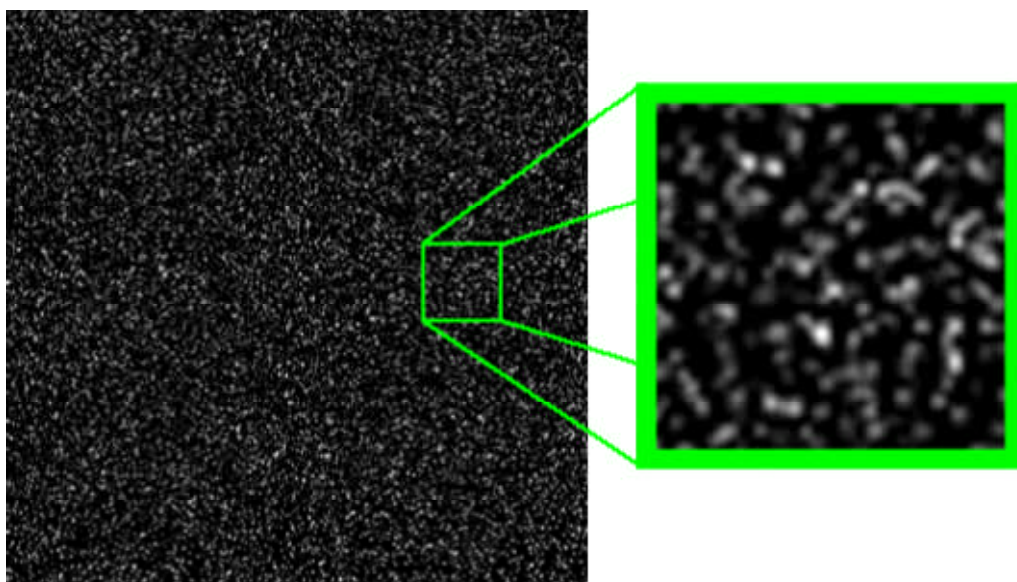


FIGURA 16. Imagen de partículas de PIV con la ampliación de una parte de la imagen.

Se asume que todas las partículas que están dentro de una de estas zonas, se mueven de manera uniforme. El algoritmo consiste en procesar dos zonas de interrogación correspondientes del mismo tamaño y con las mismas coordenadas dentro de la imagen. Una zona es de la primera imagen y la otra de la segunda imagen como se muestra en la Figura 17.

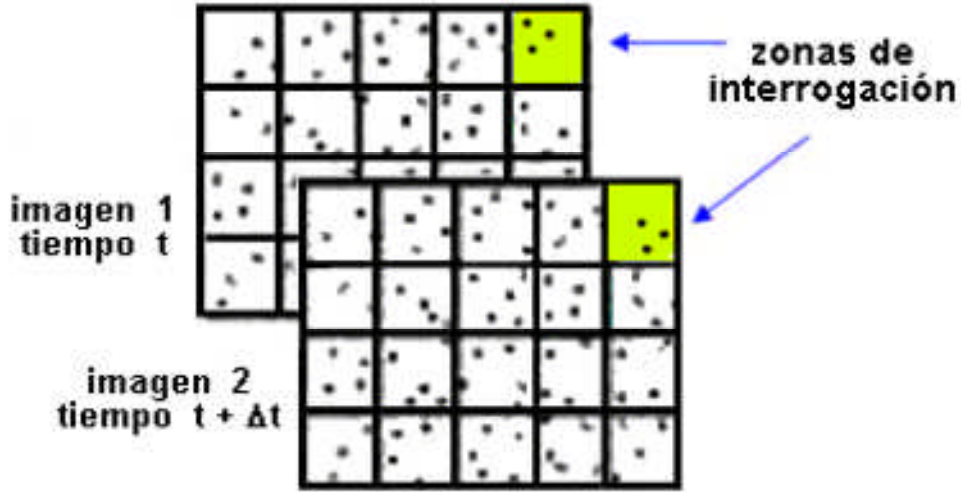


FIGURA 17. Dos imágenes de PIV divididas en zonas de interrogación.

Las zonas de interrogación deben ser procesadas con el fin de encontrar el desplazamiento promedio de las partículas en las imágenes. Existen varias técnicas para procesar estas zonas de interrogación. La más utilizada actualmente consiste en calcular directamente la correlación cruzada de las dos zonas:

$$f(x, y) \cdot g(x, y) = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-N}^N f(i, j) g(i + x, j + y) \quad (2.1)$$

para $x=0, \pm 1, \pm 2 \dots \pm N-1$ $y=0, \pm 1, \pm 2 \dots \pm M-1$, y donde $f(x, y)$ es la sub-imagen correspondiente a la primera zona de interrogación, $g(x, y)$ es la segunda zona, M es el ancho y N la altura en píxeles de la zona de interrogación. El proceso consiste en desplazar una sub-imagen sobre la otra y sumar los productos de los valores en donde haya traslape. Cada valor es guardado en una matriz llamada “matriz o plano de correlación cruzada”, en la posición que represente el desplazamiento de la segunda sub-imagen sobre la primera.

En la Figura 18 se muestra cómo se desplazan las zonas de interrogación. La primera zona es el cuadrado del centro y la segunda zona es el cuadrado gris que se desplaza. Las zonas de interrogación son de 4 por 4 píxeles (M por N) y el desplazamiento hacia la derecha y arriba es positivo. El cuadrado negro es la región en la existe un traslape entre las dos zonas, por ejemplo, en la imagen (b) no existe desplazamiento y el traslape es la imagen completa. La imagen (e) muestra un desplazamiento positivo de 2 en x y uno negativo de 2

en y . La suma del producto de este traslape es guardada en el plano de correlación cruzada en la posición $(2, -2)$. Así se puede ver como se construye este plano que es un arreglo bidimensional con los valores de correlación cruzada y cuyo tamaño es $2M - 1$ por $2N - 1$. Este tamaño es porque aunque los desplazamientos se podrían extender hasta $\pm$ infinito, generalmente en la práctica sólo se consideran los desplazamientos mientras exista traslape.

Hacer la correlación cruzada directa de dos imágenes de esta forma es más complejo computacionalmente y llega a ser limitado en imágenes grandes. El empleo de la Transformada de Fourier es una alternativa para calcular la correlación cruzada con una complejidad inferior. El Teorema de Correlación Cruzada establece una equivalencia entre la función (2.1) y la multiplicación de las transformadas de Fourier de las imágenes. Así, la correlación cruzada puede ser calculada de la siguiente forma:

$$f(x, y) \cdot g(x, y) \Leftrightarrow F^*(u, v)G(u, v) \quad (2.2)$$

donde

$$F^*(u, v) = Re(F(u, v)) - iIm(F(u, v)) \quad (2.3)$$

En estas fórmulas $f(x, y)$ es la primera imagen, $g(x, y)$ es la segunda imagen, $F^*(u, v)$ es el conjugado de la transformada de Fourier de la primera imagen y $G(u, v)$ es la transformada de Fourier de la segunda imagen.

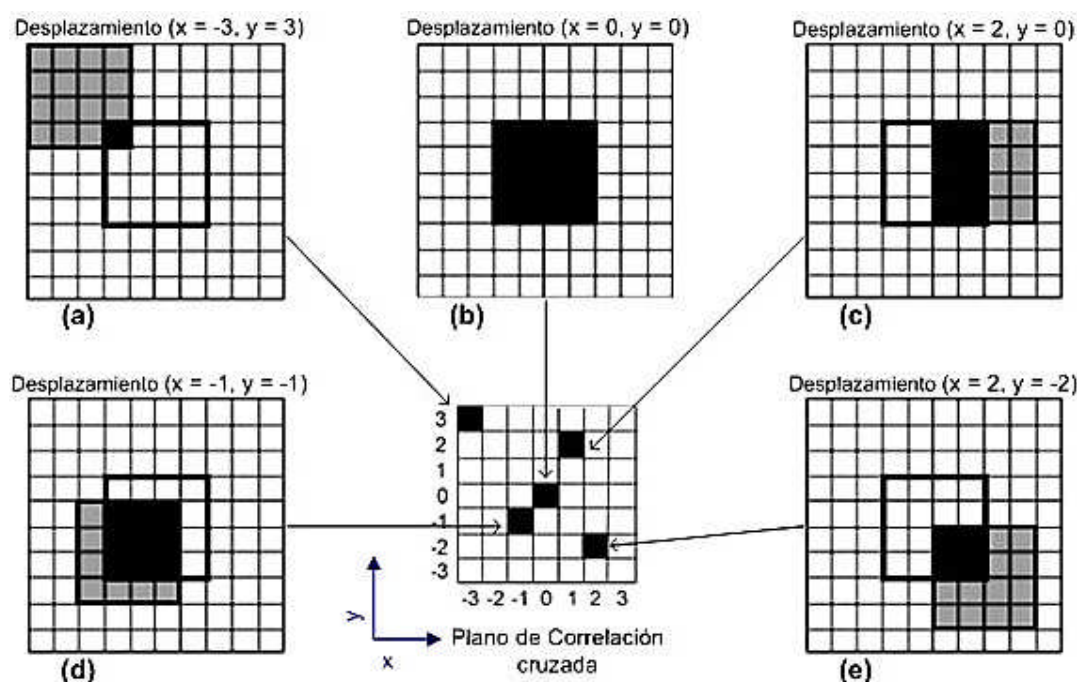


FIGURA 18. Correlación de dos zonas de interrogación.

En el plano de correlación cruzada se pueden observar las posiciones de los máximos en los cuales hubo mayor similitud al traslapar una imagen sobre la otra. Generalmente el máximo absoluto representa el desplazamiento promedio que tuvieron las partículas entre las dos imágenes. Las coordenadas de este máximo representan el desplazamiento más probable en píxeles que tuvieron las partículas en cada eje. La Figura 19 (c) y (d) muestra de forma gráfica el plano de correlación cruzada de las imágenes (a) y (b). Las imágenes tienen un tamaño de 64 por 64 píxeles y por lo tanto, el plano de correlación cruzada es de 127 por 127 píxeles y fue calculado con la fórmula (2.1). En este ejemplo se puede ver que en el plano de correlación cruzada existen varios máximos. Estos seis máximos locales se deben a que al traslapar una imagen sobre la otra hay un empalme de un círculo blanco de la primera imagen con otro círculo de la segunda. El máximo absoluto se encuentra en la posición (36,13) y corresponde al empalme de los tres círculos de ambas imágenes.

La Transformada Rápida de Fourier asume que la imagen de entrada es periódica y por lo tanto se copia o repite la información de los extremos contrarios cuando se realizan los cálculos. Al hacer esto, la salida presenta información repetida (máximos con la misma magnitud, pero en diferentes posiciones). Por lo cual es necesario aplicar filtros que

permitan eliminar esta información, para que permanezcan solos los datos importantes que representen el desplazamiento real de las partículas.

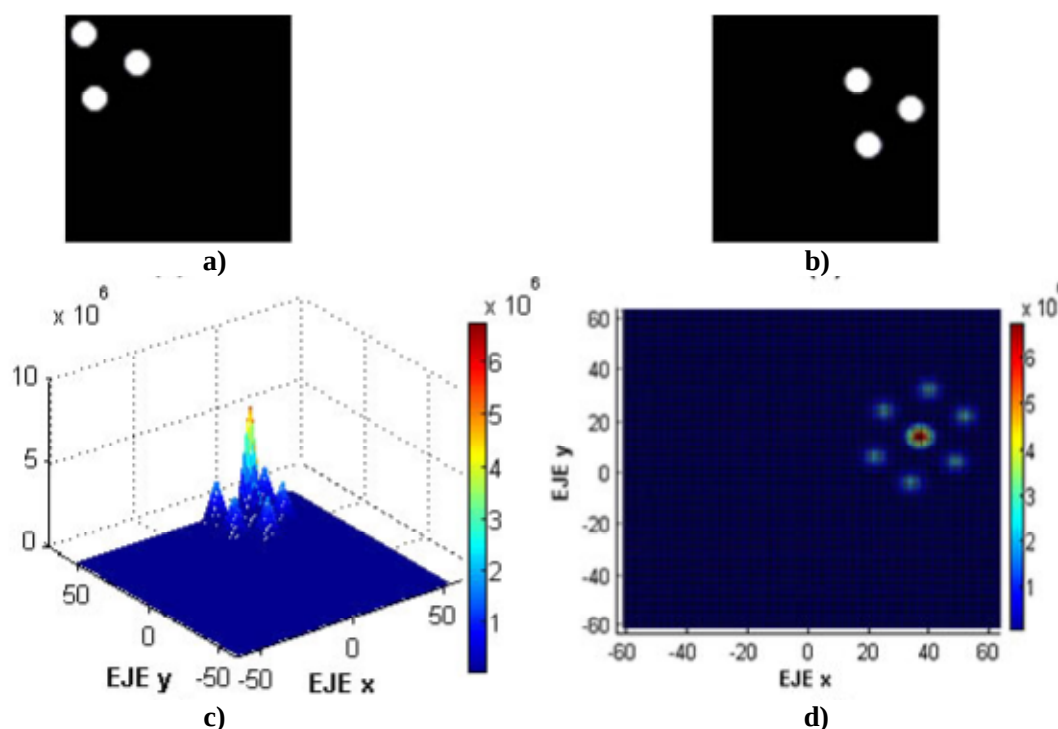


FIGURA 19. (a) y (b) Imágenes de partículas, (c) y (d) Plano de correlación cruzada.

Estos filtros consisten básicamente en aplicar una máscara para tomar solo la información del centro de cada zona de interrogación. La máscara puede ser generada por una función Gaussiana o totalmente cuadrada.

El proceso de correlación cruzada mencionado se repite para todas las zonas de interrogación de las imágenes y como resultado se obtiene una matriz con los desplazamientos en las coordenadas x e y de cada zona de interrogación. Con la matriz de desplazamientos, el intervalo de tiempo entre las imágenes capturadas y con el factor de amplificación de la imagen se calcula la velocidad local del fluido para cada zona. Finalmente la velocidad de cada zona se representa con un vector, y se construye un mapa de vectores de velocidad. Típicamente las zonas de interrogación son cuadradas, por lo tanto el mapa de velocidades obtenido presenta los vectores acomodados en una matriz.

El tamaño de las zonas de interrogación determina el número de vectores que son calculados por imagen y por lo tanto determinará la máxima resolución espacial del mapa de vectores de velocidad. Entre más pequeña sea la zona de interrogación se obtienen más vectores. Por ejemplo en la Figura 20 se pueden ver dos imágenes consecutivas (a) y (b), y dos mapas de vectores con diferentes resoluciones dependiendo del tamaño de zona de interrogación utilizada. La Figura 20(c) tiene zonas de 256 por 256 píxeles y genera 4 vectores, mientras que la Figura 20(d) con zonas de 32 por 32 píxeles genera 256 vectores.

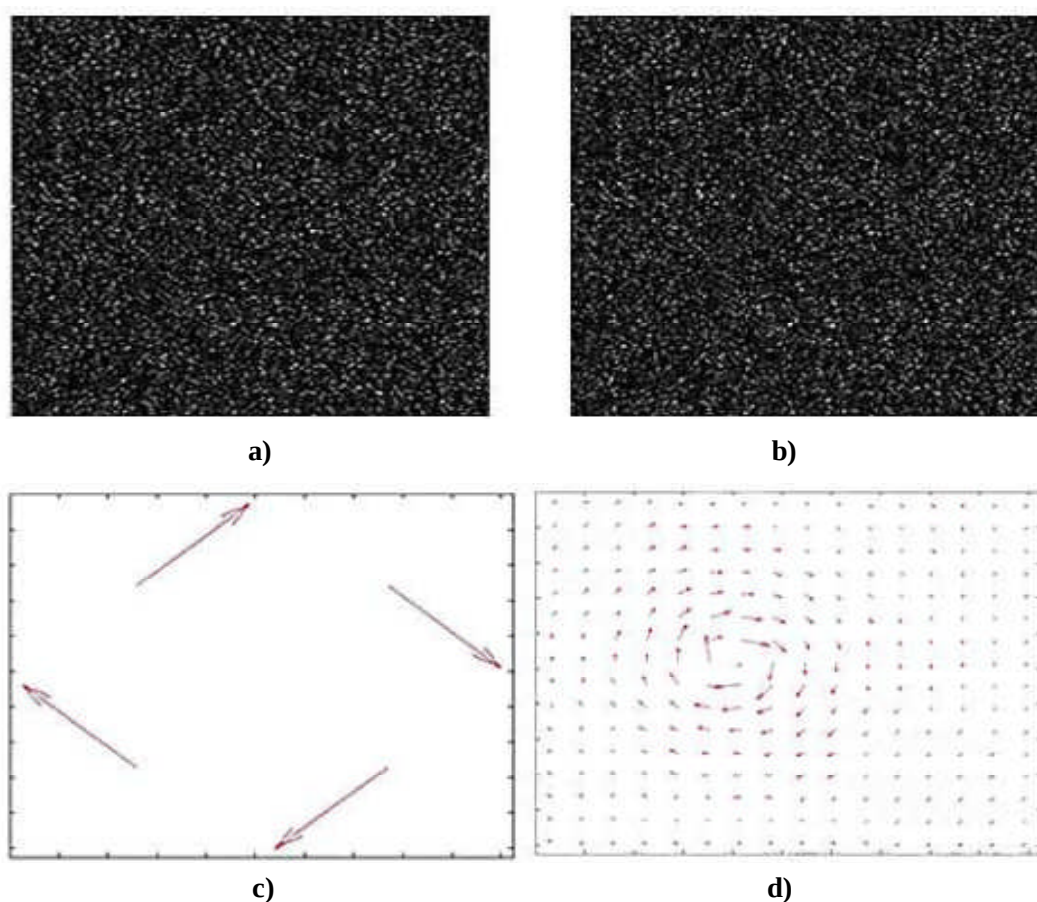


FIGURA 20. (a) (b) Imágenes de partículas 512 por 512 píxeles, (c) Mapa de vectores con zonas de 256 por 256 píxeles (d) Mapa de vectores con zonas de 32 por 32 píxeles.

La técnica de PIV permite obtener el campo de velocidades a partir de las imágenes de partículas de un fluido en movimiento. A continuación se mostrarán algunos de los mapas que se pueden obtener al utilizar PIV en un par de imágenes consecutivas. En las secciones

previas se mencionaron las partes y etapas necesarias para obtener las imágenes. Ahora estas imágenes son procesadas para obtener los mapas de vectores de velocidad y su análisis e interpretación dependerá de lo que se esté estudiando en el fluido. Además, en estos ejemplos se podrá ver cuál es la importancia de elegir adecuadamente el tamaño de las zonas de interrogación y su repercusión en la cantidad y validez de los resultados.

La Figura 21 muestra dos imágenes de partículas generadas de forma artificial de 256 por 256 píxeles. Cada imagen tiene aproximadamente 4000 partículas de 5 píxeles de diámetro en promedio. El desplazamiento medio de las partículas es de 7.5 píxeles entre el par de imágenes.

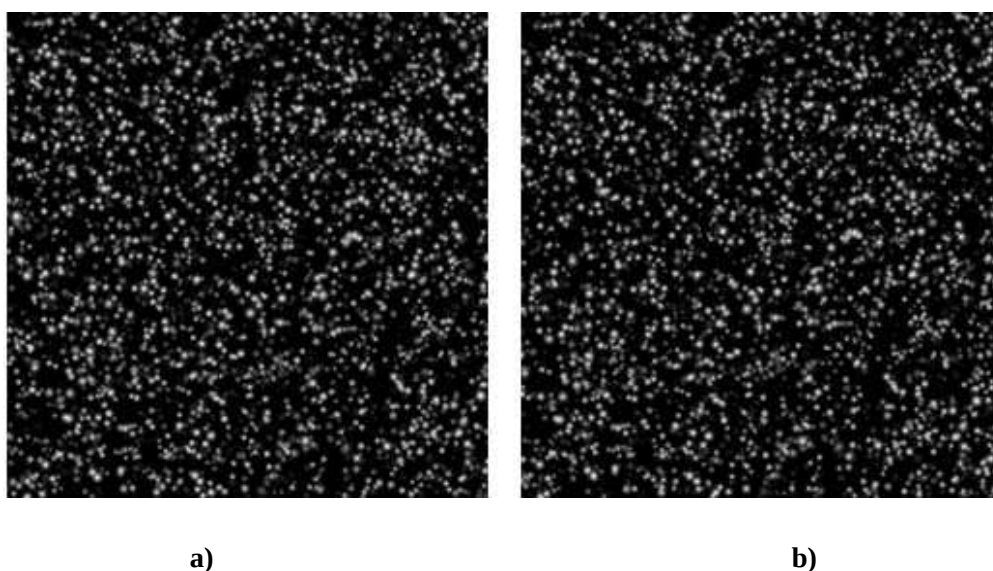


FIGURA 21. (a) Imagen de partículas tomada en el tiempo t_0 , (b) Imagen de partículas tomada en el tiempo t_1 .

A continuación se muestran algunos mapas de vectores que son resultado de aplicar el algoritmo de PIV a las imágenes de la Figura 21 las imágenes fueron correlacionadas con distintas zonas de interrogación, aunque para fines prácticos, todas fueron cuadradas y de tamaño potencia de 2. Cabe mencionar que la técnica no impone ninguna restricción en cuanto al tamaño o la forma de las zonas de interrogación, por lo cual éstas podrían ser rectangulares, Sin embargo existe un máximo, un mínimo, correspondientes a la cantidad de partículas presentes. Debe haber al menos 5 partículas en cada área de interrogación; y deben desplazarse más de 5 píxeles (no más de $\frac{1}{4}$ del área de interrogación).

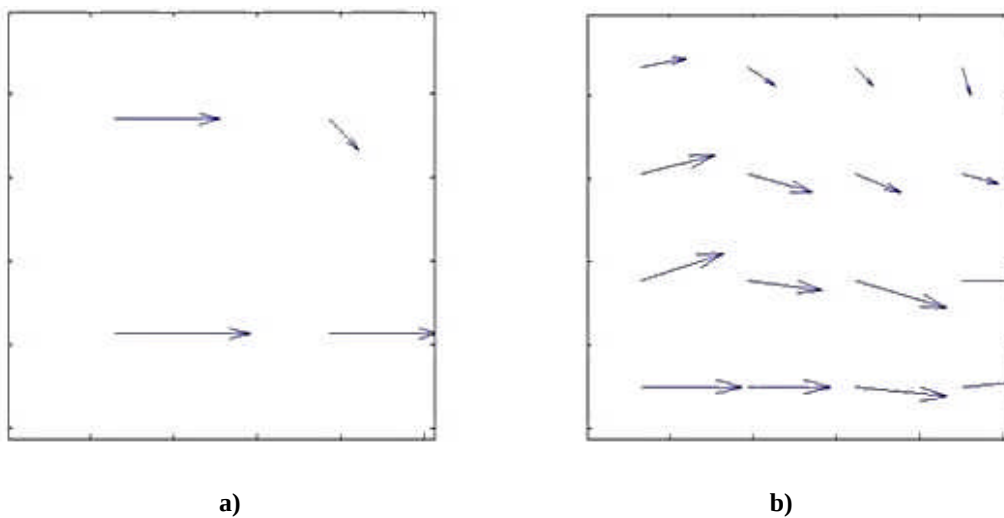


FIGURA 22. Mapa de vectores con zonas de (a) 128 x 128 píxeles (b) 64 x 64 píxeles.

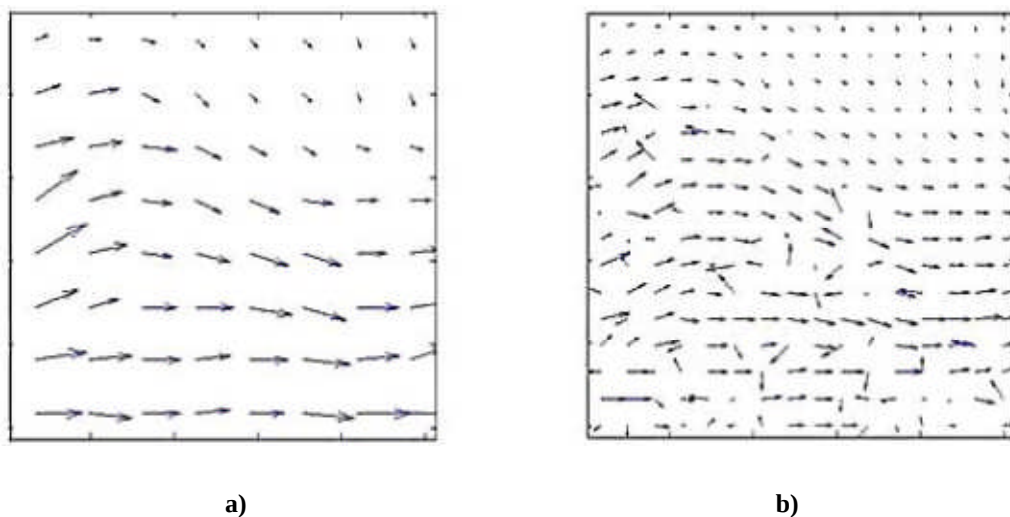


FIGURA 23. Mapa de vectores con zonas de (a) 32 x 32 píxeles (b) 16 x 16 píxeles.

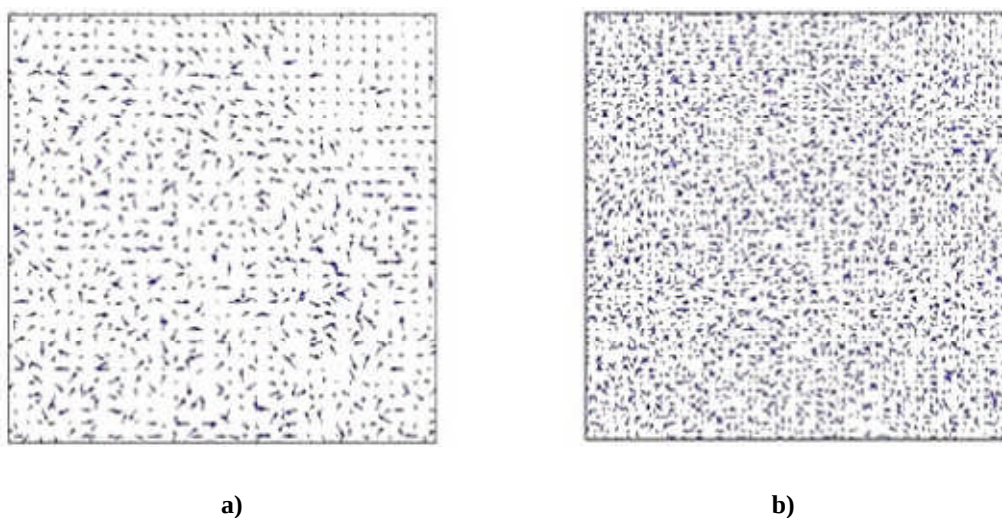


FIGURA 24. Mapa de vectores con zonas de (a) 8 x 8 píxeles (b) 4 x 4 píxeles.

Aunque va a depender de la aplicación que se le dé a los datos, generalmente es más conveniente tener una mayor resolución espacial de los resultados. Como se mencionó previamente, la resolución (cantidad de vectores) depende del tamaño de las zonas de interrogación utilizadas. En la Figura 22(a) con zonas de 128 por 128 sólo se obtienen 4 vectores mientras que en la Figura 24(b) se obtienen poco más de 4000.

Es conveniente utilizar zonas de interrogación pequeñas para tener una mayor resolución y detalle del fluido que se está estudiando, sin embargo si las zonas son muy pequeñas la validez de los resultados puede verse afectada. En la Figura 23(b) se pueden ver algunos vectores que difieren considerablemente en magnitud o dirección de sus vecinos. Estos vectores son llamados incorrectos o espurios.

Tener vectores incorrectos es inevitable, y aún en condiciones ideales un 5% de los vectores será incorrecto. Los vectores incorrectos se deben a que al correlacionar las zonas de interrogación, el máximo absoluto no se produce en el punto de mayor similitud entre ellas. Las causas más comunes son porque que el fluido o el medio que lo contiene producen reflejos de la luz que son confundidos con partículas; o por el hecho de que si las zonas son muy pequeñas es posible que se encuentren muy pocas partículas o ninguna, lo cual haría imposible encontrar un mapeo con las partículas de la segunda imagen. En las orillas de las imágenes es más común tener vectores incorrectos. Debido a que el fluido se desplaza entre una imagen y la otra, es normal que algunas partículas que se encuentran en

una orilla de la primera imagen ya no se encuentren en la segunda imagen. Para corregir el problema de los vectores incorrectos muchos de los sistemas comerciales de PIV tienen rutinas para validar los resultados de los mapas de vectores y sustituirlos en caso de ser necesario. Sin embargo son pocas las opciones gratuitas que cuentan con esta etapa de post-procesamiento.

Al utilizar la técnica de PIV, se tiene la limitante de la resolución espacial de sus resultados pues siempre habrá un momento a partir del cual si se sigue reduciendo el tamaño de las zonas de interrogación, el número de vectores incorrectos superará el número de vectores correctos. Por esta razón, es muy importante elegir adecuadamente el tamaño de las zonas de interrogación. Como ejemplo de esta situación tenemos la Figura 24(b) en la cual la mayoría de los vectores son incorrectos. Un dato que se puede tomar como referencia es buscar que haya por lo menos entre 5 y 10 partículas por zona de interrogación (Prasad, A.K. 2000). También se puede tomar como referencia la regla del cuarto, que dice que el tamaño de la zona de interrogación debe de ser cuatro veces el desplazamiento promedio de las partículas.

El principal problema de PIV es que la resolución espacial de los resultados no es suficiente en muchos experimentos. El tamaño de las zonas de interrogación con el que aún se obtienen buenos resultados generalmente es de 64 por 64 o de 32 por 32 píxeles. Si se desea obtener una mayor resolución es necesario utilizar otro tipo de procesamiento, como los propuestos en Súper-Resolución y Multigrid.

La técnica de Súper-Resolución es un método híbrido de PIV/PTV en el cual la correlación cruzada de PIV es empleada antes de la identificación de las trayectorias individuales de las partículas. Las tareas críticas de este método son identificar correctamente las partículas de forma individual y determinar con precisión el centro de las partículas identificadas. Esto debido a que las condiciones de las imágenes de PIV hacen difícil la identificación individual. Los algoritmos que combinan PIV y PTV han sido estudiados por varios autores, enfocándose por la forma en que se detectan las partículas y en cómo realizar la asociación correcta de ellas en imágenes consecutivas. Una de las últimas propuestas, y más utilizada, ha sido emplear reglas de lógica difusa para determinar los pares de partículas (Wernet M.P. 1999).

La técnica de Multigrid es un método que permite obtener mapas de velocidades con diferentes resoluciones. El procesamiento con correlación cruzada se realiza de forma iterativa y en cada iteración se reduce en un determinado porcentaje el tamaño de las zonas de interrogación para obtener una mayor resolución de los resultados. Generalmente se hacen tres o menos iteraciones y en cada una se utiliza la información de la iteración anterior (Scarano F. y Riethmuller M.L.. 1999).

.

CAPÍTULO 3

Metodología.

3.1. Procesamiento de imágenes con Mat_LSPIV

La técnica de LSPIV convencional consta de 5 componentes: visualización del flujo, iluminación, captura de imágenes, ortorectificación la cual no es realizada en la técnica tradicional de PIV y procesamiento de imágenes. La ortorectificación y el procesamiento de imágenes se realizará utilizando el programa Mat_LSPIV elaborado por Alexander Hauet de la Universidad de Iowa en el 2007, el cual fue implementado totalmente en Matlab.

El procedimiento del LSPIV presenta tres pasos principales los cuales se muestran en la figura 24:

- Ortorectificación
- Análisis de PIV
- Post-procesamiento

3.1.1 Ortorectificación

La ortorectificación es el post-procesamiento que aplica el sistema antes de procesar con PIV y consiste en la corrección del efecto de perspectiva de las imágenes, Mat_LSPIV usa una calibración implícita en el método para transformar las imágenes capturadas en imágenes corregidas.

Para la ortorectificación de las imágenes capturadas es necesario realizar 2 pasos, el primero consiste en localizar los puntos de referencia en tierra conocidos (GRP) dentro de la imagen, el siguiente paso es la parametrización que consiste en determinar el tamaño y la resolución de las imágenes, que serán utilizadas para el procesamiento con PIV.

Los GRP's son los puntos de coordenadas conocidas tanto en el sistema de coordenadas de la imagen (en píxeles) y el sistema de coordenadas del espacio (en unidades cartesianas, como metros o pies). Los GRP's pueden ingresarse de forma manual (Figura 25) o ser introducidos por un archivo que contiene las ubicaciones de los puntos de referencia. Las unidades cartesianas en el programa dependen de las unidades de los GRPs, si los datos de entrada son en metros, entonces todas las salidas del programa serán en metros, si los valores de entrada son en pies, entonces todas las salidas del software estarán dadas en pies.

Una vez que los GPRs se introducen, el software resuelve una matriz de 8 parámetros del plano real al plano de proyección, usando el método de mínimos cuadrados.

$$X = \frac{a_1 i + a_2 j + a_3}{a_7 i + a_8 j + 1} \quad \text{Ec. (5)}$$

$$Y = \frac{a_4 i + a_5 j + a_6}{a_7 i + a_8 j + 1} \quad \text{Ec. (6)}$$

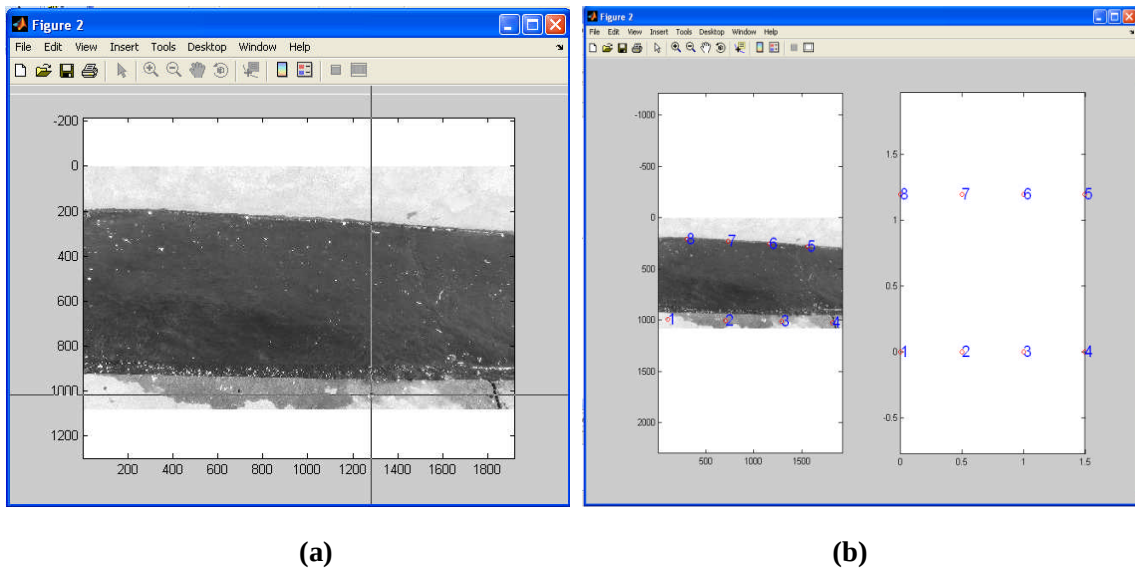


FIGURA 25. (a) Ingreso manual de los puntos de referencia en la imagen a ortorectificar, (b) Asignación de valores de los GRPs dentro de la imagen.

El objetivo de la parametrización de las imágenes es definir el tamaño y la resolución de las imágenes ortorectificadas. El tamaño de la imagen ayuda a eliminar las zonas que no serán procesadas con la PIV, eso permite reducir el tiempo de procesamiento; también podría

considerarse como una máscara en la imagen para eliminar el efecto de las fronteras del flujo, para el caso de Mat_LSPIV son rectangulares y se designa con valores en los ejes (x; y). La resolución es el tamaño del espacio cubierto por un píxel. Por ejemplo, si la unidad cartesiana utilizada es el metro, una resolución de 0.01 significa que un píxel cubre un tamaño físico de $1 \times 1 \text{ cm}^2$. Entre más pequeño sea el factor, mayor será la resolución y el detalle de la orto-imagen, y el tiempo de cómputo se irá incrementando. No sirve de nada aplicar una resolución muy buena, si el estudio no lo requiere.

En la Figura 26 se muestra la ventana de Mat_LSPIV para la parametrización de las imágenes y en la Figura 27 se muestran 4 diferentes resoluciones aplicadas a la misma imagen (0.1, 0.01, 0.001 y 0.0005) que equivaldrían a píxeles de 1 dm^2 , 1 cm^2 , 1 mm^2 y 0.5 mm^2

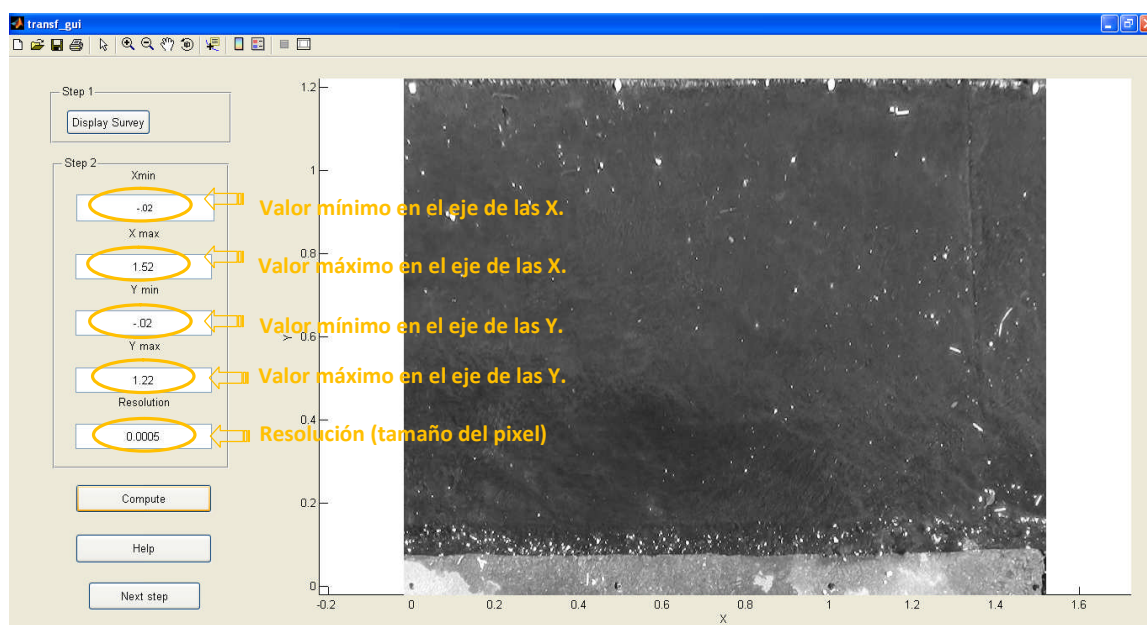


FIGURA 26. Ventana gráfica de Mat_LSPIV para ingresar los valores de parametrización para ortorectificar las imágenes.

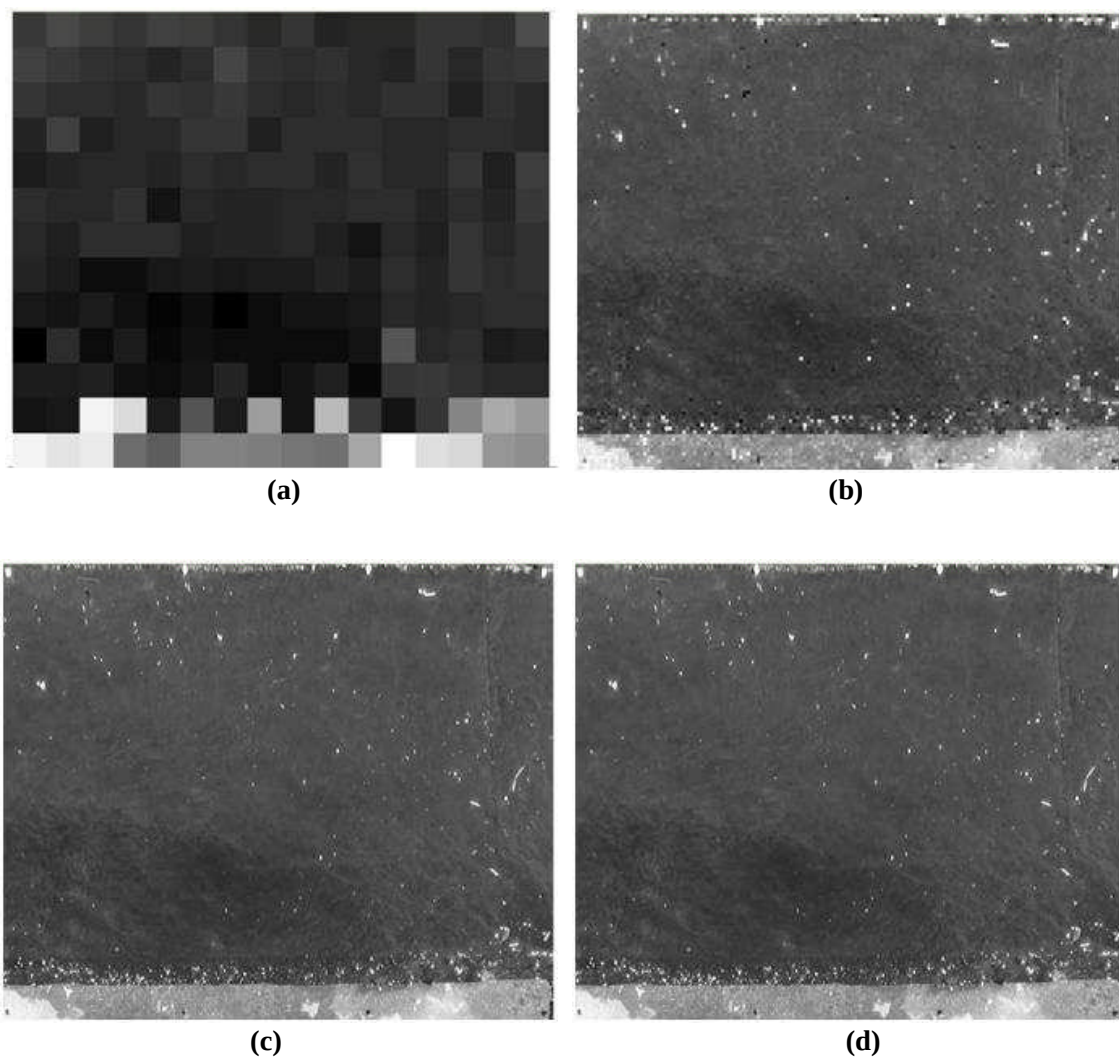


FIGURA 27. (a) Imagen con una resolución de 0.1 que equivale a dimensiones de píxel de 1dm^2 , (b) Imagen con una resolución de 0.01 que equivale a dimensiones de píxel de 1cm^2 , (c) Imagen con una resolución de 0.001 que equivale a dimensiones de píxel de 1mm^2 , (d) Imagen con una resolución de 0.0005 que equivale a dimensiones de píxel de 0.5mm^2 .

3.1.2 Análisis de PIV

El algoritmo del PIV que aplica el software de Mat_LSPIV calcula la correlación entre el área de interrogación (IA) centrada en un punto a_{ij} de la primera imagen y la IA centrada en un punto b_{ij} de la segunda imagen tomada en un intervalo de tiempo δt en segundos. El tamaño de la IA define la resolución espacial de la medición y debe ser lo suficientemente pequeño para conservar la escala de interés en el flujo, escalas más pequeñas en el tamaño

de la IA se perderán en el procesamiento. Sin embargo, tiene que ser lo suficientemente grande como para incluir a trazadores reconocibles dentro de ella, es decir, para abarcar uno o más trazadores que se utilizan para definir el flujo de la superficie libre

El coeficiente de correlación $R(a_{ij}, b_{ij})$ es un índice de similitud de la intensidad en escala de grises de un grupo de píxeles contenidos en la comparación de dos IAs, y se expresa como:

$$R_{ab} = \frac{\sum_{x=1}^{MX} \sum_{y=1}^{MY} \{(a_{xy} - \bar{a}_{xy})(b_{xy} - \bar{b}_{xy})\}}{\left\{ \sum_{x=1}^{MX} \sum_{y=1}^{MY} (a_{xy} - \bar{a}_{xy})^2 \sum_{x=1}^{MX} \sum_{y=1}^{MY} (b_{xy} - \bar{b}_{xy})^2 \right\}^{1/2}} \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde M_x y M_y son los tamaños de las áreas de interrogatorio (en píxeles), y a_{ij} y b_{ij} son las distribuciones de las intensidades de niveles de gris en las dos áreas de interrogación. Los coeficientes de correlación calculados son sólo para los puntos dentro de un área de búsqueda (SA). El tamaño de SA tiene que ser seleccionado de manera que el desplazamiento de los trazadores de la primera imagen esté contenido dentro de la SA de la segunda imagen. En consecuencia, el tamaño de SA es acorde con el rango esperado de las velocidades del río. Para los ríos con pequeñas velocidades en corrientes cruzadas, la SA debe ser asimétrica, alargada en la dirección del flujo. El enfoque del PIV asume el desplazamiento más probable del fluido desde el punto a_{ij} durante un intervalo de tiempo δt entre dos imágenes, es el correspondiente al coeficiente de correlación máxima. Se puede llegar a la precisión del desplazamiento de un píxel usando un ajuste parabólico. Los vectores de velocidad se derivan de estos desplazamientos dividiéndolos por δt .

La forma del IA es un cuadrado. Su tamaño debe ser un número par y la SA se define por 4 cuerpos: S_{im} , S_{ip} , S_{jm} , S_{jp} , donde i y j son los 2 ejes de la imagen y m y p se encuentran por negativo y positivo. S_{im} es la longitud de la SA desde el centro de la IA siguiendo el eje i en la dirección negativa.

Editar la zona de correlación mínima permite introducir un umbral para el valor mínimo del coeficiente de correlación que se utiliza. Si el R máximo es inferior a ese umbral, el vector es considerado como espurio.

En la Figura 28 se muestra la interfaz gráfica utilizada por Mat_LSPIV para introducir los valores del área de interrogación (IA), área de búsqueda (IS), intervalo de tiempo entre imágenes y el valor mínimo de correlación.

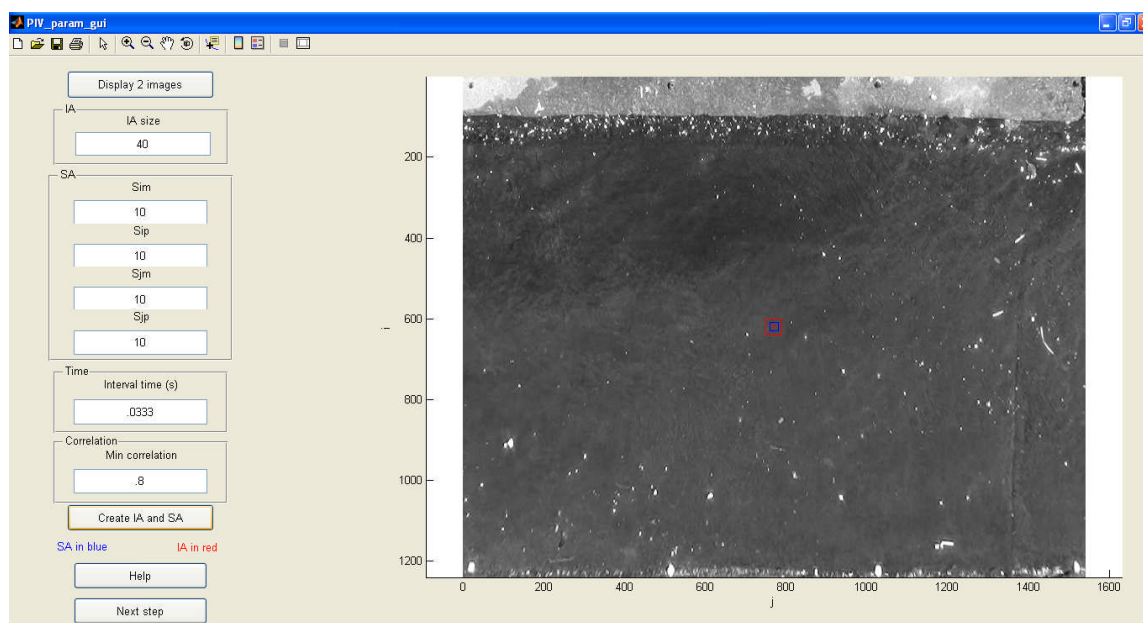


FIGURA 28. Ventana gráfica de Mat_LSPIV para ingresar los valores de parametrización para PIV.

Una vez definidos los parámetros para PIV se procede a delimitar la malla computacional, la cual define los puntos en el sistema de coordenadas de la imagen, donde las IA's (Áreas de interrogación) y la SA's (Áreas de búsqueda) se concentran.

El primer paso para definir la malla es marcar las 4 esquinas del área que se desea analizar (Figura 29), en este caso la malla tendrá forma rectangular, y es recomendable tratar de cubrir únicamente el área de flujo, donde existen patrones móviles, los puntos de la malla que no cumplan con lo anterior no servirán como resultados y solamente retardarán el tiempo de procesamiento.

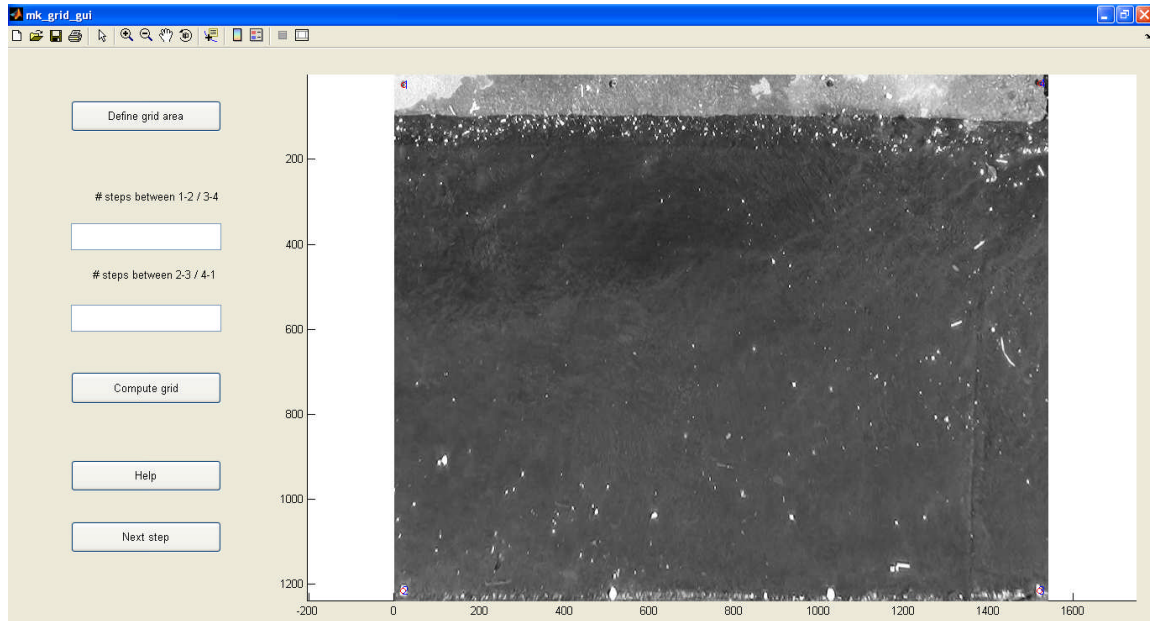


FIGURA 29. Ventana gráfica de Mat_LSPIV para definir la malla computacional para PIV.

Ya definida el área de la malla computacional se introduce la cantidad de puntos en ambos sentidos, el número de puntos será el mismo que los vectores de velocidad calculados y definirá la resolución de resultados en el flujo analizado.

En la Figura 30 se muestran una mallas computacional de 10 x10, en la figura 31 una malla de 25 x 25 y en la figura 32 una malla de 50 x 50, utilizadas para la correlación del proceso de PIV.

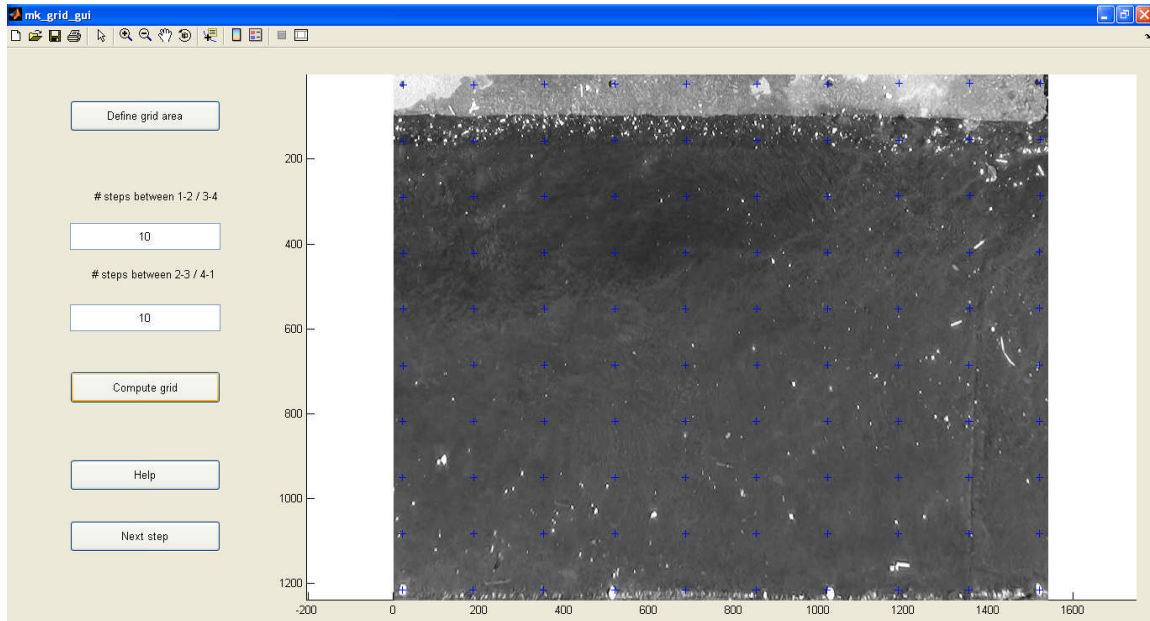


FIGURA 30. Malla computacional de 10 x10.

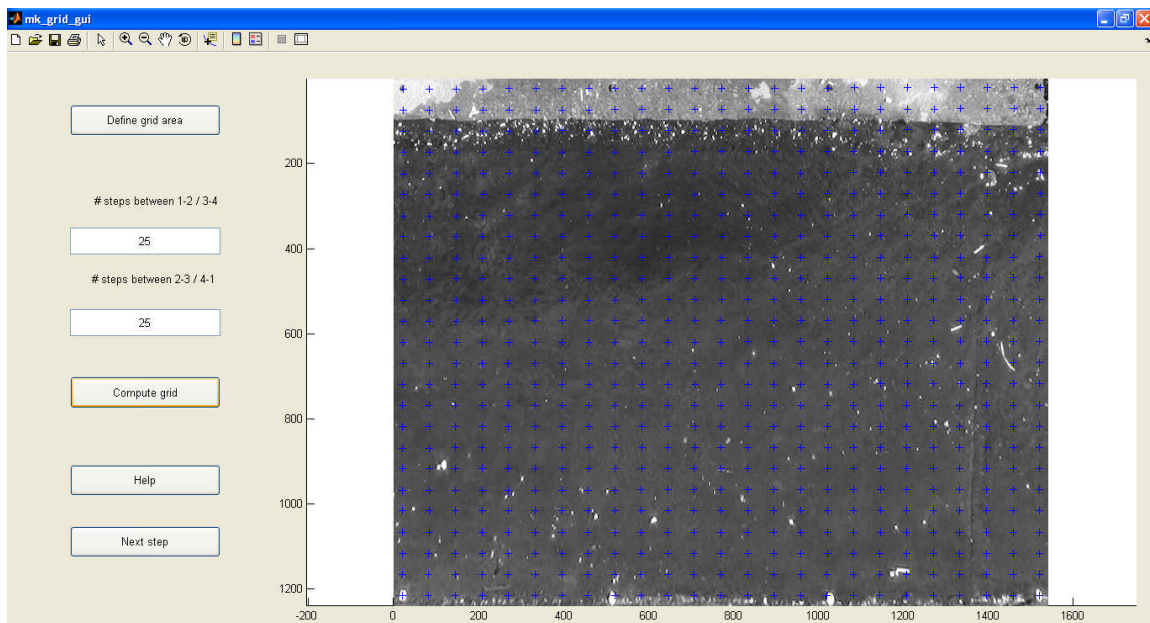


FIGURA 31. Malla computacional de 25 x 25.

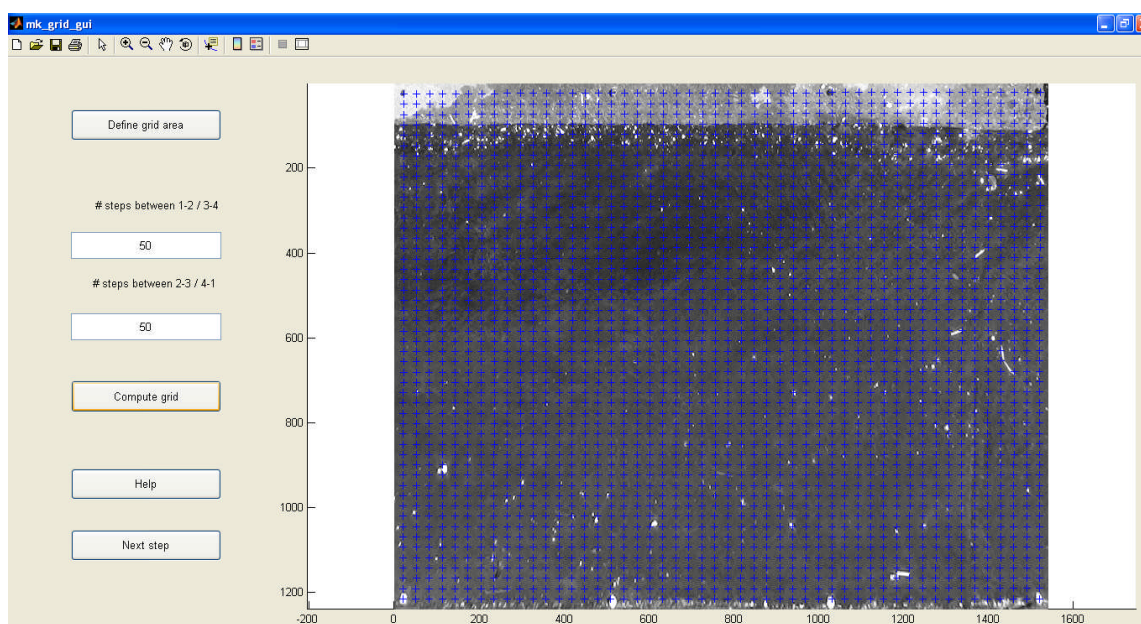


FIGURA 32. Malla computacional de 50 x 50.

Una vez establecida la malla computacional, el programa puede procesar las imágenes de dos formas distintas, si las imágenes fueron registradas como una secuencia o en parejas. La Figura 33 ilustra la diferencia:

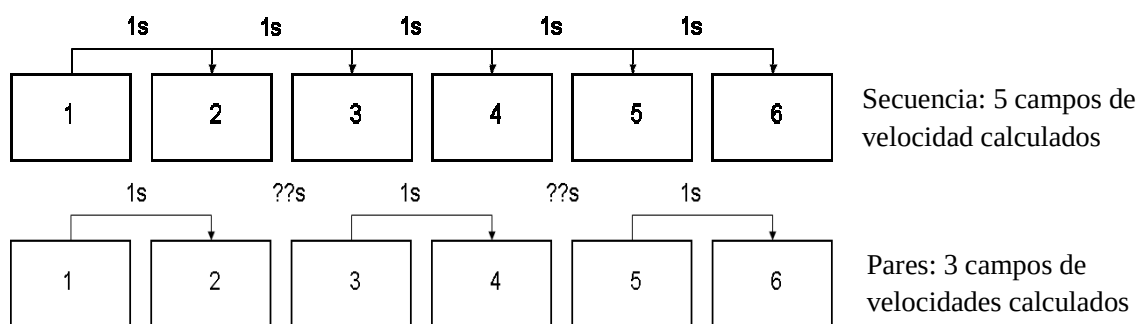


FIGURA 33. Forma de procesar las imágenes.

El software analiza cada par de imágenes con un algoritmo de PIV aplicando correlación cruzada. Un campo de velocidad contiene 5 columnas: X, Y, U, V, R2, es decir, las coordenadas en el espacio (X,Y) a partir de las velocidades, las componentes de las velocidades en las direcciones de X y Y (U,V) y el coeficiente de correlación asociada a la velocidad (R^2). Una línea en U, V y R con valor de 0 no significa que la velocidad en ese punto es 0, pero significa que las velocidades no se calculan para ese momento.

3.1.3 Post-procesamiento

Durante este paso, se puede introducir un filtro en la magnitud de la velocidad. Un umbral en el mínimo y el máximo de la intensidad de la velocidad se pueden introducir utilizando la interfaz gráfica de usuario, y se muestra el campo de velocidades promedio filtrado (Figura 34). El campo de velocidades promedio contiene 6 columnas: X, Y, U, V, SDU, SDV, donde SDU representa la desviación estándar de U y SDV la desviación estándar de V.

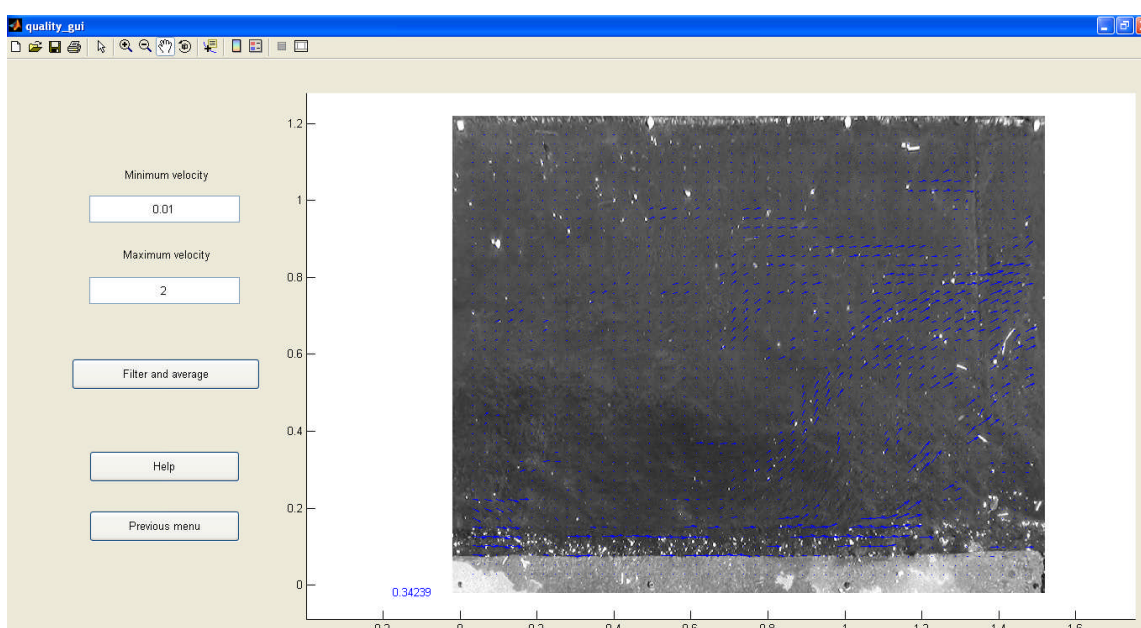


FIGURA 34. Interfaz gráfica para introducir umbral en el mínimo y el máximo de la intensidad de la velocidad.

Mat_LSPIV permite visualizar las velocidades derivadas tales como el campo de velocidades promedio (Figura 35), el mapa de contornos de intensidad de las velocidades (Figura 36), las líneas de corriente (Figura 37), el campo de vorticidad (Figura 38) o velocidades a lo largo de una sección transversal (Figura 39).

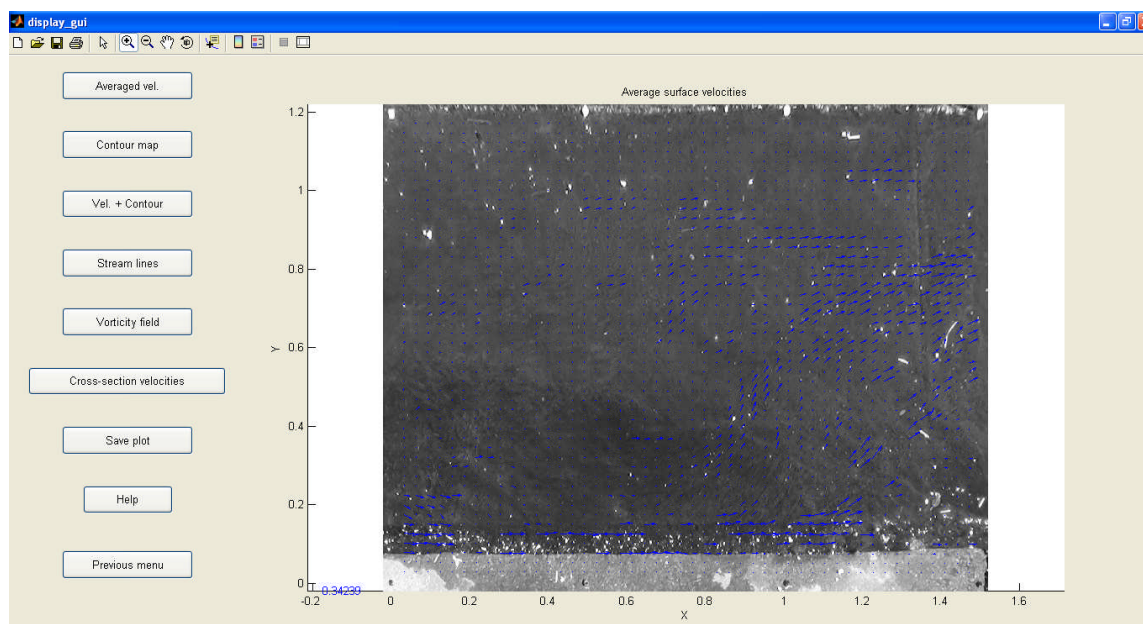


FIGURA 35. Campo de velocidades promedio obtenidos del Pos-procesamiento con Mat_LSPIV.

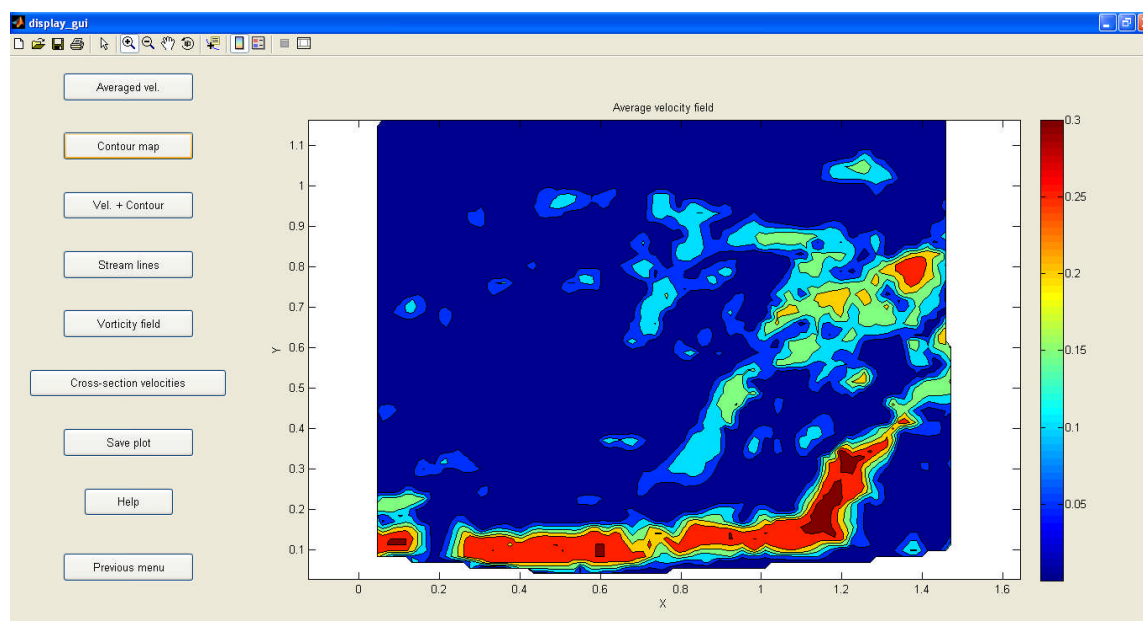


FIGURA 36. Mapa de contornos de intensidad de las velocidades obtenidos del Pos-procesamiento con Mat_LSPIV.

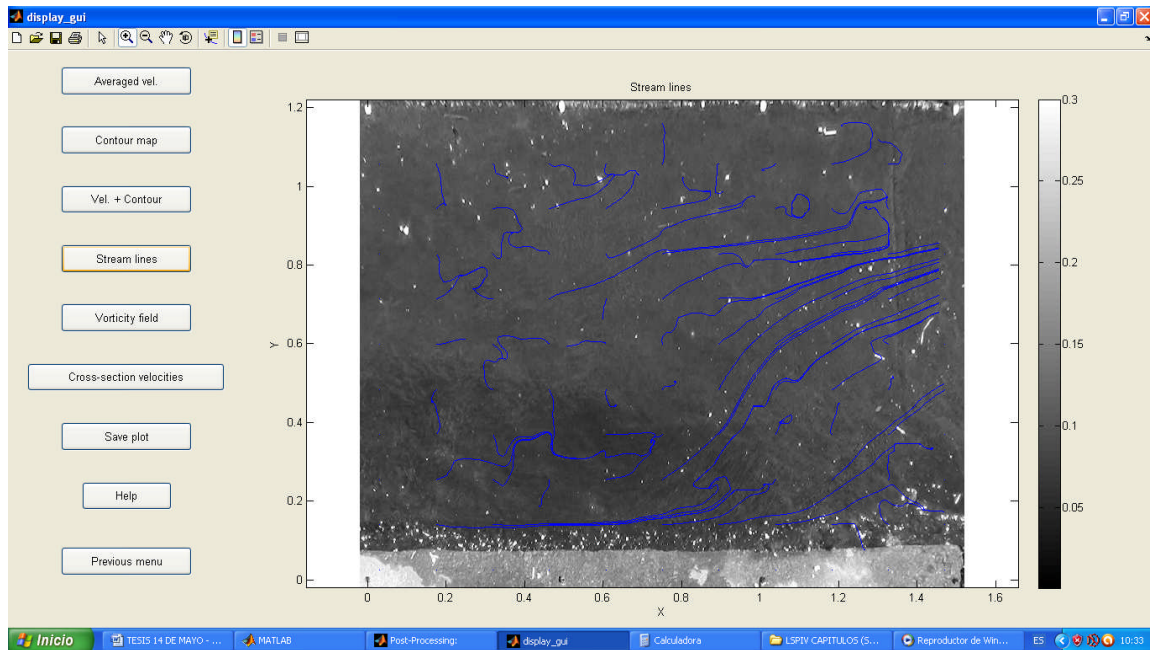


FIGURA 37. Líneas de corriente obtenidas del Pos-procesamiento con Mat_LSPIV.

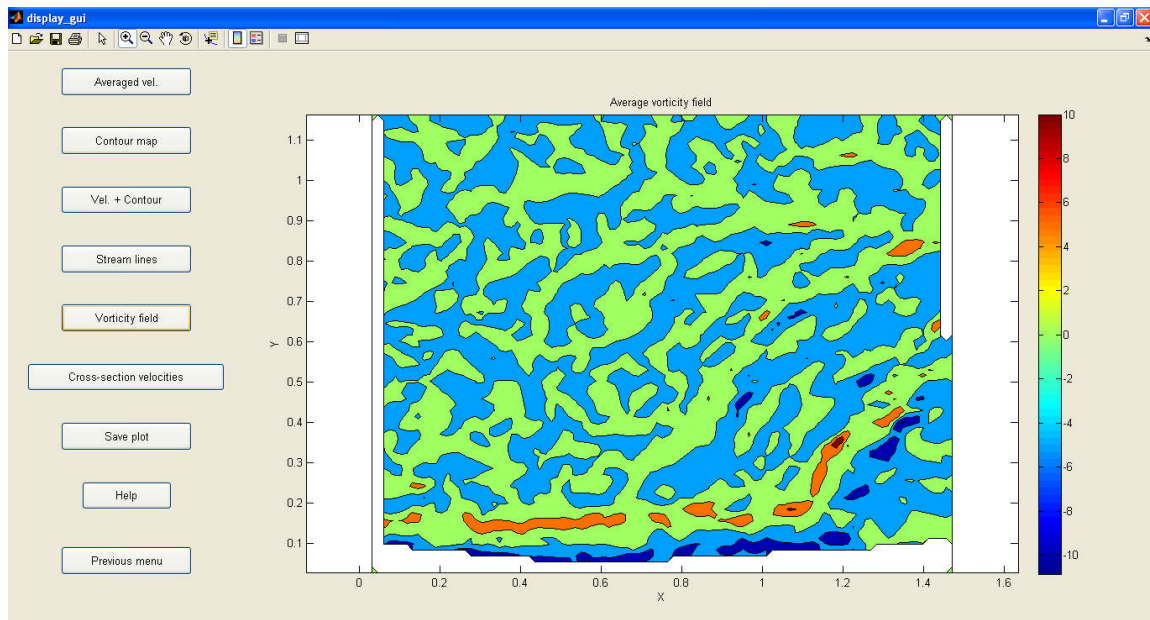


FIGURA 38. Campo de vorticidad obtenidos del Pos-procesamiento con Mat_LSPIV.

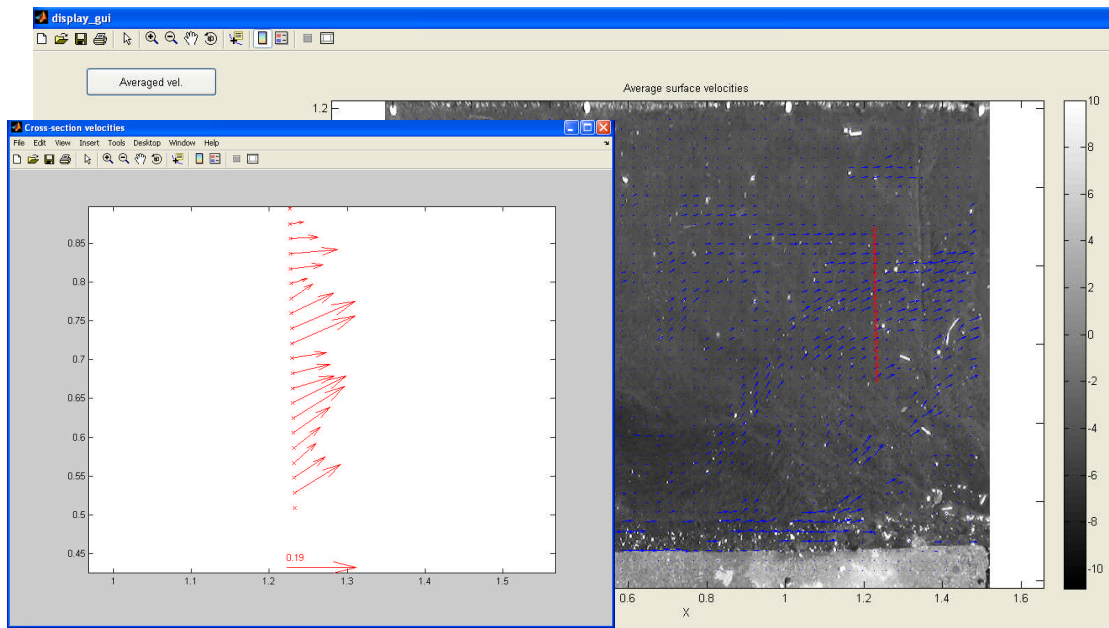


FIGURA 39. Velocidades a lo largo de una sección transversal obtenidos del Pos-procesamiento con Mat_LSPIV.

La vorticidad se calcula como $(dv/dx-du/dy)$. Para la extracción de las velocidades a lo largo de una sección transversal, se introducen el punto inicial y final de una sección transversal. Las velocidades son interpoladas por 11 puntos distribuidos a lo largo del segmento.

3.2 Verificación del programa MAT_LSPIV

Con el fin de poder implementar el programa de MAT_LSPIV en la técnica de Velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escala (LSPIV) se realizaron pruebas de validación al software de Mat_LSPIV, dichas pruebas consistieron principalmente en ortorectificación y procesamiento de PIV.

3.2.1 Verificación de Ortorectificación.

Para verificar la ortorectificación que realiza el programa, se procedió a capturar imágenes de un plano con puntos de referencias con coordenadas conocidas en ángulos que van desde los 90 a los 60° respecto al plano del flujo.

En la Figura 40 se muestra el arreglo que se realizó para la verificación de la ortorectificación desde un ángulo de 60°.



FIGURA 40. Videgrabación de imágenes a un ángulo de 60°.

En las imágenes capturadas se identificaron los puntos de referencia y se procesaron con el programa para ortorectificarlas, el resultado se muestra en la Figura 41

El resultado de la verificación de ortorectificación realizado por Mat_LSPIV es aceptable. Como se puede observar en la Figura 41 los trazadores de forma cuadrada se mostraban irregulares en la imagen sin procesar, sin embargo, en la imagen procesada se muestran los trazadores y la cuadrícula bien definida, de igual manera las dimensiones que muestra el programa en píxeles corresponde a dimensiones del plano real.

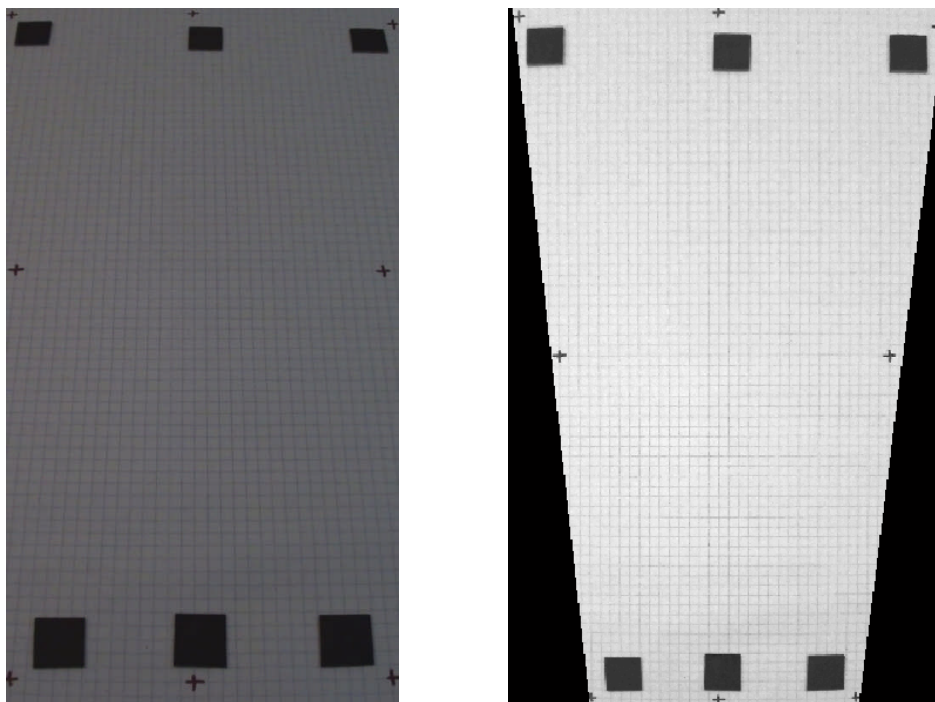


FIGURA 41. La imagen de la izquierda es la imagen sin procesar capturada desde un ángulo de 60° y la derecha es la imagen ya corregida mostrando una ortorectificación aceptable.

3.2.2 Verificación del procesamiento de PIV.

Para validar el programa se diseñaron dos imágenes en Autocad (Fig. 42), donde se simuló un perfil hipotético de un río con círculos como trazadores, desplazando los trazadores simulando un perfil ideal de velocidades entre las dos imágenes.

Las imágenes fueron creadas simulando una imagen plana normal al flujo, y se utilizaron ocho puntos de referencia para la ortorectificación y parametrización que requiere el programa.

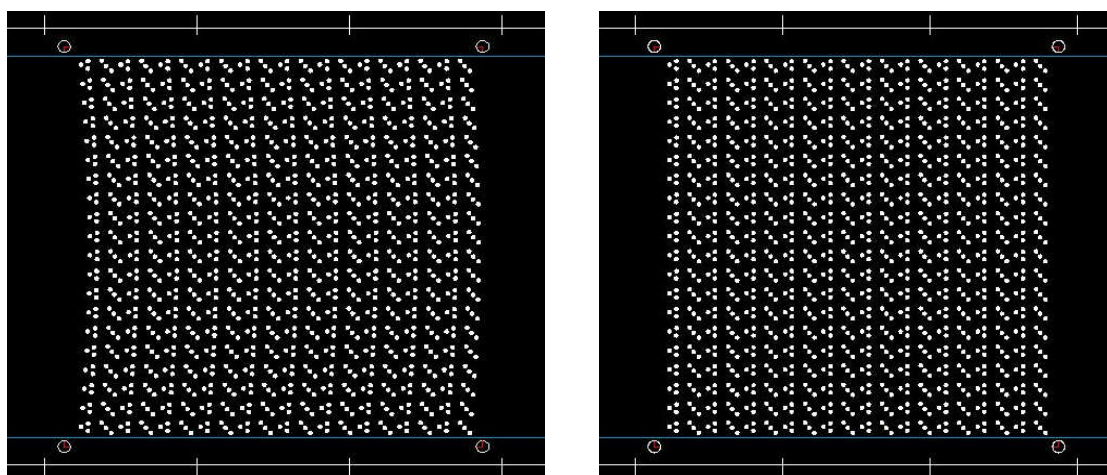


FIGURA 42. Imágenes diseñadas en Autocad para simular un flujo hipotético.

Los resultados obtenidos luego de ser procesadas las imágenes con el programa de Mat_LSPIV fueron los siguientes.

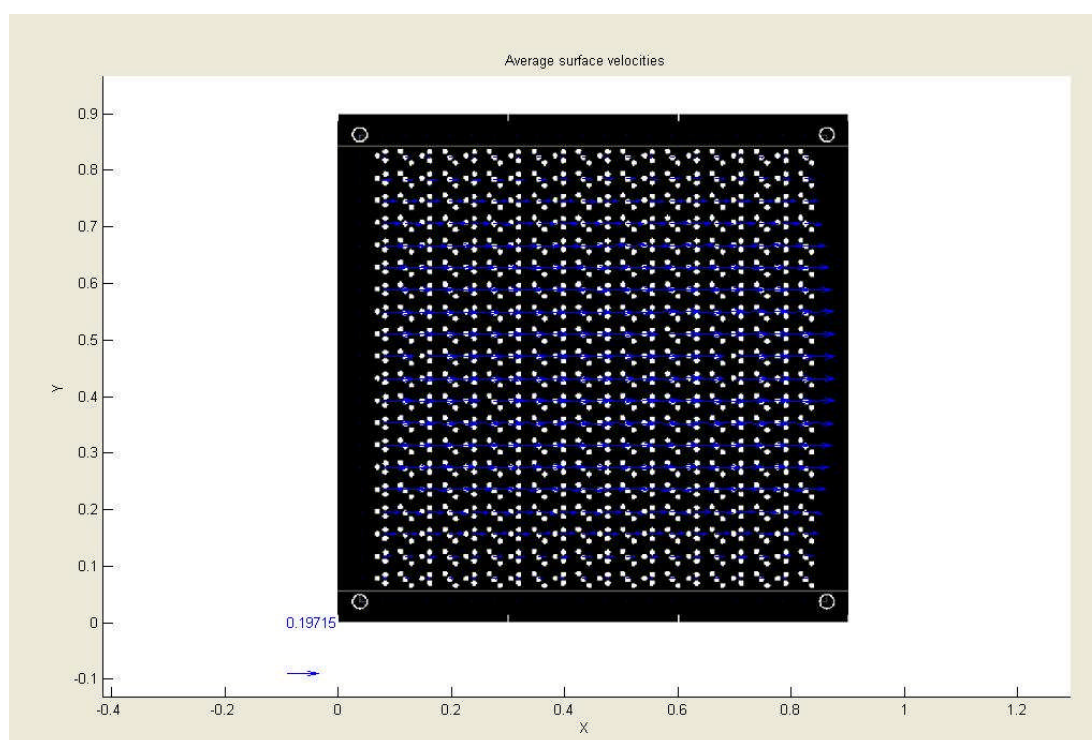


FIGURA 43. Vectores de velocidad resultantes del procesamiento de las imágenes sintéticas para la validación de Mat_LSPIV.

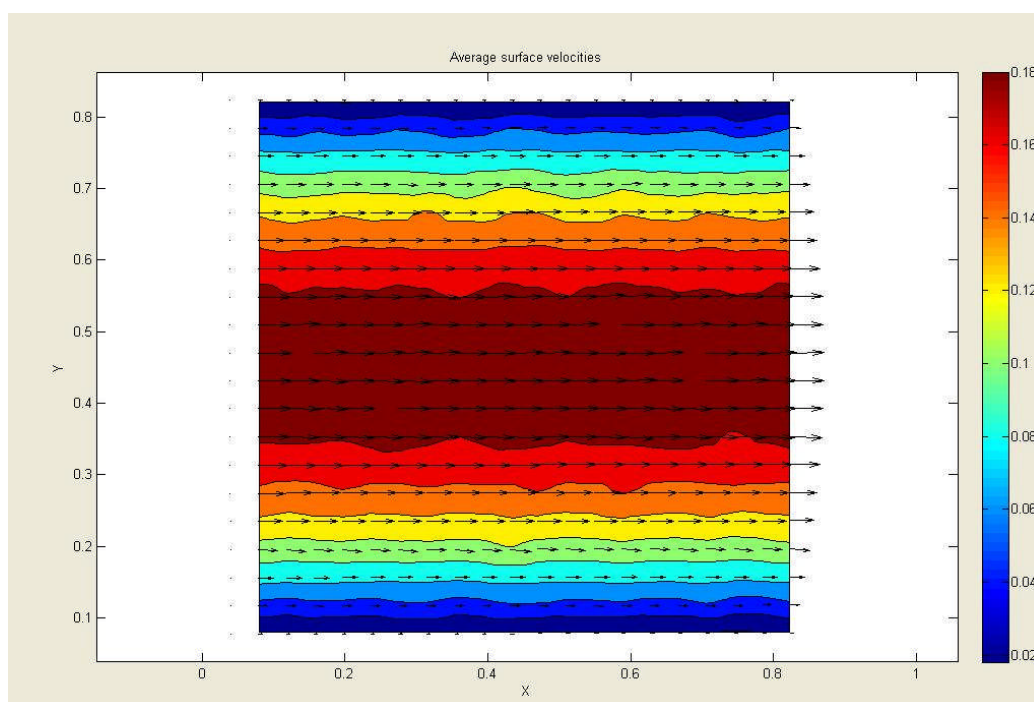


FIGURA 44. Mapa de velocidades resultantes del procesamiento de las imágenes sintéticas para la validación de Mat_LSPIV.

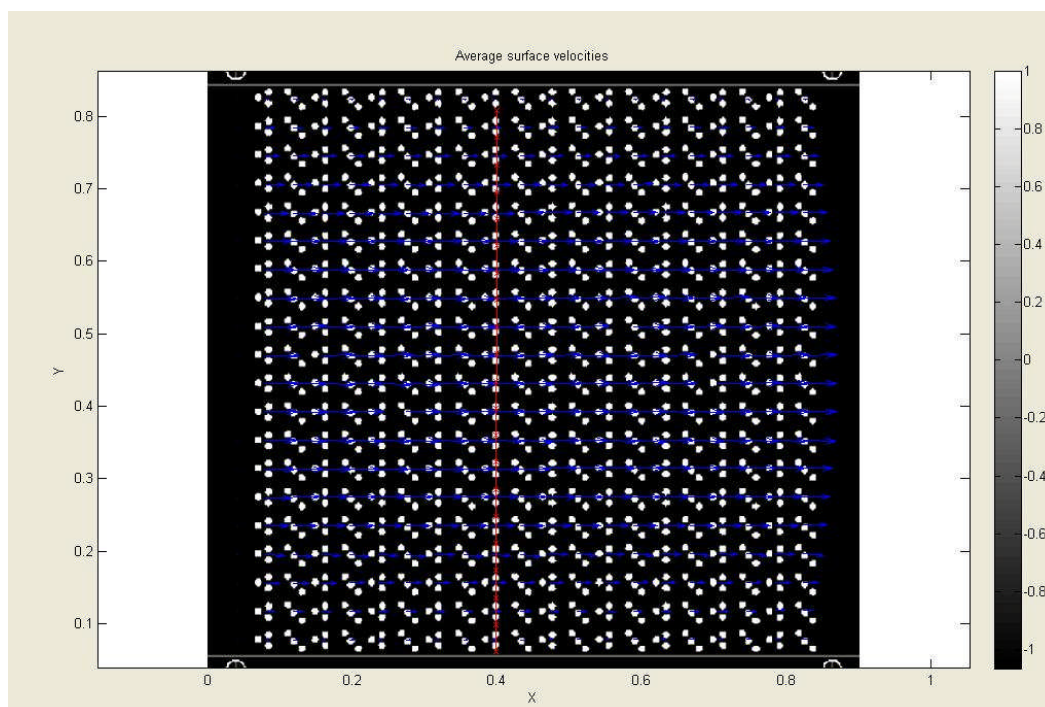


FIGURA 45. Perfil de velocidades resultantes del procesamiento de las imágenes sintéticas para la validación de Mat_LSPIV.

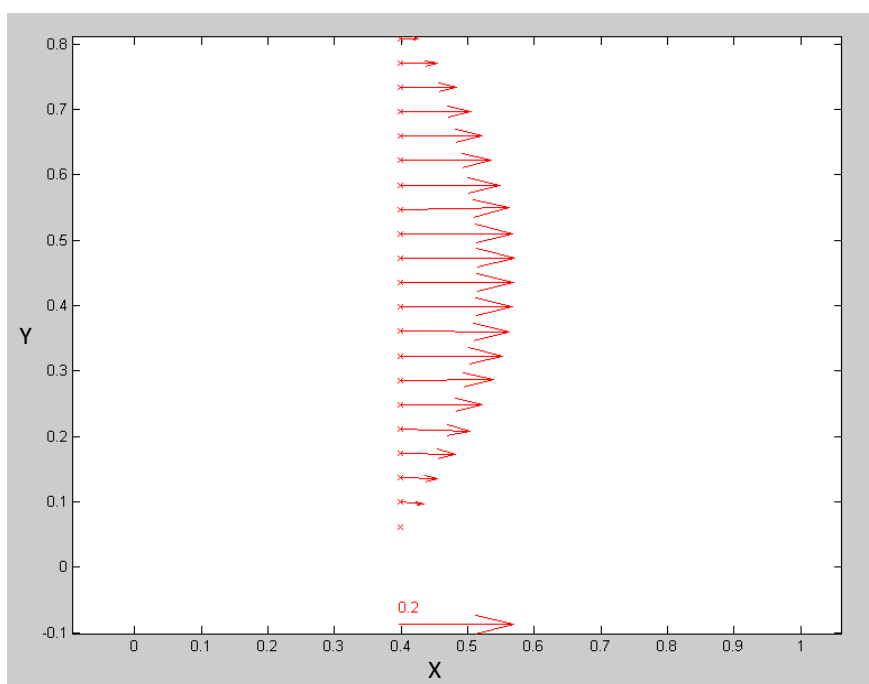


FIGURA 46. Vectores interpolados del perfil de velocidades resultantes del procesamiento de las imágenes sintéticas para la validación de Mat_LSPIV.

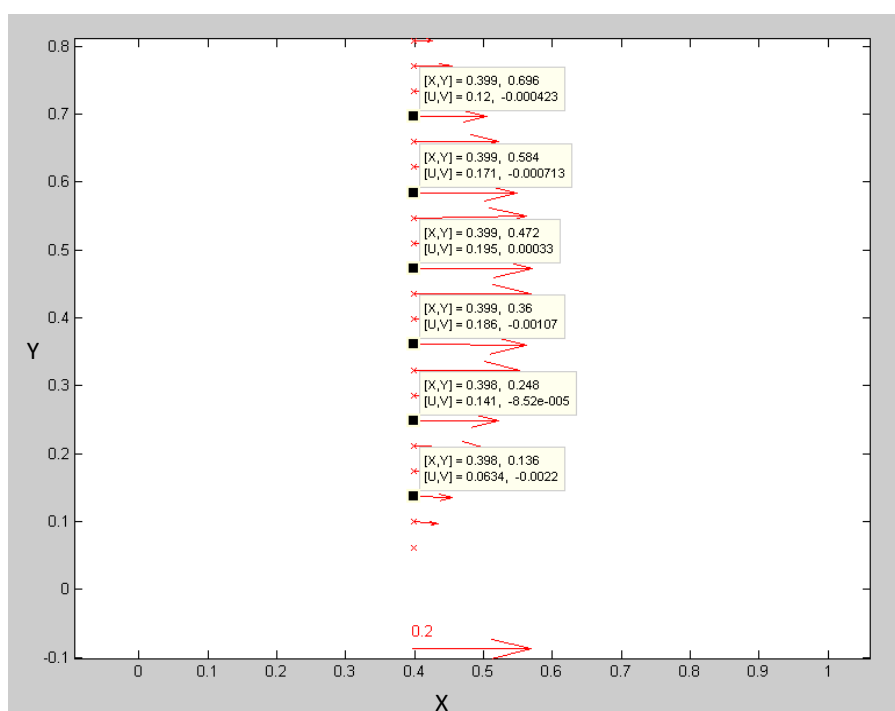


FIGURA 47. Vectores interpolados del perfil de velocidades con etiquetas, los ejes X e Y están en metros, U en m/s y V en grados.

Los resultados obtenidos de la validación de PIV son aceptables, los trazadores mostrados en las imágenes sintéticas fueron desplazados distancias conocidas, así como el tiempo entre imágenes fue de 1 segundo, con estos datos se obtiene la velocidad de desplazamiento aplicando la ecuación fundamental de PIV, con eso se demostró que los valores obtenidos por el programa son correctos.

CAPÍTULO 4

Dispositivos experimentales y mediciones.

4.1. Campaña de campo.

La campaña de campo se realizó en colaboración con personal del IMTA en la Reserva Ecológica Las Estacas, en el Estado de Morelos para el desarrollo y puesta en operación del sistema de Velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escala de Campo.

Se presentan a continuación las características del sitio así como los datos recogidos en la campaña de campo, correspondientes a las medidas de velocidades, obtenidos a partir de técnicas tradicionales de velocimetría y técnica de imágenes de video.

4.1.1. Descripción del sitio

El canal en estudio sirve de alimentación a la Reserva Ecológica “Las Estacas” y el sitio dispuesto para la toma de datos corresponde a un puente vehicular que da acceso al Parque Acuático “Las Isabeles”. En la Figura 48 se presenta una vista en planta de la zona de estudio y un esquema de la ubicación de los equipos aforadores.

Respecto a las condiciones de acceso y seguridad, en las instalaciones mencionadas anteriormente se cuenta con vigilancia de seguridad privada.

La sección del canal en estudio, no cuenta con una estación aforadora, por lo tanto se utilizaron correntómetros como referencia. El Instituto Mexicano en Tecnología del Agua (IMTA) constantemente realiza pruebas a diferentes equipos aforadores en este sitio.

4.1.2. Datos medidos en campo y resultados del aforo

Con el fin de contar con una fuente de datos para comparar los resultados obtenidos mediante el método de las imágenes de video, se realizaron mediciones de velocidad empleando la técnica del velocímetro o correntómetro. Los equipos empleados para ello

fueron 2 correntómetros Flo-Mate, 2 Flow Traker, 1 ADC OTT, 2 trajes para río y cinta métrica.



FIGURA 48. Ubicación general del sitio dispuesto para la toma de datos. Parque natural “Las Isabeles”, Estado de Morelos. (Imagen Tomada de Google Earth, Enero del 2012).

La sección transversal del canal es rectangular y revestida de concreto, el ancho de la sección transversal es de 2.10 metros, Esto permitió dividir la sección transversal en 20 sub-secciones para las cuales se midió la velocidad, empleando los tres diferentes correntómetros, a una profundidad de 0.24 metros, sobre la misma vertical, a cada 10 cm.

En la Tabla I se presentan las mediciones de velocidad para cada una de las sub-secciones y equipo utilizado.

Velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escala (LSPIV).

Distancia (m)	Flomate 2 (a)	Flomate 2 (b)	Flow Tracker 1 (a)	Flow Tracker 1 (b)	ADC OTT (a)	ADC OTT (b)	Flomate 1 (a)	Flomate 1 (b)	Flow Tracker 2 (a)	Flow Tracker 2 (b)
0.10	0.140	0.150			0.150	0.145	0.150	0.140		
0.20	0.140	0.140	0.151	0.151	0.160	0.145	0.140	0.160	0.150	0.151
0.30	0.160	0.150	0.142	0.171	0.167	0.175	0.160	0.150	0.184	0.168
0.40	0.170	0.170	0.178	0.194	0.166	0.191	0.180	0.180	0.168	0.175
0.50	0.180	0.190	0.177	0.184	0.185	0.188	0.170	0.190	0.187	0.194
0.60	0.170	0.170	0.172	0.163	0.179	0.175	0.180	0.170	0.176	0.192
0.70	0.160	0.160	0.167	0.150	0.182	0.186	0.180	0.170	0.157	0.158
0.80	0.140	0.140	0.151	0.131	0.163	0.143	0.150	0.130	0.144	0.136
0.90	0.140	0.140	0.148	0.149	0.147	0.158		0.140	0.127	0.138
1.00	0.150	0.140	0.148	0.160	0.157	0.142	0.140	0.130	0.155	0.143
1.10	0.160	0.140	0.162	0.162	0.163	0.147	0.170	0.150	0.153	0.155
1.20	0.180	0.180	0.155	0.179	0.173	0.150	0.180	0.170	0.171	0.165
1.30	0.180	0.180	0.176	0.172	0.184	0.184	0.180	0.180	0.184	0.169
1.40	0.180	0.180	0.193	0.179	0.179	0.188	0.180	0.190	0.188	0.187
1.50	0.170	0.180	0.183	0.187	0.197	0.185	0.180	0.180	0.183	0.183
1.60	0.170	0.180	0.175		0.190	0.164	0.180	0.160	0.171	0.158
1.70	0.150	0.160	0.154	0.171	0.179	0.175	0.170	0.160	0.163	0.133
1.80	0.140	0.130	0.136	0.152	0.161	0.142	0.130	0.140	0.129	0.135
1.90	0.130	0.120	0.116		0.143	0.139	0.130	0.130	0.123	0.113
2.00	0.110	0.130	0.119	0.125	0.137	0.128	0.130	0.140	0.125	0.127

Tabla I. Mediciones de velocidad en m/s con 5 velocímetro en la sección estudiada del canal “Las Estacas” (Estado de Morelos).

4.1.3. Toma de imágenes de video y puntos de control sobre la imagen

Diseño del sistema

Para la toma de datos de las imágenes se usó una cámara SONY HDR-CX110 (Figura 49). La cámara se ubicó a 1.5 metros sobre la superficie del canal, en dirección del puente mediante un trípode de aluminio y no se usó ningún tipo de carcasa o gabinete, se aprovechó el puente para cubrir cualquier refracción de luz sobre la superficie del flujo.

Las tomas de imágenes se hicieron con una resolución temporal de 60 cuadros por segundo y una resolución de la imagen de 1020x1080 pixeles. Las imágenes se tomaron en el transcurso del día a partir de las 13:30 hasta las 16:30 horas, intervalo en el cual se levantaban al mismo tiempo los puntos de control y se realizaban las mediciones de velocidad utilizando los 5 correntómetros que se disponían.



FIGURA 49. Videocámara SONY HDR-CX110, utilizada para la aplicación de LSPIV en campo.

Para el trazado del flujo se utilizaron hojas secas de los árboles que se encontraban a las márgenes del canal (Figura 50), éstas fueron sembradas de una forma general, ya que el ancho del canal así lo permitía, arrojándolas manualmente logrando una mejor dispersión.



FIGURA 50. Hojas de árbol secas utilizadas como trazadores en el canal.

Puntos de Control

La obtención de los puntos de referencia se hizo sobre los muros del canal mediante el uso de nivel y cinta métrica y se muestran en la Tabla II. Los GRP's fueron marcados con pintura en aerosol en color blanco para una fácil localización al momento del

procesamiento. La importancia de éstos radica en poder efectuar la rectificación de las imágenes.

En la figura 51 se muestra una imagen obtenida con la videocámara del flujo superficial en estudio y los GRP's empleados para la rectificación de las imágenes.



FIGURA 51. Imagen instantánea del área de estudio y puntos de control marcados para el cálculo de la geometría y rectificación de la imagen

Punto de Control No.	i	j	x(m)	y(m)
1	1870	653	-0.5	0
2	1743	479	0	0
3	1642	357	0.5	0
4	1563	260	1	0
5	392	267	1.25	2.40
6	310	394	0.6	2.40
7	205	551	0	2.40
8	87	735	-0.5	2.40

Tabla II. Puntos de control (GRP's) y sus coordenadas en la imagen (i, j) y sus correspondientes valores de (x, y) medidas en el terreno.

4.2. Datos de Laboratorio - IMTALAB-

Con el fin de contar con un sistema de Velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escala (LSPIV) para medir la velocidad del flujo superficial en canales y ríos, de una manera rápida, sencilla y a bajo costo, se realizaron en Noviembre del 2011 pruebas en el canal de aforo del modelo hidráulico de la presa “Veladero de Camotlán” en el IMTALAB.

A continuación se presentan las características del sitio así como los datos recogidos, correspondientes a las medidas de velocidades. En este caso las velocidades superficiales en el canal son obtenidos a través de un correntómetro electromagnético Flo-Mate y mediante las imágenes tomadas a partir de la técnica de LSPIV como se verá más adelante.

4.2.1. Descripción del sitio

El modelo utilizado es la presa “Veladero de Camotlan” con escala 1:50 construido en concreto, ubicado dentro del laboratorio de hidráulica IMTALAB que está formado por una gran estructura tipo bodega, por lo tanto no se encuentra expuesto a factores de intemperie como el sol, lluvia, polvo y viento. Se cuenta además con una fuente constante de energía lo que permite la operación de lámparas de halógeno, facilidad de acceso y seguridad para los equipos.

En la Figura 52 se muestra una vista lateral de la estructura del canal, mientras que en la Figura 53 se presenta el esquema en planta y la ubicación de los distintos elementos del canal.

Uno de los canales que presenta el modelo es el de aforo; la forma de la sección del canal es rectangular y está construido en concreto. En este modelo se busca diseñar y poner en operación un sistema de LSPIV capaz de medir velocidades superficiales en ríos y canales, así como diferentes estructuras hidráulicas.



FIGURA 52. Modelo de la presa “Veladero de Camotlán” ubicado dentro de las instalaciones del IMTALAB.

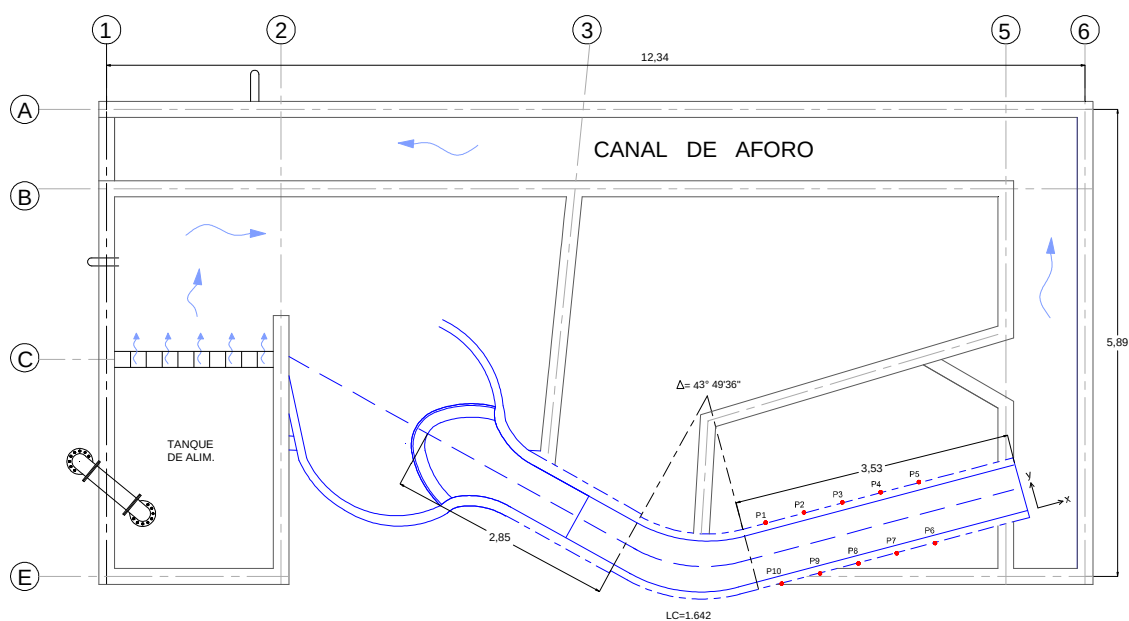


FIGURA 53. Esquema en planta del modelo de la presa “Veladero de Camotlán”.

4.2.2. Montaje y diseño del sistema

Para lograr una captura de imágenes adecuadas para el procesamiento de imágenes con LSPIV, y lograr así obtener un campo de velocidades óptimo, se realizaron una serie de modificaciones al modelo: se colocó un lecho de tierra en el fondo del canal (Figura 54), esto con el fin de corregir el problema relacionado con formas de fondo que son capturadas en la imágenes las cuales daban como resultado vectores erróneos, se instalaron tubos de PVC de 1 1/2" de diámetro en forma de panal para direccionar el flujo (Figura 55) con el fin de obtener un flujo representativo al de un canal, ya que el modelo cuenta con un cambio brusco de dirección de 90°, se colocó una malla-sombra sobre el modelo para evitar la refracción sobre la superficie libre del flujo, todo esto con el fin de lograr un medio controlado óptimo para las pruebas con LSPIV. Durante las modificaciones del modelo se realizaron mediciones del LSPIV, las cuales serán discutidas en el siguiente capítulo.



FIGURA 54. a) Fondo del canal antes de colocar el lecho de tierra; b) Fondo de canal con lecho de tierra con el fin de uniformizar la forma del mismo.

Para las mediciones se montó la cámara de video sobre un trípode de aluminio el cual se dispuso sobre el centro del canal, colocado sobre una estructura rígida tal como se ilustra en la Figura 56. En esta ocasión, de la misma forma de la campaña realizada en campo descrita en la sección anterior, se decidió trabajar con la cámara SONY HDR-CX110.



FIGURA 55. Direccionadores de flujo a la entrada del canal de aforo.

El equipo de cómputo para la captura y procesamiento en este caso, corresponde a una computadora portátil marca Gateway. Otros elementos usados fueron reflectores de luz halógena, una extensión eléctrica, un correntómetro electromagnético Flo-mate y la cámara de video digital.

En las imágenes tomadas en el laboratorio, se simulaban condiciones de trazadores, añadiendo elementos artificiales, se utilizaron 4 tipos de materiales, Poliestireno expandido, confeti de papel, cartón y Bio-bolas (esferas de plástico utilizadas en tanques de acuarios para la siembra de bacterias biofiltrantes), que flotan sobre la superficie del agua. Al mismo tiempo que se añadían trazadores al flujo en la superficie, se crearon imágenes con una velocidad de 60 imágenes por segundo durante 10 segundos y con una resolución de 1020x1080 píxeles. De esta manera para cada caso de trazador se tienen alrededor de 600 imágenes instantáneas.

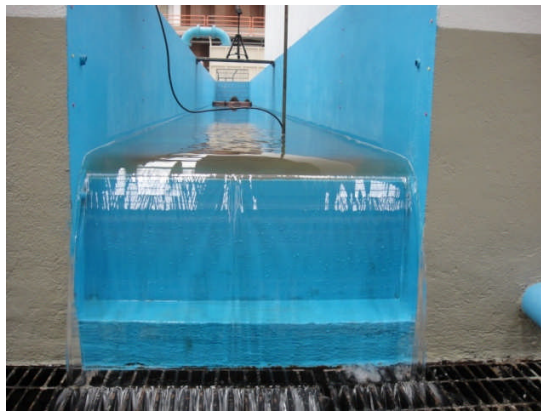
En la Figura 57 se presentan, a manera de ejemplo, las imágenes de los 4 tipos de trazadores utilizadas en el procesamiento, construidas a partir de imágenes instantáneas adquiridas a una velocidad de 60 imágenes por segundo.



(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA 56. Montaje del sistema de toma de datos. (a) y (c) Correntómetro electromagnético Flo-Mate. (b) y (d) Trípode y ubicación de la cámara y equipo de computo de captura, así como la lámpara de luz halógena.

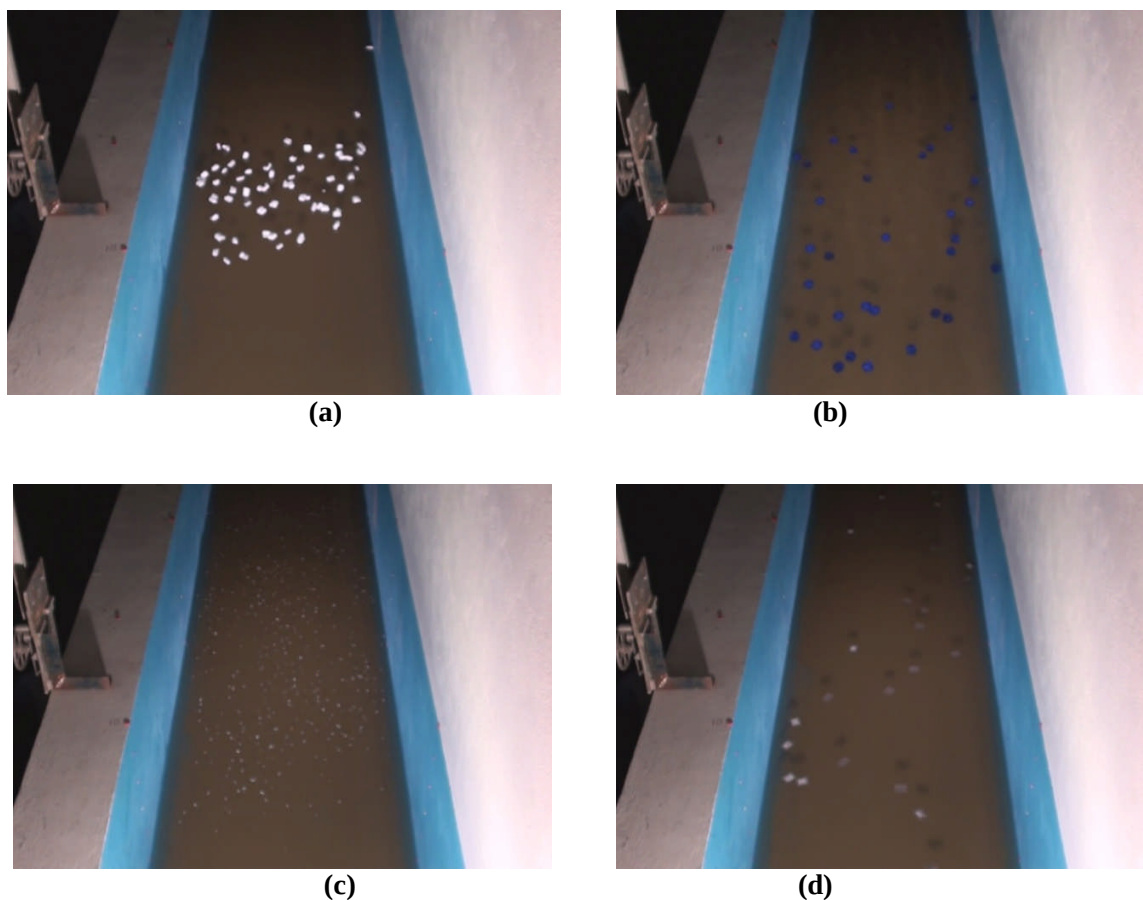


FIGURA 57. Imágenes de trazadores utilizados en la técnica de LSPIV. (a) Esferas de poliestireno expandido, (b) Bio-bolas, (c) Confeti de papel y (d) Cartón.

4.2.3. Toma de datos, puntos de control y rectificación de las imágenes

Para una posición fija de la cámara, se tomaron 6 puntos de control distribuidos a lo largo y ancho del canal (ver Figura 58) de manera que el proceso de rectificación de la imagen resultara lo más fiable posible. El origen de coordenadas planas se tomó en el punto de referencia No. 1, con el eje “Y” positivo hacia arriba en la imagen y el eje “X” positivo hacia aguas abajo (siguiendo la dirección del flujo, que corre hacia la derecha de la Figura 58). Para el levantamiento de estos puntos se usó una cinta métrica y una regla graduada

aprovechando las características geométricas simples del canal y una marcación de distancias previas con pintura con las que ya se contaba en el canal.

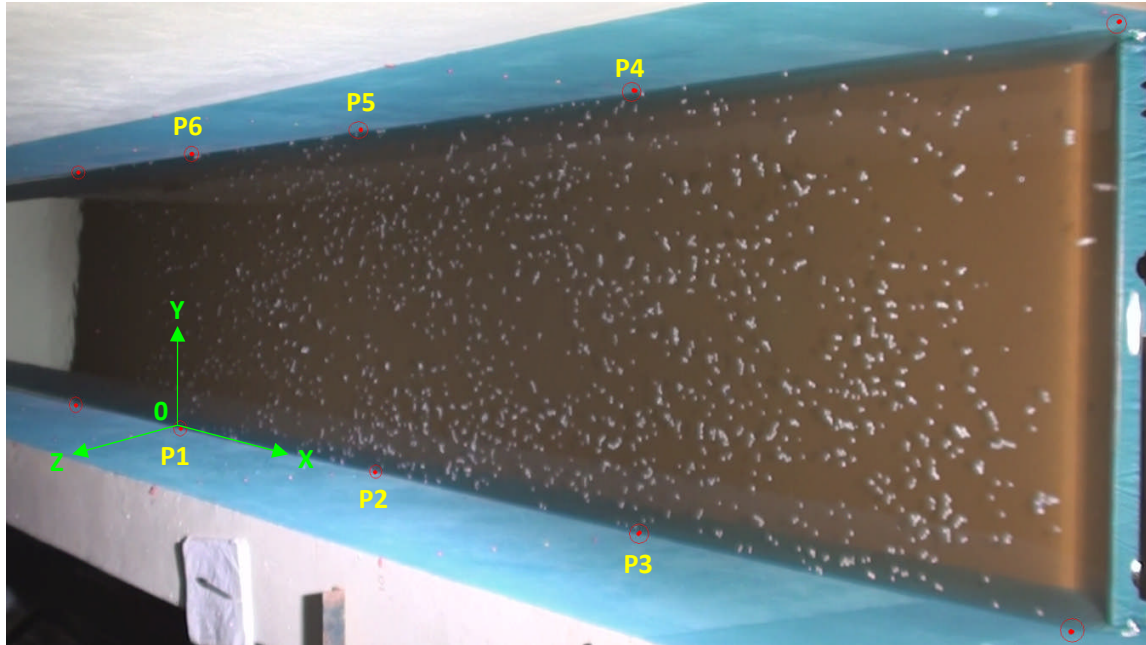


FIGURA 58. Puntos de control considerados para el proceso de ortorectificación de las imágenes.

En la tabla III se presentan las coordenadas (u, v) de cada uno de los puntos de control identificados sobre las imágenes y sus correspondientes coordenadas reales, (x, y), medidas directamente sobre el canal.

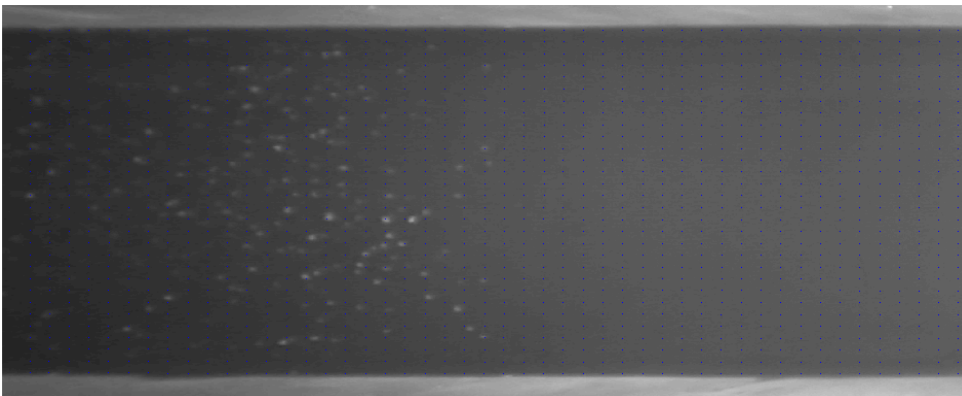
Punto de control No.	I	j	x(m)	y(m)
1	705	79	0	0
2	646	446	1	0
3	546	1053	2	0
4	1306	1056	2	0.75
5	1221	451	1	0.75
6	1166	82	0	0.75

Tabla III. Puntos de control y sus coordenadas en la imagen (i, j) y sus correspondientes valores de (x, y) medidas en el modelo de laboratorio.

En la Figura 59 se presenta un ejemplo de una imagen del canal de laboratorio de hidráulica y su correspondiente imagen rectificada obtenida a partir de los puntos de control, cuyas coordenadas (u, v) y (x, y) se presentan en las tablas III.



(a)



(b)

FIGURA 59. Imagen instantánea (a) y su correspondiente imagen orto rectificada (b) obtenida durante el experimento utilizando confeti como trazador.

CAPÍTULO 5

Análisis y resultados.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en la campaña de campo y las pruebas realizadas en laboratorio, se muestran los alcances del método así como los rangos de aplicación de la técnica de LSPIV diseñada y puesta en operación como objetivo de este proyecto.

Como lo mencionan algunos autores (Kim 2006; Muste et al., 2008) existe una gran variedad de factores que afectan las mediciones con la técnica de LSPIV. Errores son generados en todas las etapas de medición, es decir, condiciones de iluminación, cantidad y distribución de trazadores, hasta el procesamiento.

Los resultados mostrados son los arrojados por el programa de Mat_LSPIV programado en su totalidad en MatLab,

5.1. Resultados y discusión de la campaña de campo

Los resultados obtenidos de Mat_LSPIV de la campaña realizada en la Reserva Ecológica “Las Estacas”, en el Estado de Morelos, con el fin de desarrollar y poner en operación un sistema de velocimetría por imágenes de partículas a gran escala de campo se discuten a continuación.

A pesar de no contar con materiales flotantes en la superficie libre del flujo para ser utilizados como trazadores, se logró añadir hojas secas las cuales se encontraban al margen del canal, la siembra de estos trazadores sustitutos se hizo de una forma homogénea con las manos, esto se permitió dado el ancho del canal (2.1 metros), en el caso de ríos o canales mas grandes el proceso de sembrado tendría que ser puntual, teniendo el problema de no lograr una dispersión adecuada de trazadores y por lo tanto áreas en la imágenes con vectores erroneos. Para evitar problemas de refracción de luz e imágenes inmóviles sobre la superficie libre, el área de estudio se dispuso sobre la parte inferior del puente vehicular, arrojando los siguientes resultados.

En las siguientes gráficas se muestran los resultados obtenidos del procesamiento de imágenes con Mat_LSPIV, así como los resultados obtenidos con los velocímetros puntuales.

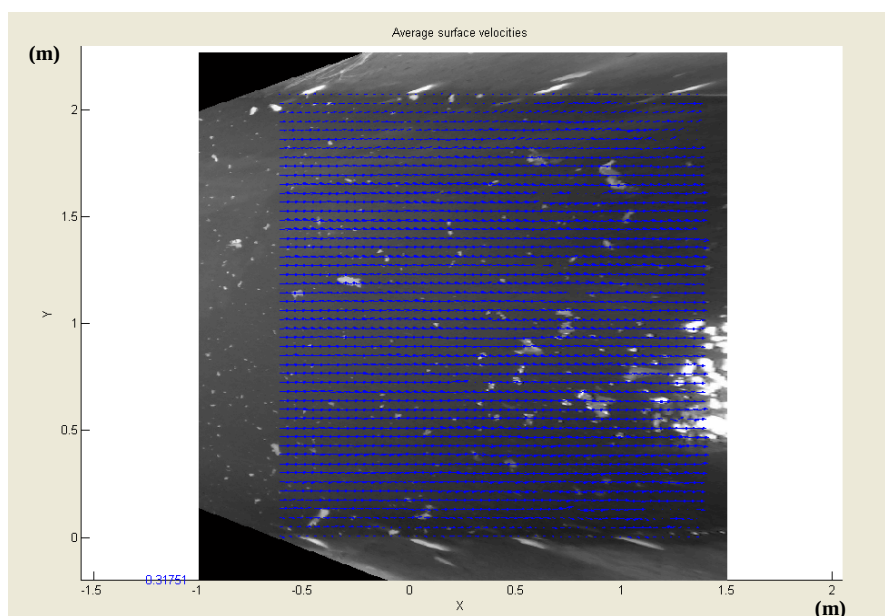


FIGURA 60. Vectores de velocidades obtenidas con Mat_LSPIV del canal en estudio.

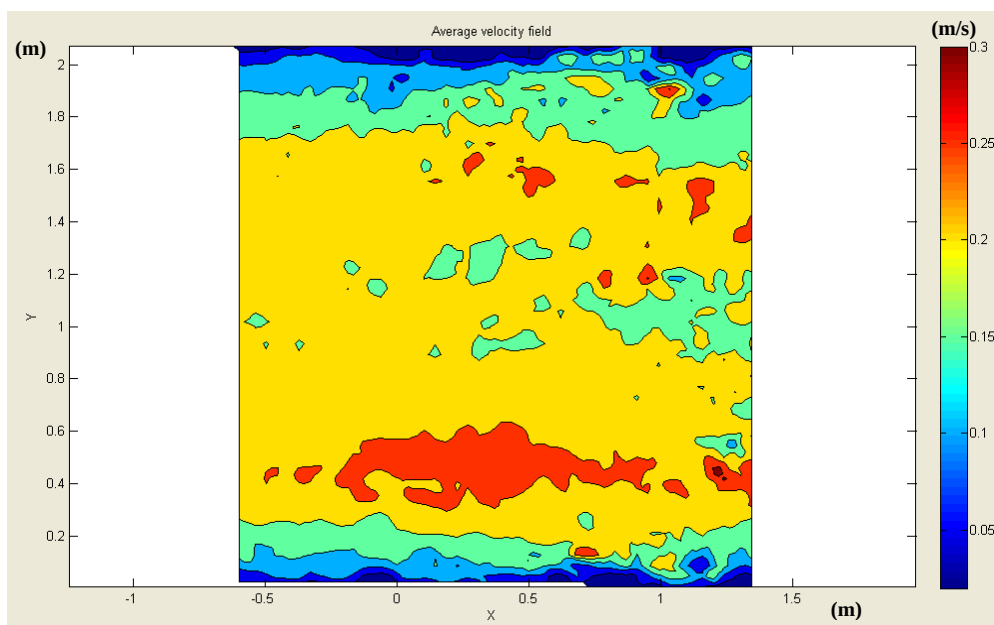


FIGURA 61. Mapa de velocidades obtenidas con Mat_LSPIV del canal en estudio.

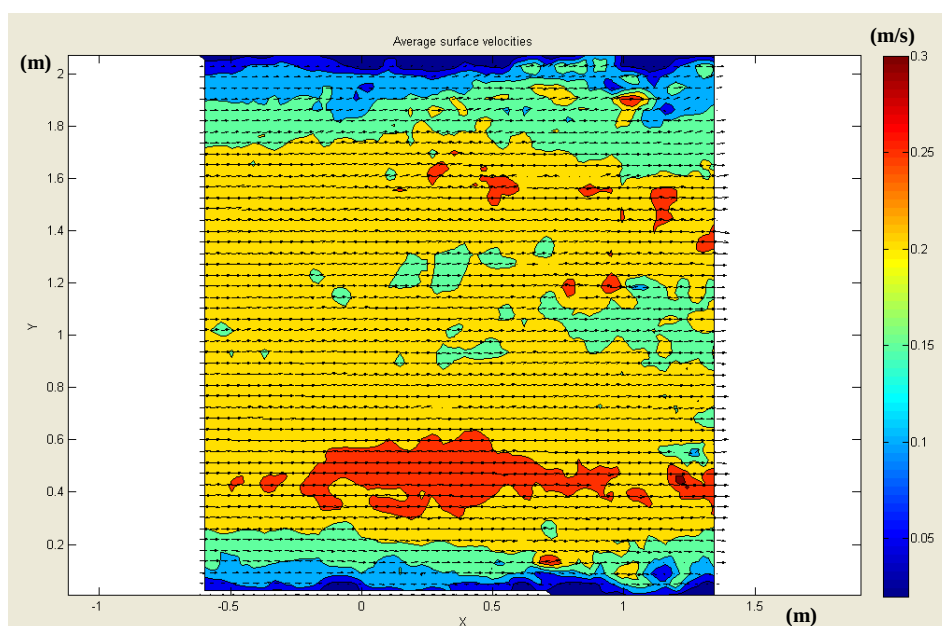


FIGURA 62. Mapa de velocidades con vectores obtenidas con Mat_LSPIV .

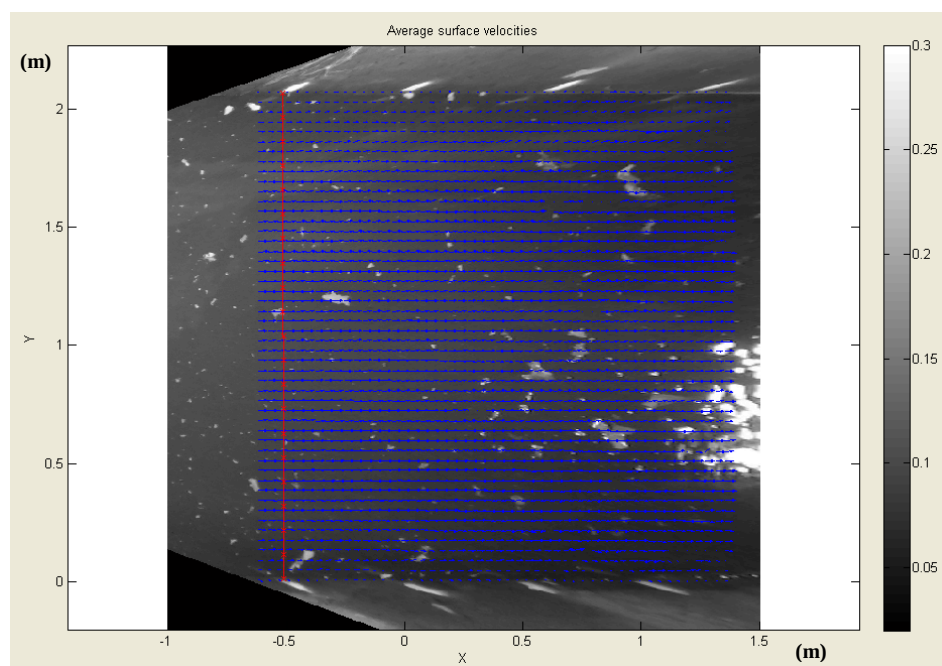


FIGURA 63. Sección transversal del perfil de velocidades obtenidas con Mat_LSPIV.

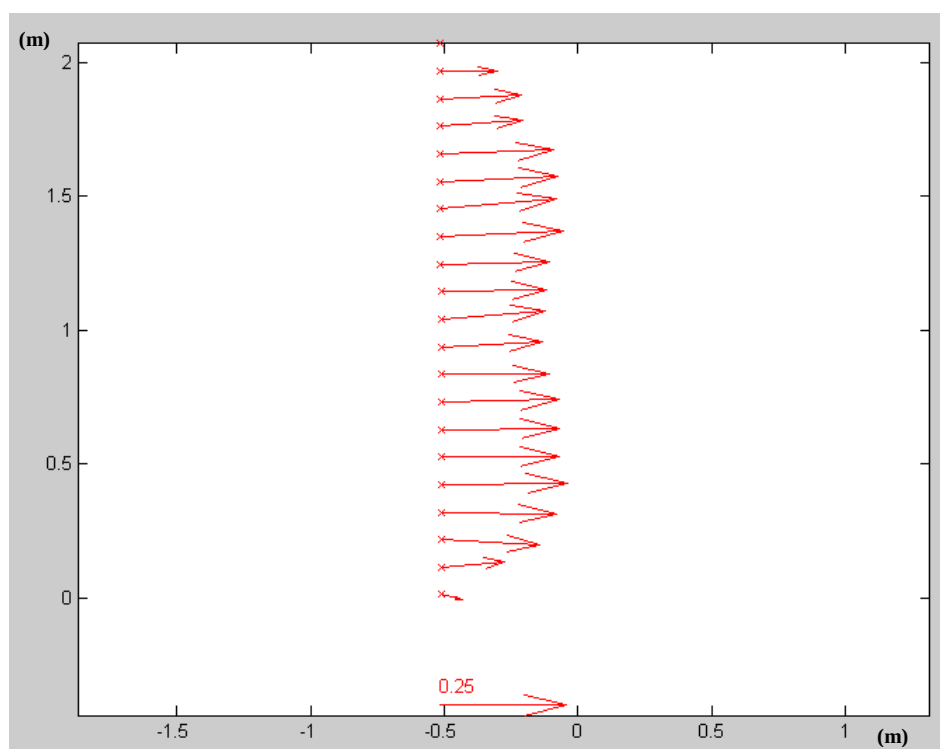


FIGURA 64. Perfil de velocidades obtenidas con Mat_LSPIV del canal en estudio.

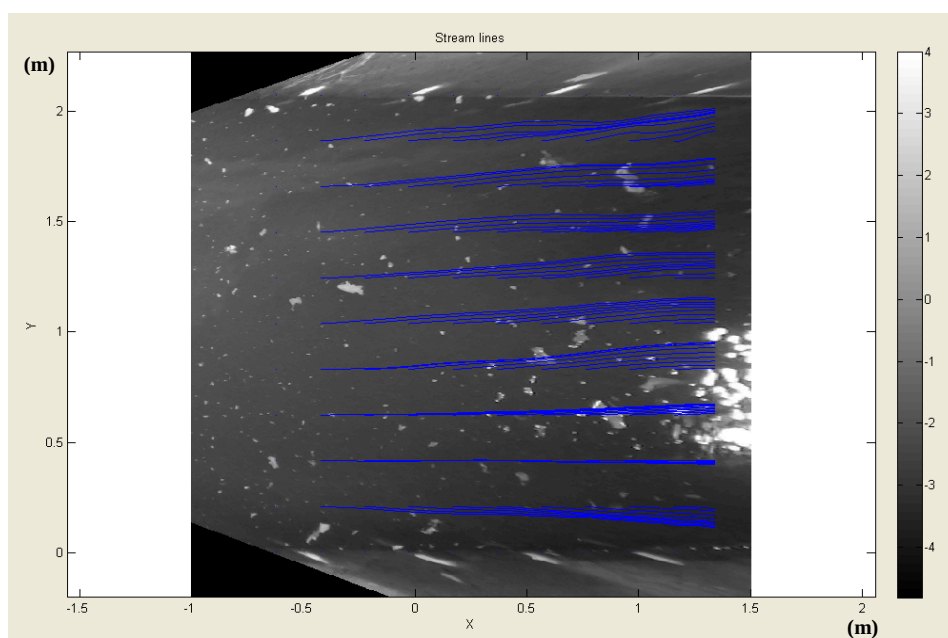


FIGURA 65. Líneas de corriente obtenidas con Mat_LSPIV del canal en estudio.

Se obtuvieron cuatro perfiles de velocidades de los datos arrojados en por el procesamiento, los cuales son almacenados en block de notas, los perfiles fueron en -0.5, 0.0, 0.5 y 1.0 del eje x (ver figura 70).

En la tabla IV se muestran las velocidades para los 4 perfiles, estos datos fueron extraídos del block de notas que arroja el programa una vez procesadas las imágenes.

Distancia	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4
(m)	Vel. (m/s)	Vel. (m/s)	Vel. (m/s)	Vel. (m/s)
0.1	0.137	0.159	0.221	0.238
0.2	0.170	0.189	0.208	0.216
0.3	0.204	0.214	0.226	0.258
0.4	0.251	0.249	0.266	0.225
0.5	0.233	0.260	0.260	0.246
0.6	0.232	0.243	0.246	0.220
0.7	0.241	0.226	0.229	0.207
0.8	0.225	0.220	0.221	0.210
0.9	0.198	0.200	0.190	0.199
1.0	0.196	0.215	0.210	0.194
1.1	0.218	0.257	0.203	0.197
1.2	0.212	0.201	0.225	0.248
1.3	0.227	0.236	0.192	0.210
1.4	0.241	0.218	0.208	0.244
1.5	0.226	0.235	0.249	0.251
1.6	0.232	0.245	0.256	0.201
1.7	0.197	0.199	0.194	0.170
1.8	0.168	0.159	0.191	0.230
1.9	0.146	0.090	0.201	0.288
2.0	0.108	0.124	0.130	0.164

Tabla IV. Datos de velocidades para perfiles.

A continuación se muestran las gráficas de los datos obtenidos para los cuatros perfiles de velocidades que arrojó el procesamiento con Mat_LSPIV

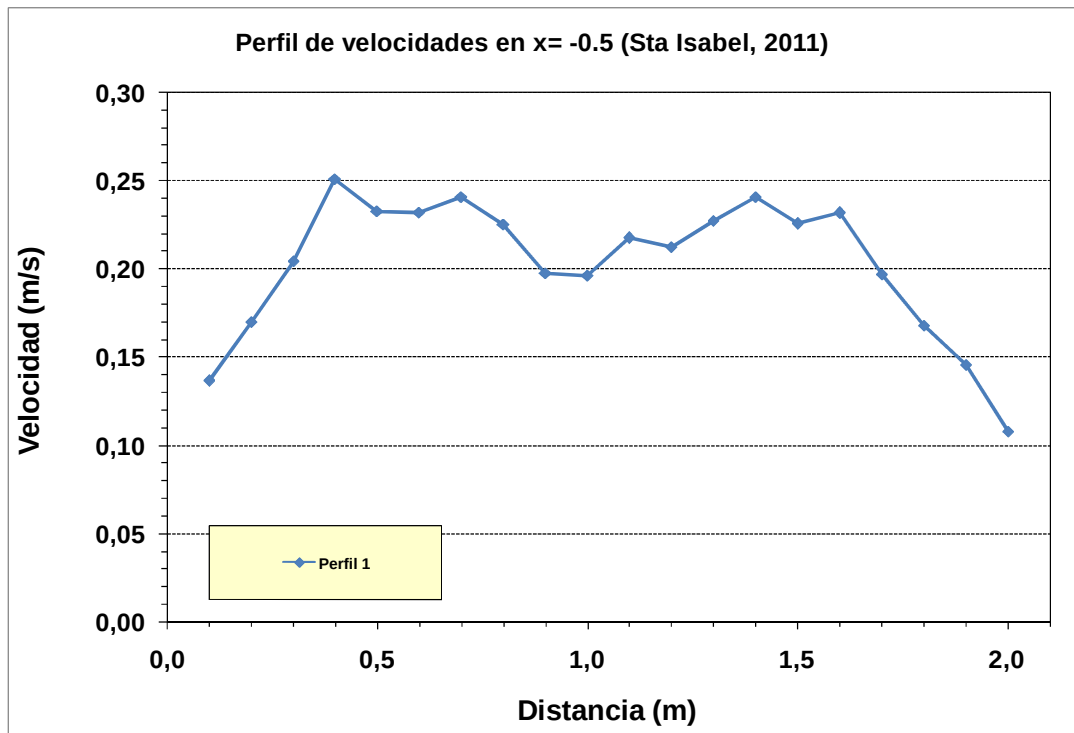


FIGURA 66. Perfil de velocidades en la en el eje $x = -0.5$ extraído de los resultados en block de notas del procesamiento con Mat_LSPIV del canal en estudio.

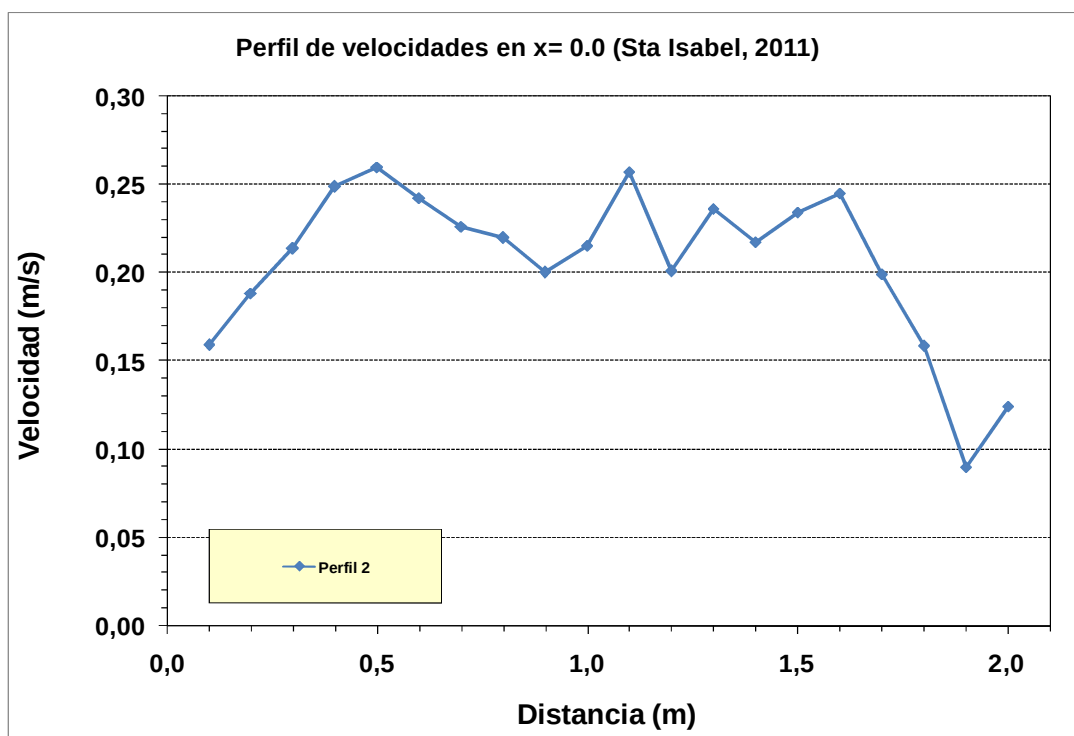


FIGURA 67. Perfil de velocidades en la en el eje $x = 0.0$ extraído de los resultados en block de notas del procesamiento con Mat_LSPIV del canal en estudio.

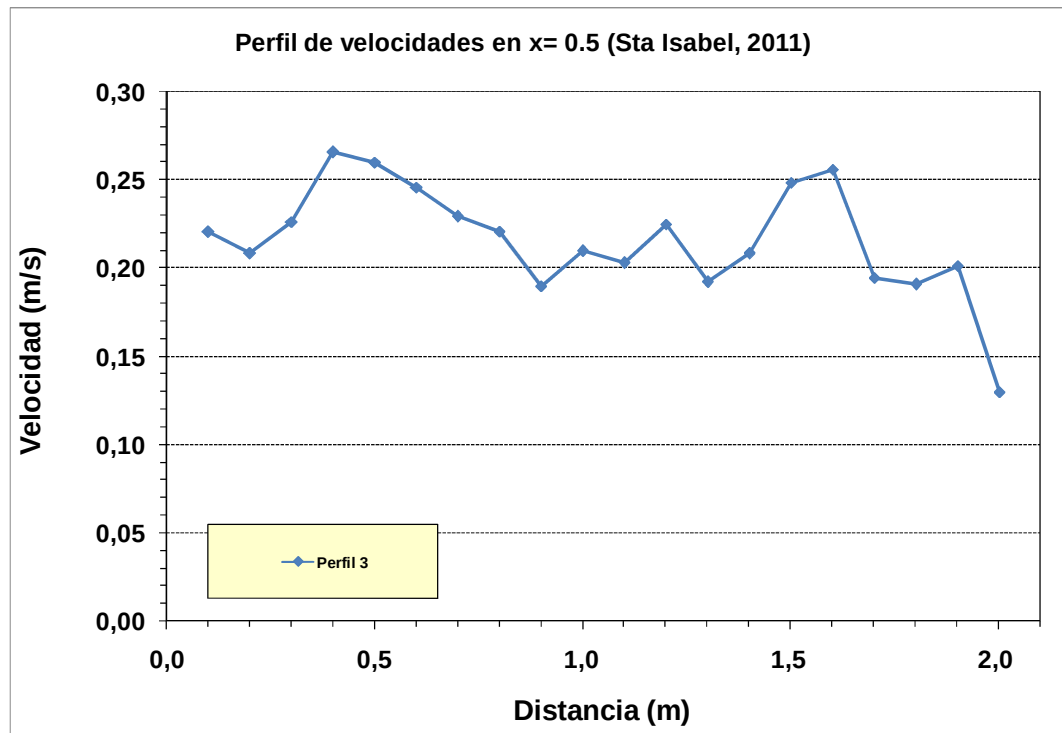


FIGURA 68. Perfil de velocidades en la en el eje $x = 0.5$ extraído de los resultados en block de notas del procesamiento con Mat_LSPIV del canal en estudio.

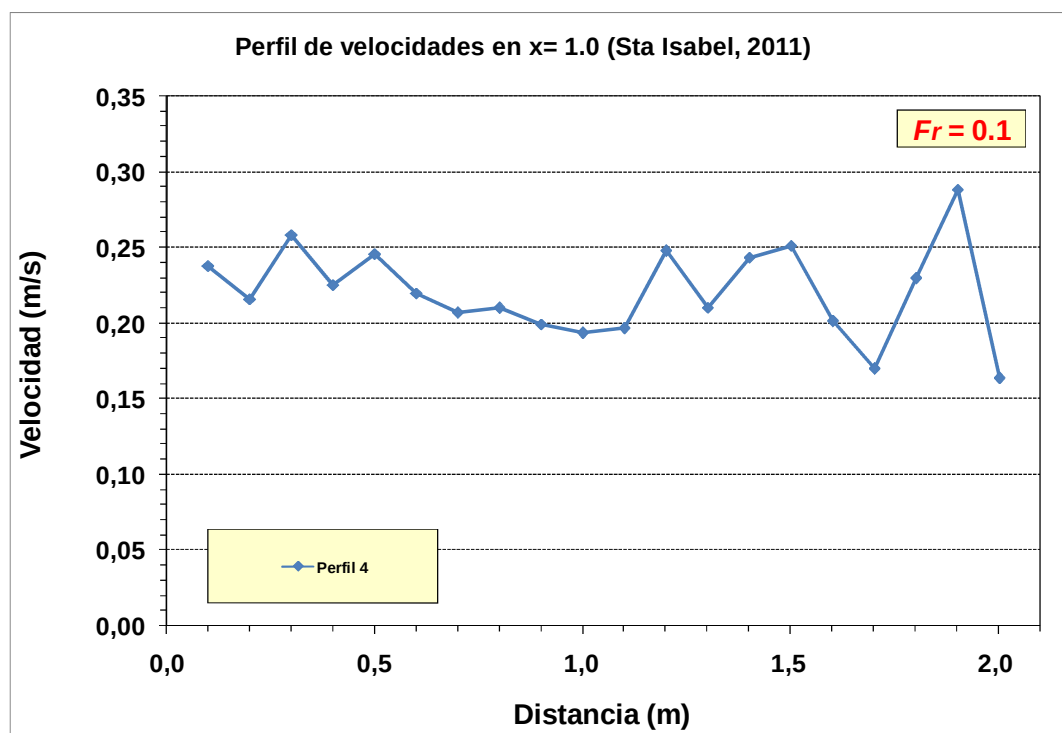


FIGURA 69. Perfil de velocidades en la en el eje $x = 1.0$ extraído de los resultados en block de notas del procesamiento con Mat_LSPIV del canal en estudio.

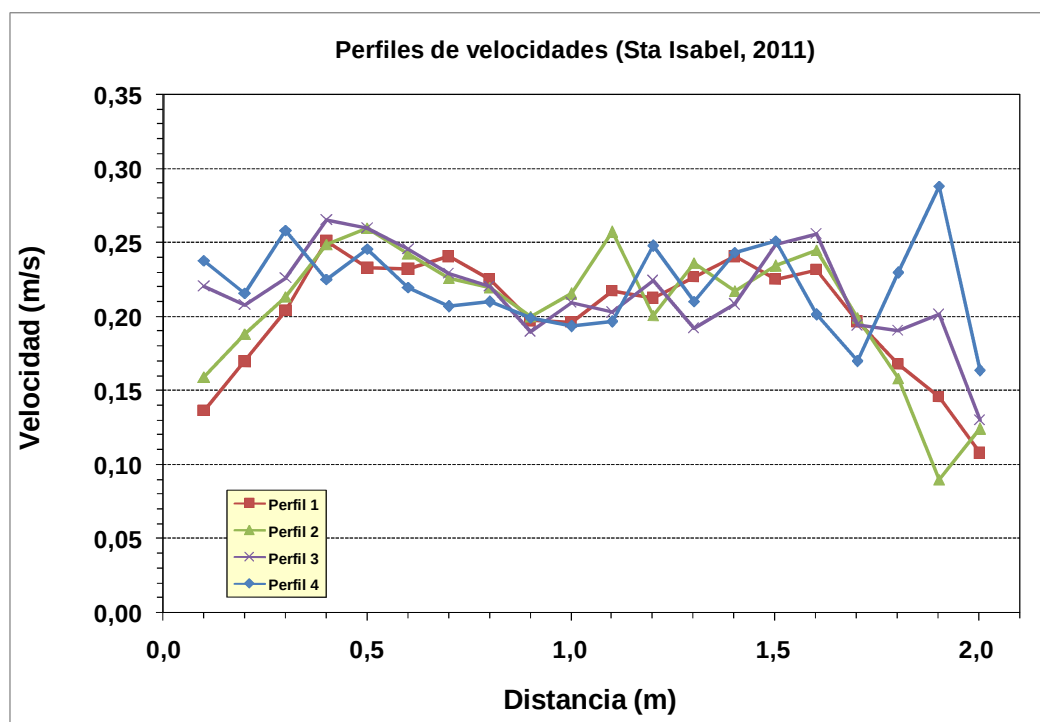


FIGURA 70. Perfiles de velocidades extraído de los resultados en block de notas del procesamiento con Mat_LSPIV del canal en estudio.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los velocímetros o correntómetros utilizados para la comparación con las mediciones de LSPIV.

En la tabla V se muestran las velocidades obtenidas con los cinco velocímetros puntuales en la sección de -0.5 en el eje x.

Distancia (m)	Flomate 2	Flomate 2	Flow Tracker 1	Flow Tracker 1	ADC OTT	ADC OTT	Flomate 1	Flomate 1	Flow Tracker 2	Flow Tracker 2
	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)
0.10	0.140	0.150			0.150	0.145	0.150	0.140		
0.20	0.140	0.140	0.151	0.151	0.160	0.145	0.140	0.160	0.150	0.151
0.30	0.160	0.150	0.142	0.171	0.167	0.175	0.160	0.150	0.184	0.168
0.40	0.170	0.170	0.178	0.194	0.166	0.191	0.180	0.180	0.168	0.175
0.50	0.180	0.190	0.177	0.184	0.185	0.188	0.170	0.190	0.187	0.194
0.60	0.170	0.170	0.172	0.163	0.179	0.175	0.180	0.170	0.176	0.192
0.70	0.160	0.160	0.167	0.150	0.182	0.186	0.180	0.170	0.157	0.158
0.80	0.140	0.140	0.151	0.131	0.163	0.143	0.150	0.130	0.144	0.136
0.90	0.140	0.140	0.148	0.149	0.147	0.158		0.140	0.127	0.138
1.00	0.150	0.140	0.148	0.160	0.157	0.142	0.140	0.130	0.155	0.143
1.10	0.160	0.140	0.162	0.162	0.163	0.147	0.170	0.150	0.153	0.155
1.20	0.180	0.180	0.155	0.179	0.173	0.150	0.180	0.170	0.171	0.165
1.30	0.180	0.180	0.176	0.172	0.184	0.184	0.180	0.180	0.184	0.169
1.40	0.180	0.180	0.193	0.179	0.179	0.188	0.180	0.190	0.188	0.187
1.50	0.170	0.180	0.183	0.187	0.197	0.185	0.180	0.180	0.183	0.183
1.60	0.170	0.180	0.175		0.190	0.164	0.180	0.160	0.171	0.158
1.70	0.150	0.160	0.154	0.171	0.179	0.175	0.170	0.160	0.163	0.133
1.80	0.140	0.130	0.136	0.152	0.161	0.142	0.130	0.140	0.129	0.135
1.90	0.130	0.120	0.116		0.143	0.139	0.130	0.130	0.123	0.113
2.00	0.110	0.130	0.119	0.125	0.137	0.128	0.130	0.140	0.125	0.127

Tabla V. Datos de velocidades de los 5 velocímetros puntuales.

En la figura 71 se muestran las gráficas de los datos obtenidos para los 5 velocímetros.

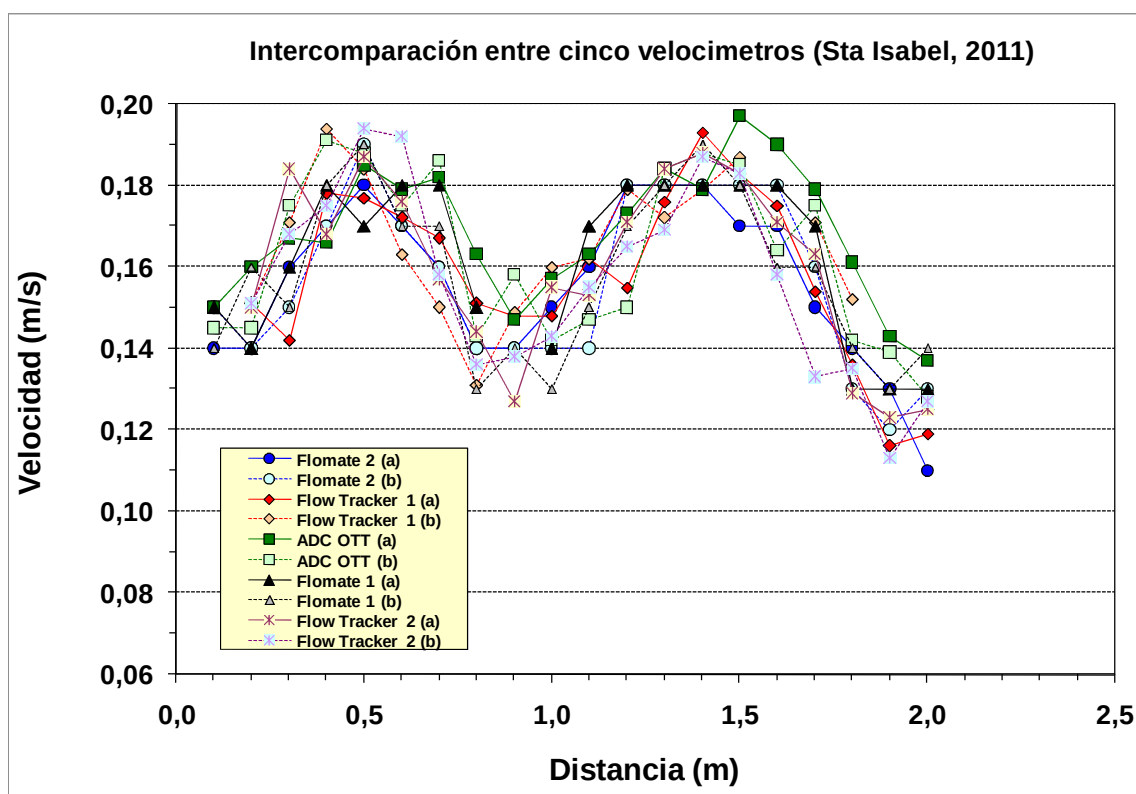


FIGURA 71. Perfiles de velocidades obtenidos a partir de 5 velocímetros en la sección $x=-0.5$ del canal en estudio.

De los datos obtenidos con los velocímetros se calculó el promedio, mediana y desviación estándar arrojando los siguientes datos, estos resultados servirán para hacer una comparación con los resultados obtenidos con el procesamiento de LSPIV,

En la tabla VI se muestran el promedio, Mediana y desviación estándar de los valores obtenidos por los velocímetros en el perfil de $x=-.05$.

Distancia (m)	Mediana	Promedio	Desvest
	(m/s)	(m/s)	(m/s)
0.10	0.148	0.146	0.005
0.20	0.151	0.149	0.008
0.30	0.164	0.163	0.013
0.40	0.177	0.177	0.009
0.50	0.186	0.185	0.007
0.60	0.174	0.175	0.008
0.70	0.164	0.167	0.012
0.80	0.142	0.143	0.010
0.90	0.140	0.143	0.009
1.00	0.146	0.147	0.009
1.10	0.158	0.156	0.009
1.20	0.172	0.170	0.011
1.30	0.180	0.179	0.005
1.40	0.184	0.184	0.005
1.50	0.183	0.183	0.007
1.60	0.171	0.172	0.010
1.70	0.162	0.162	0.014
1.80	0.138	0.140	0.010
1.90	0.130	0.127	0.010
2.00	0.128	0.127	0.008

Tabla VI. Datos de velocidades promedio, Mediana y desviación estándar de los 5 velocímetros puntuales.

En la figura 72 se muestran las gráficas de los datos obtenidos en la gráfica anterior.

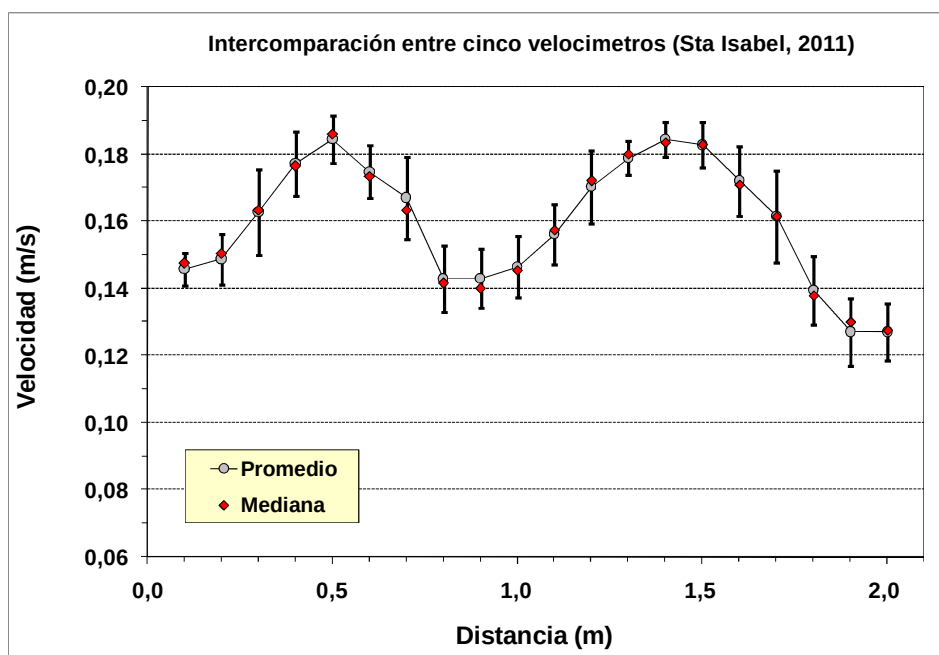


FIGURA 72. Grafica de las velocidades promedio y mediana entre los 5 velocímetros puntuales.

La comparación entre las velocidades obtenidas con la técnica de LSPIV y el promedio de velocidades obtenidas con los velocímetros o correntómetros se muestra en la figura 73.

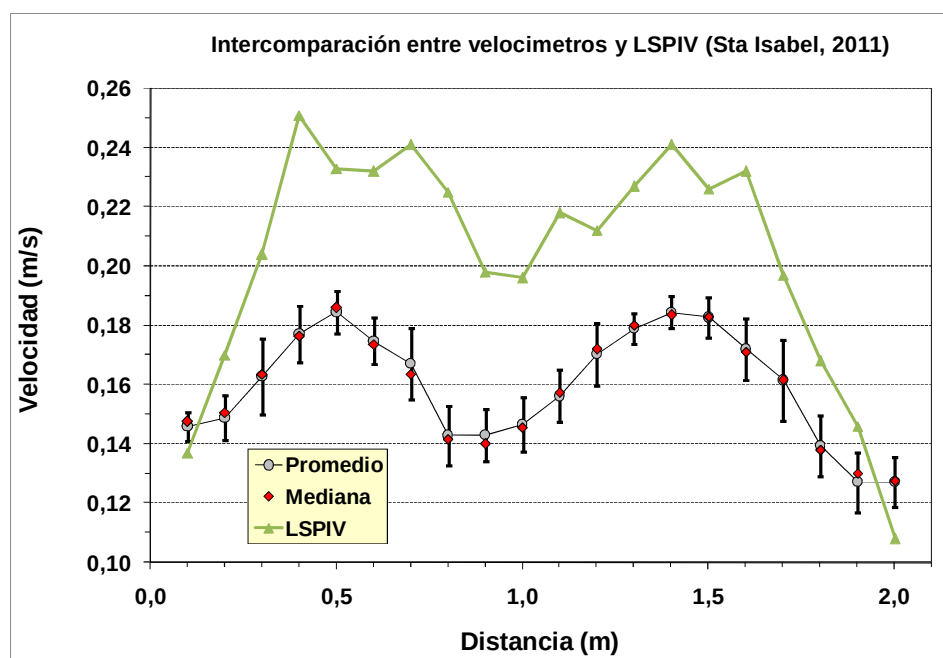


FIGURA 73. Perfiles de velocidades obtenidos con Mat_LSPIV y del promedio de velocidades obtenidas con los velocímetros puntuales en la sección del canal en estudio.

Como se puede observar la forma de los dos perfiles de velocidades obtenidos mediante la técnica de LSPIV y el obtenido con velocímetros puntuales o correntómetros mantienen la misma tendencia en cuanto a la distribución de las velocidades a lo largo de perfil, sin embargo las diferencia mostradas en cuanto las magnitudes pueden ser debidas a que las mediciones con LSPIV son superficiales, por lo tanto se requiere una calibración al sitio para encontrar una relación entre las velocidades medias y superficiales.

Con esta prueba se logro diseñar y poner en operación un sistema de bajo costo capaz de medir velocidades superficiales en un canal en campo, sin embargo es necesario seguir realizando pruebas tales como la medición de incertidumbre y probar otros tipos de trazadores.

5.2. Resultados y discusión de la campaña de laboratorio

Los resultados obtenidos de Mat_LSPIV de las pruebas realizadas en IMTALAB, con el fin de desarrollar y poner en operación un sistema de velocimetría por imágenes de partículas a gran escala de laboratorio se discuten a continuación.

5.2.1. Pruebas de LSPIV en ambientes sin controlar

Las primeras pruebas realizadas con LSPIV fueron en un ambiente sin controlar, no se disponía de un fondo uniforme, la iluminación fue con la luz solar, no se colocó ningún tipo de sombra o protección para los reflejos, lo que nos arrojó los siguientes resultados.

En la Figura 74 se puede observar dos grupos de reflejos producidos por la iluminación que se filtra por los tragaluces colocados en el techo del laboratorio, estos reflejos se presentan en las imágenes como rasgos inmóviles, que al momento de ser procesados, dan como resultados vectores espurios como se puede observar en las Figuras 75 y 76.

Estos resultados demuestran una de las grandes limitantes de la técnica, ya que en campo no siempre se cuenta con dispositivos o herramientas necesarias para proteger la superficie de estos fenómenos de iluminación y refracción de luz.

Uno de los problemas más difíciles de controlar para la aplicación de la técnica de LSPIV son estos reflejos inmóviles que se proyectan sobre la superficie, una forma de eliminar estos patrones podría ser utilizando filtros ópticos en las cámaras de video.



FIGURA 74. Imagen del canal sin modificaciones para ser procesada en la cual se observan reflejos estáticos sobre la superficie.

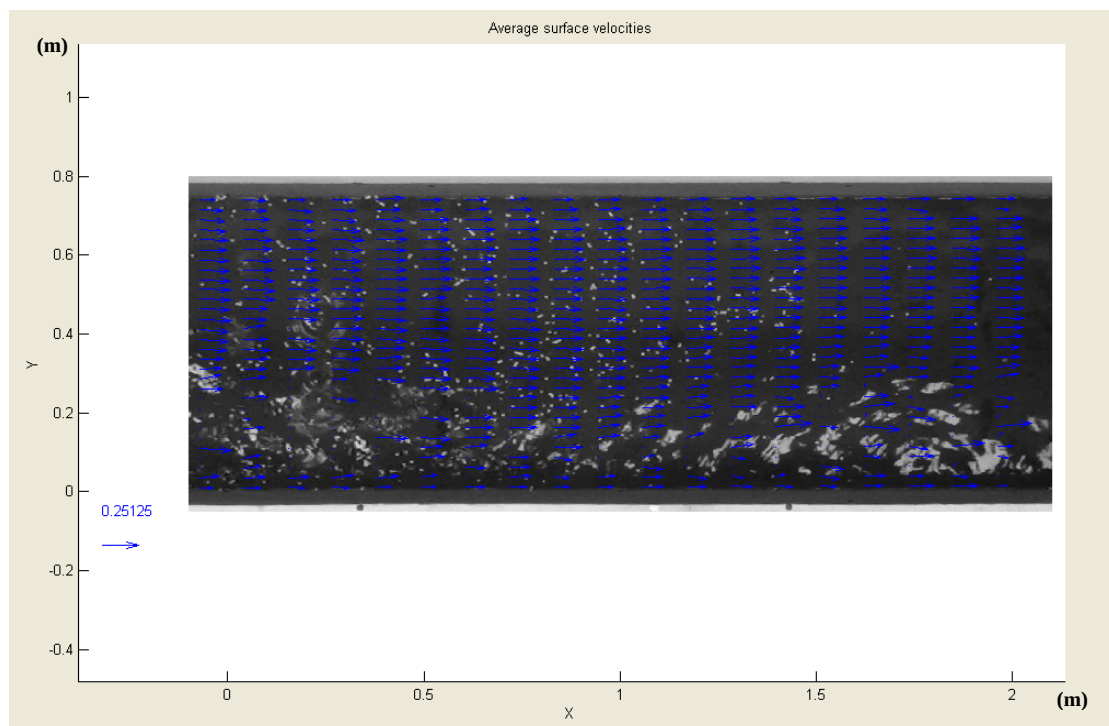


FIGURA 75. Vectores de velocidad obtenidos del procesamiento con Mat_LSPIV del canal sin modificaciones

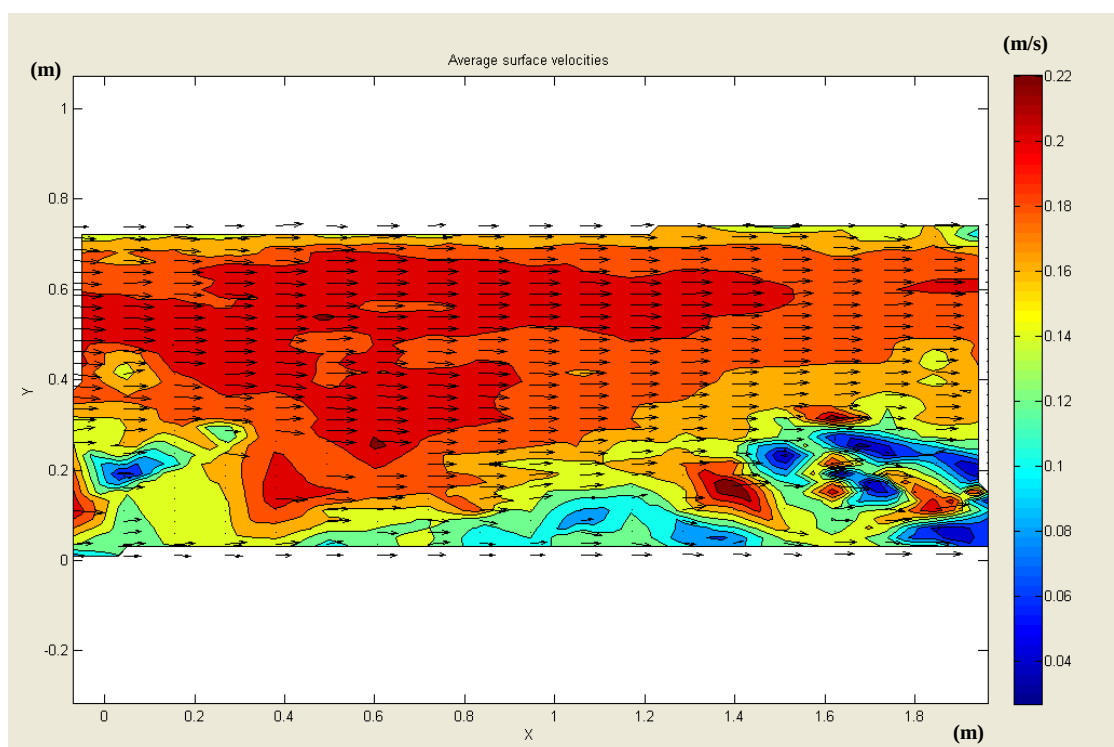


FIGURA 76. Campos de velocidad obtenidos del procesamiento con Mat_LSPIV del canal sin modificaciones

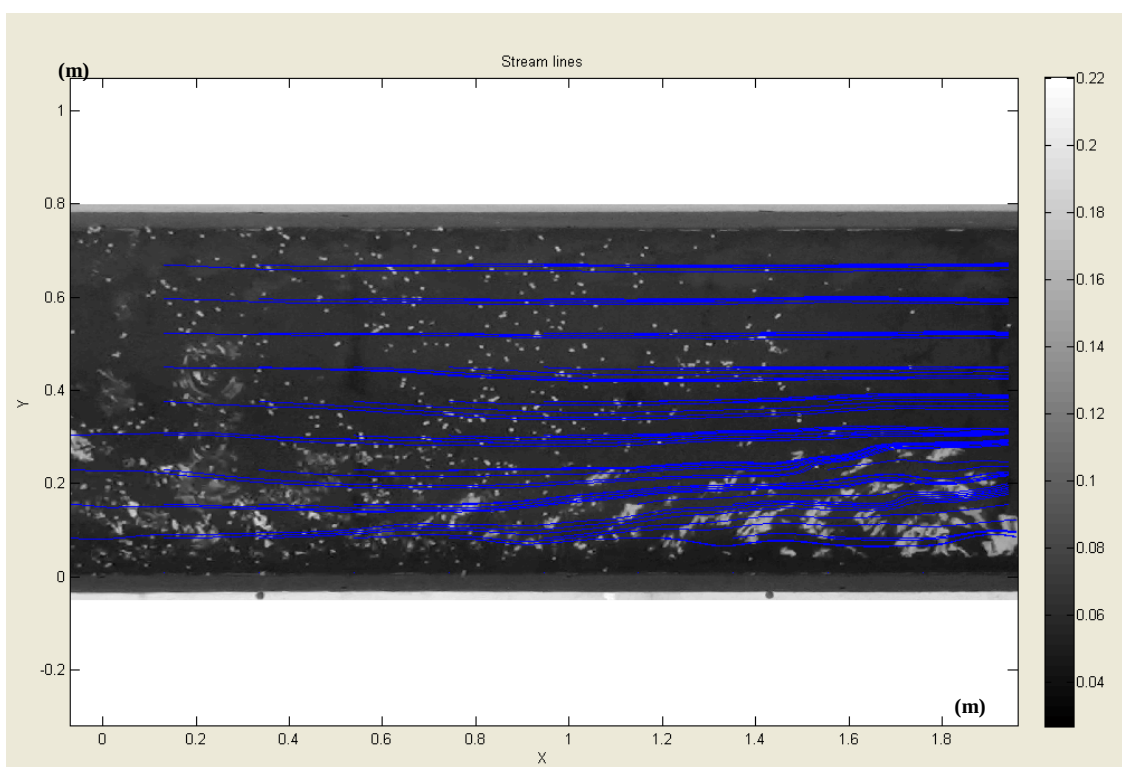


FIGURA 77. Líneas de flujo obtenidas del procesamiento con Mat_LSPIV del canal sin modificaciones

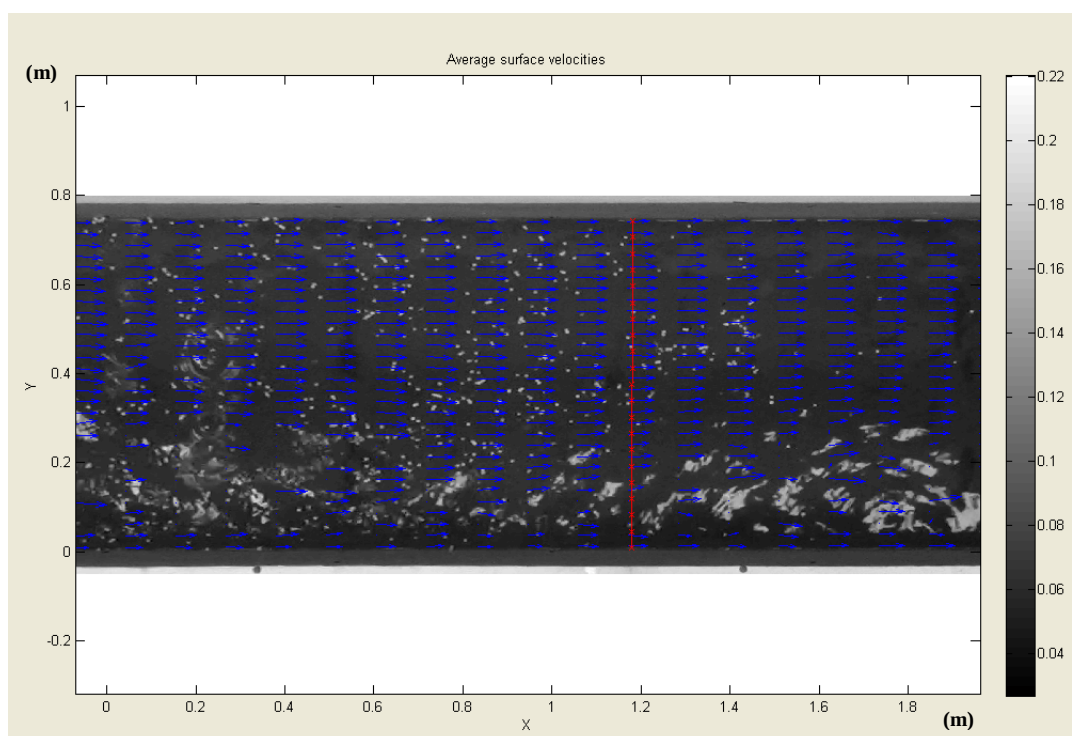


FIGURA 78. Perfil transversal de velocidades obtenido del procesamiento con Mat_LSPIV canal sin modificaciones.

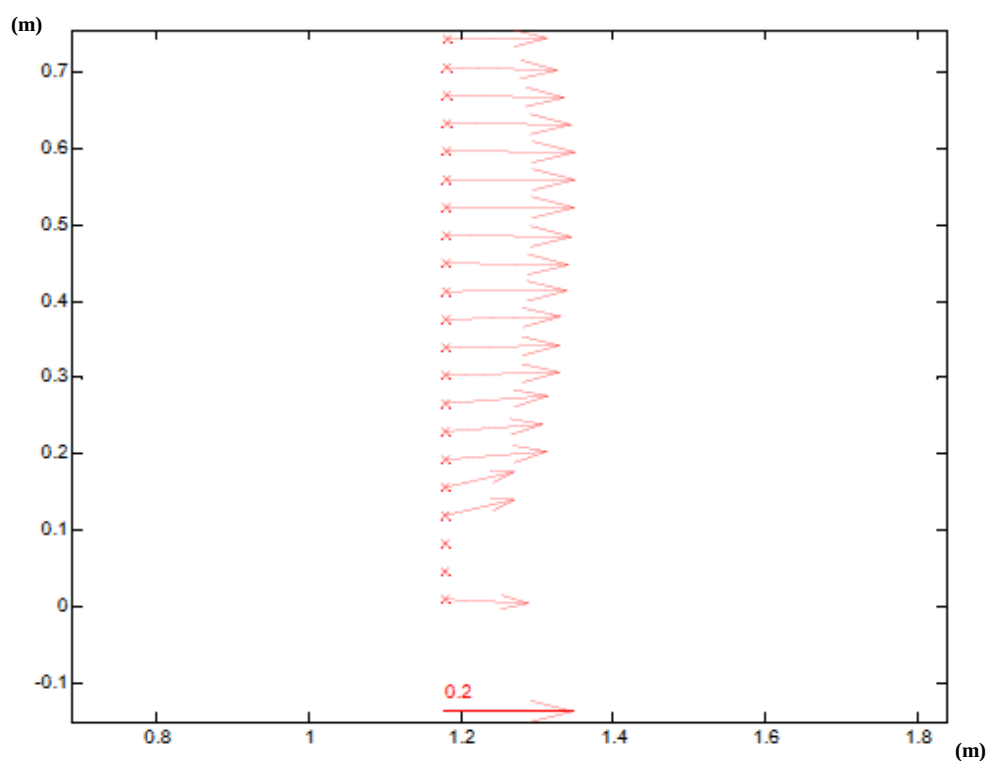


FIGURA 79. Vectores del perfil transversal de velocidades obtenidas del procesamiento con Mat_LSPIV del canal sin modificaciones

5.2.2. Pruebas de trazadores aplicados a la técnica de LSPIV

Las pruebas de trazadores fueron realizadas en un ambiente controlado, donde la textura del fondo, la iluminación y los reflejos sobre la superficie del agua fueron manipulados para lograr un procesamiento eficiente con LSPIV, dichos resultados se muestran a continuación.

5.2.2.1. Siembra con cartón como partículas trazadoras.

Los resultados de la siembra con partículas de cartón se muestran en la Figura 80, durante la siembra se pudo observar que el cartón absorbe rápidamente el agua, y modifica su densidad aumentándola por encima a la del fluido, por lo tanto se sumerge y da como resultado vectores erróneos.

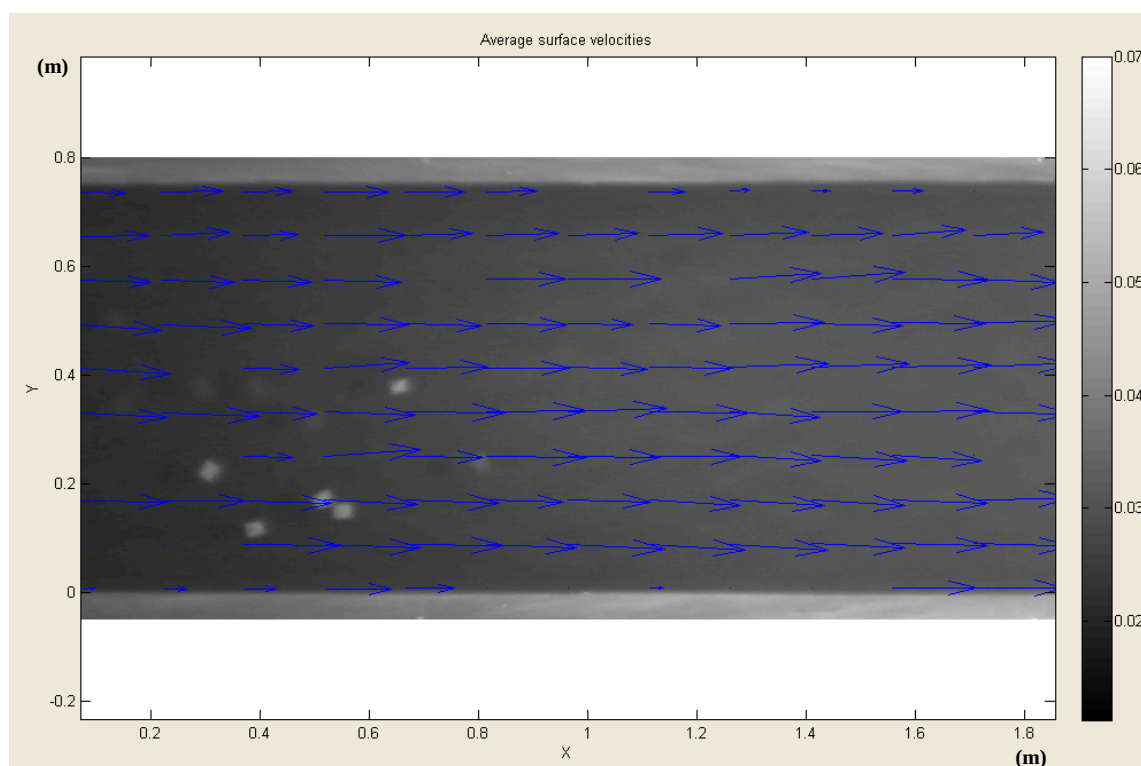


FIGURA 80. Vectores de velocidad obtenidos de las pruebas con partículas de cartón utilizadas como trazadores artificiales en el modelo hidráulico del IMTALAB.

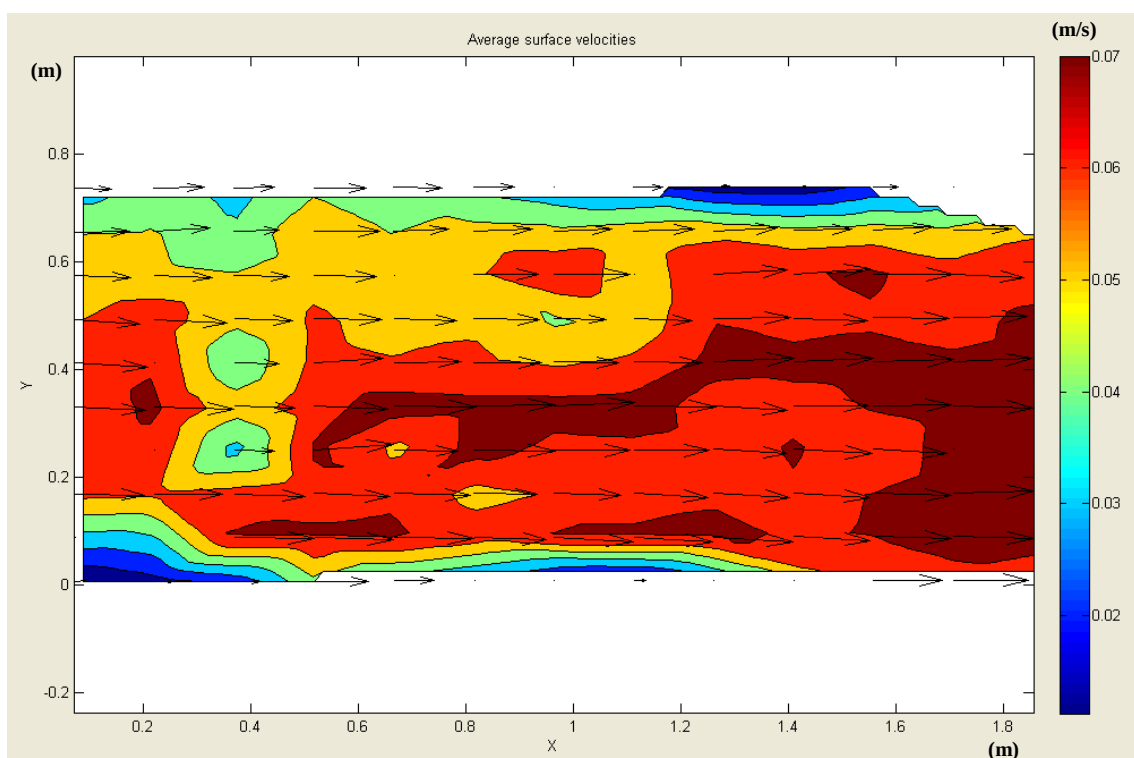


FIGURA 81. Campo de velocidad obtenido de las pruebas con partículas de cartón utilizadas como trazadores artificiales en el modelo hidráulico del IMTALAB.

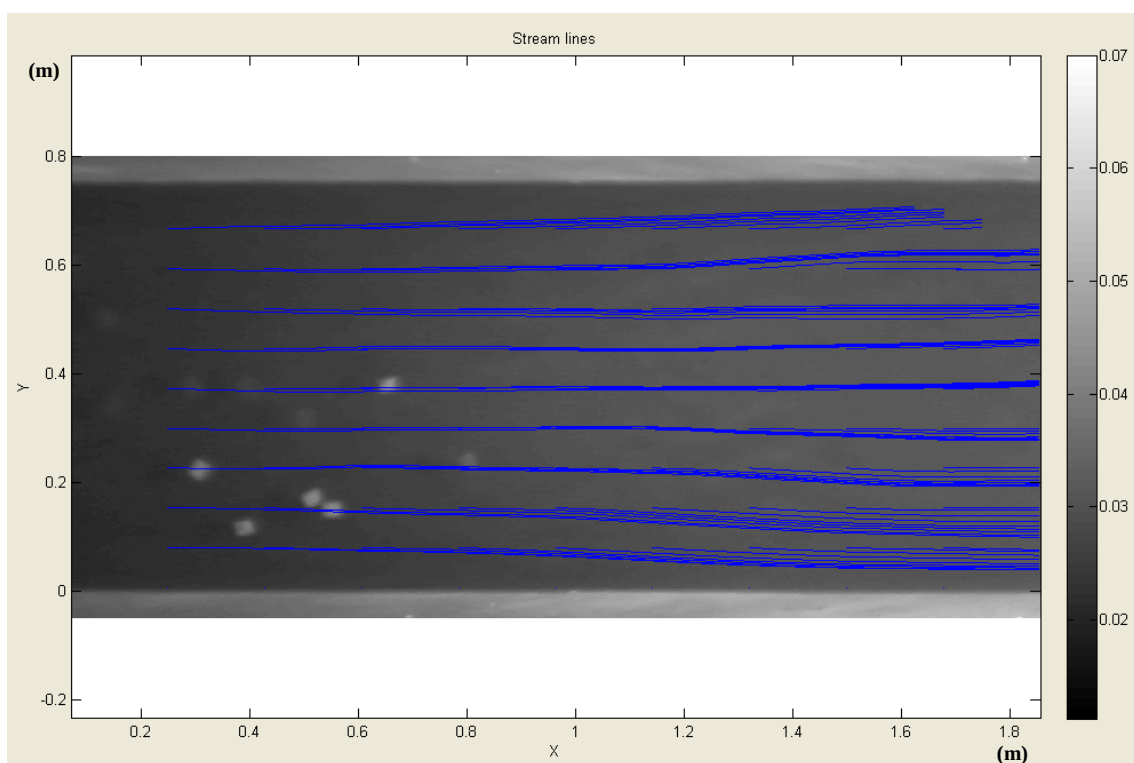


FIGURA 82. Líneas de flujo obtenidas de las pruebas con partículas de cartón utilizadas como trazadores artificiales en el modelo hidráulico del IMTALAB.

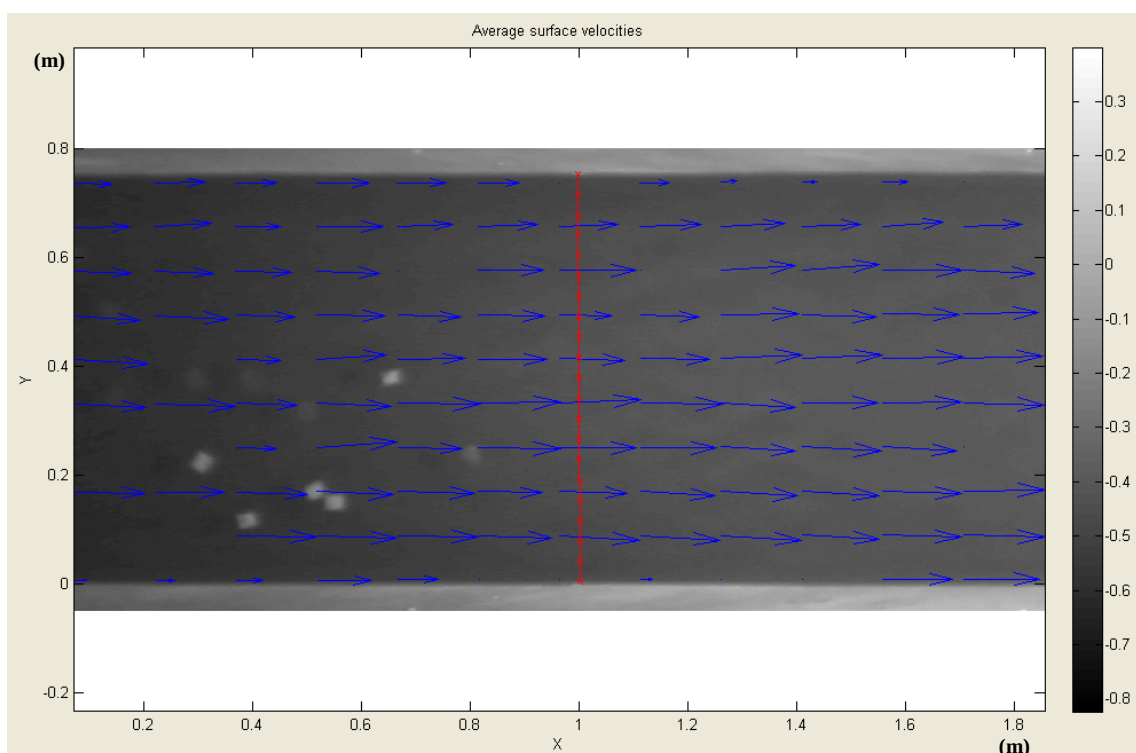


FIGURA 83. Perfil transversal de velocidades obtenido de las pruebas con partículas de cartón utilizadas como trazadores artificiales en el modelo hidráulico del IMTALAB.

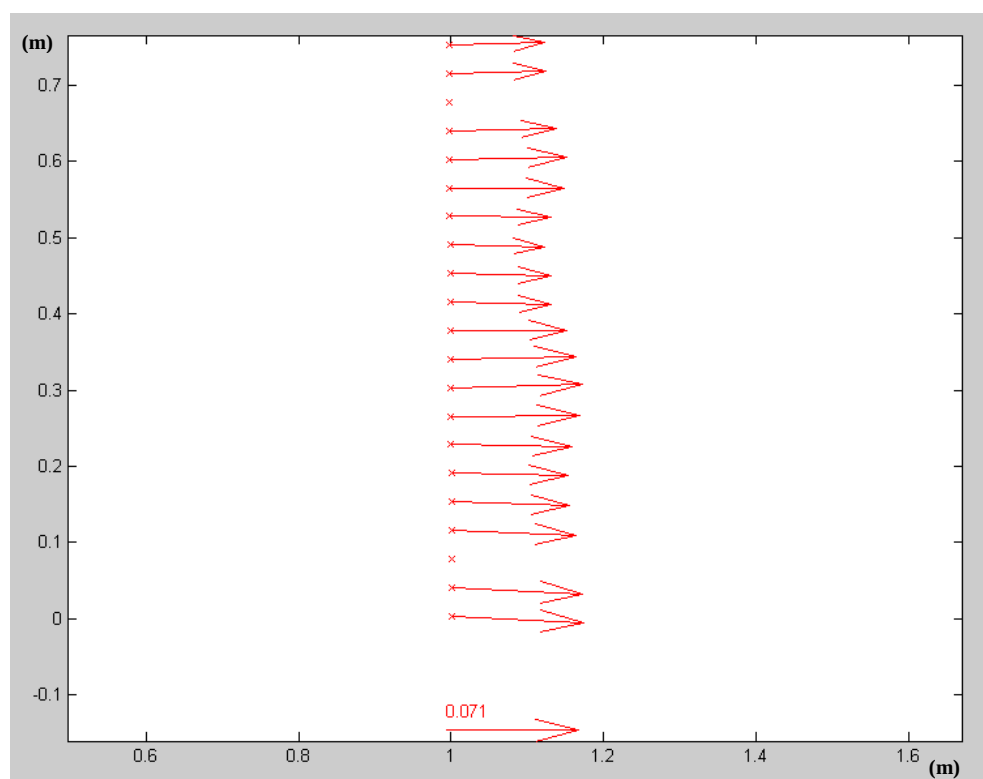


FIGURA 84. Perfil transversal de velocidades obtenidos de las pruebas con partículas de cartón utilizadas como trazadores artificiales en el modelo hidráulico del IMTALAB.

Los resultados de utilizar trazadores de cartón demuestran que no es un trazador ideal, primeramente no es un material que refleje la luz con una intensidad adecuada, no sigue las líneas de corriente superficiales, aunque cumple con la necesidad de ser un material biodegradable, los resultados en el perfil de velocidades demuestran una disimetría con los medidos con los demás materiales y vectores espurios.

5.2.2.2 Siembra con poliestireno como partículas trazadoras..

Los resultados de la siembra con partículas de poliestireno extendido se muestran en la figura 80, durante la siembra se pudo observar que el poliestireno extendido tiene una densidad muy por debajo de la del agua, por tal motivo su flotación es muy alta, permitiendo esto que la mayoría de su volumen se encuentre fuera del fluido y que el aire y la capa límite puedan interactuar con él, esto nos lleva a el procesamiento de vectores espurios, otro problema que presenta el poliestireno es la carga electromagnética, la cual da lugar a la interacción entre las partículas y las paredes del canal, dando como resultado lecturas falsas a las del flujo.

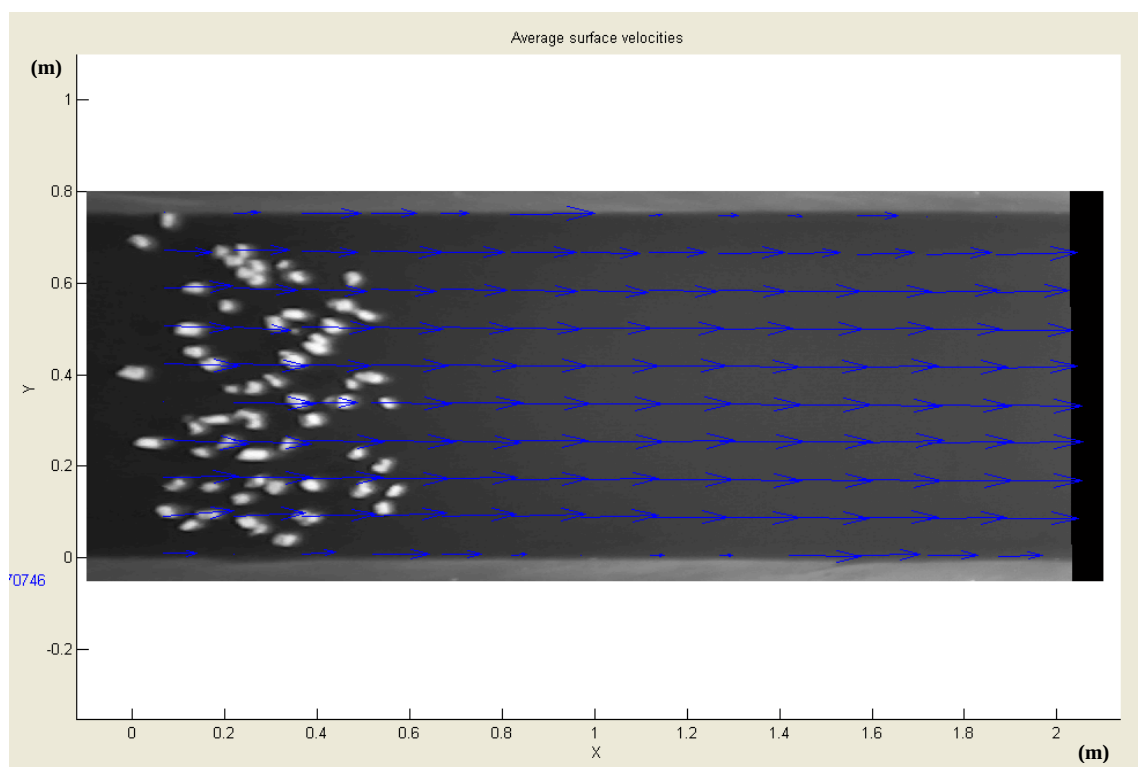


FIGURA 85. Vectores de velocidad obtenidos de las pruebas con partículas de poliestireno utilizadas como trazadores artificiales en el modelo hidráulico del IMTALAB.

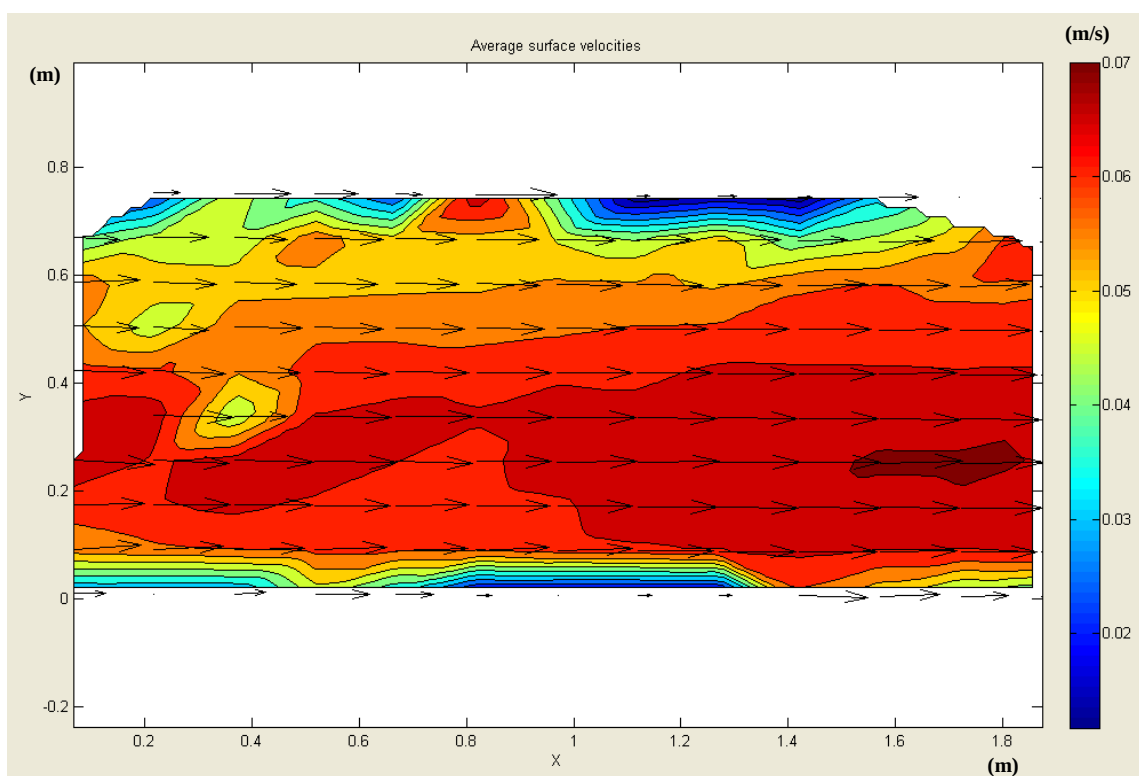


FIGURA 86. Campo de velocidad obtenido de las pruebas con partículas de poliestireno utilizadas como trazadores artificiales en el modelo hidráulico del IMTALAB.

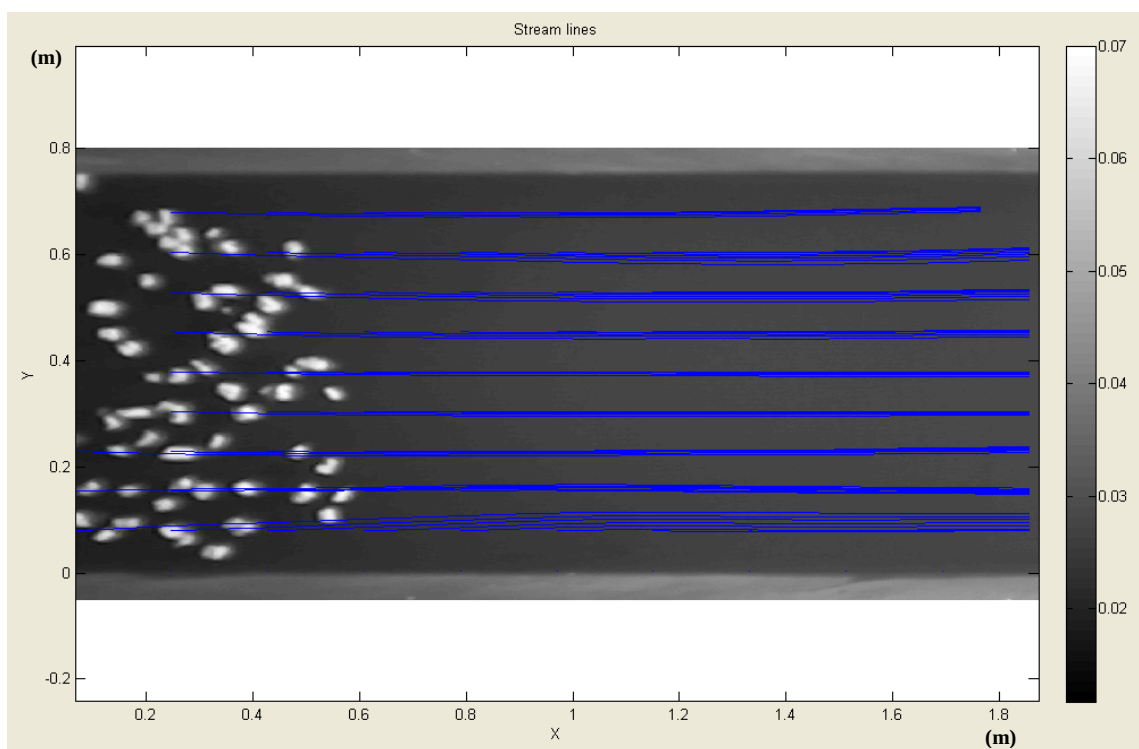


FIGURA 87. Líneas de flujo obtenidas de las pruebas con partículas de poliestireno utilizadas como trazadores artificiales en el modelo hidráulico del IMTALAB.

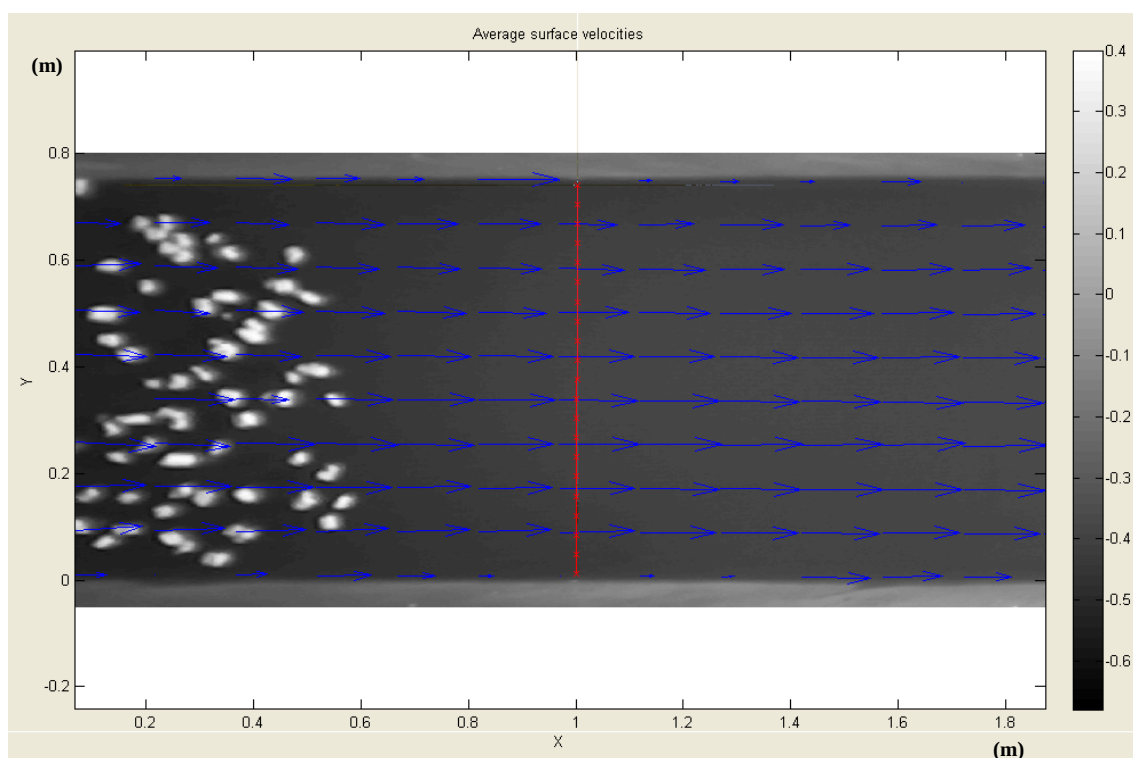


FIGURA 88. Perfil transversal de velocidades obtenido de de las pruebas con partículas de poliestireno utilizadas como trazadores artificiales en el modelo hidráulico del IMTALAB.

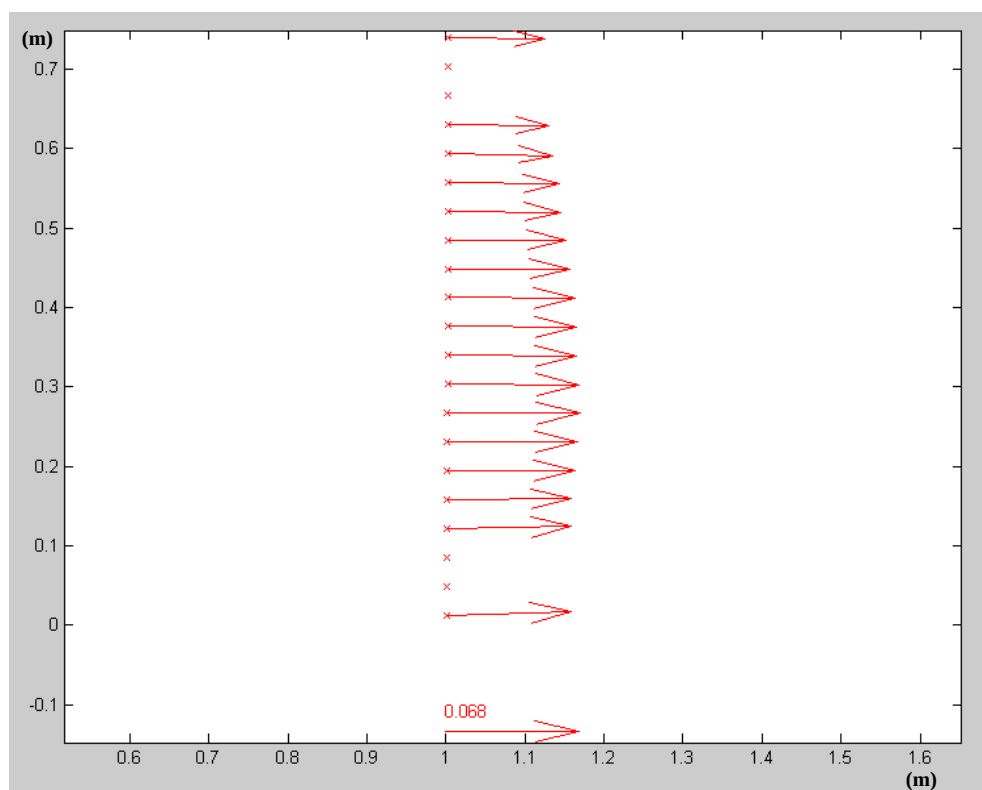


FIGURA 89. Perfil transversal de velocidades obtenidos de las pruebas con partículas de poliestireno utilizadas como trazadores artificiales en el modelo hidráulico del IMTALAB.

Los resultados de utilizar el poliestireno como trazadores demuestran al igual que con el cartón no es un trazador ideal, el principal problema de utilizar este material es la carga electrostática que produce interacciones entre las partículas y las paredes del canal, aunado a eso su baja densidad permite que la mayoría del volumen de la partícula se encuentre por encima del flujo, interactuando con fenómenos naturales como el viento y la capa límite del fluido, aunque cumple con la necesidad de ser un material que refleja la luz idealmente, los resultados en el perfil de velocidades muestran una gran cantidad de vectores espurios.

5.2.2.3 Siembra con biobolas como partículas trazadoras.

En esta prueba se utilizaron biobolas, que son esferas perforadas o ranuradas de plástico que son utilizadas en los acuarios para la siembra de bacterias biofiltrantes, durante las pruebas se pudo observar que debido a la rugosidad podía seguirse las líneas de flujo adecuadamente, otra ventaja que presentaban estos trazadores era la densidad muy por debajo a la del fluido, lo que permitía que la mayor parte de ella se encontrara sumergida, no mostraron interacción entre ellas debido a cargas electrostáticas ni con las paredes del modelo, lamentablemente no se dispuso de biobiolas de color blanco que permitiesen reflejar adecuadamente la luz, la cual es una característica muy importante en este tipo de trazadores, un aspecto importante observado durante las mediciones es la forma como seguían la trayectoria del flujo, ya que las biobolas no rotaban sobre su eje, y podían seguir el flujo a unos milímetros de las paredes del canal sin ser afectadas en su trayectoria .

Los resultados de la siembra con biobolas como partículas trazadoras se muestran en la Figura 90.

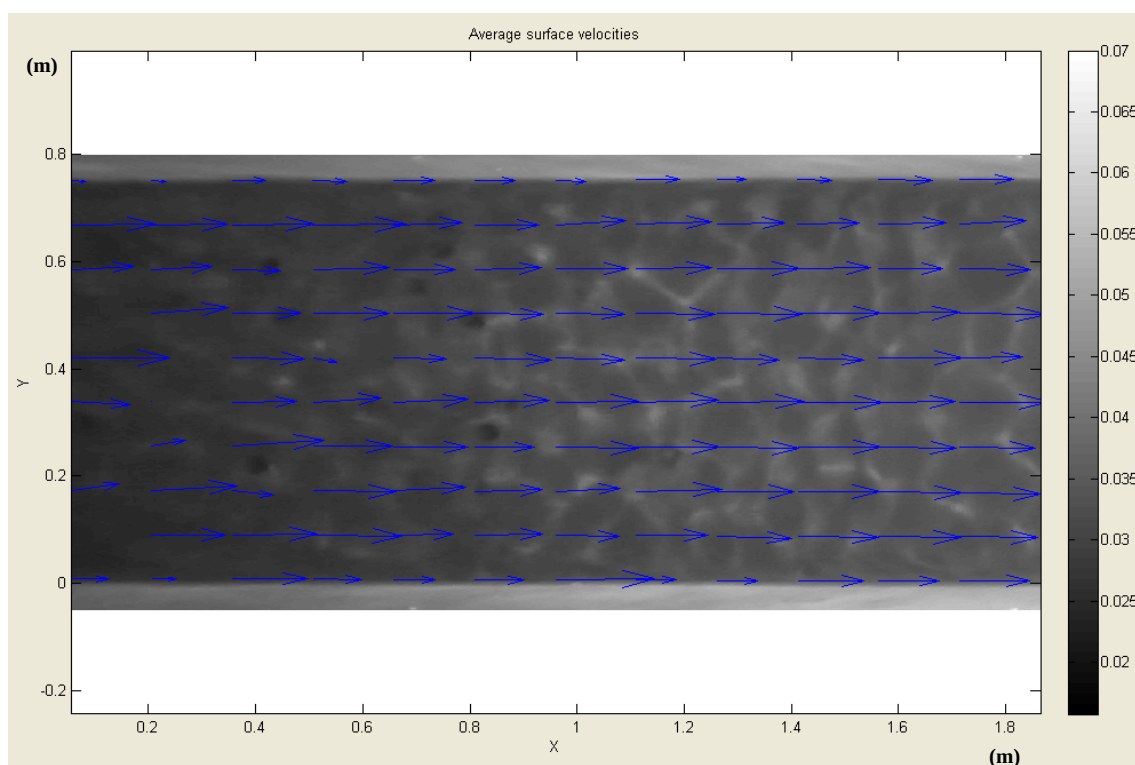


FIGURA 90. Vectores de velocidad obtenidos de las pruebas con biobolas utilizadas como trazadores artificiales en el modelo hidráulico del IMTALAB.

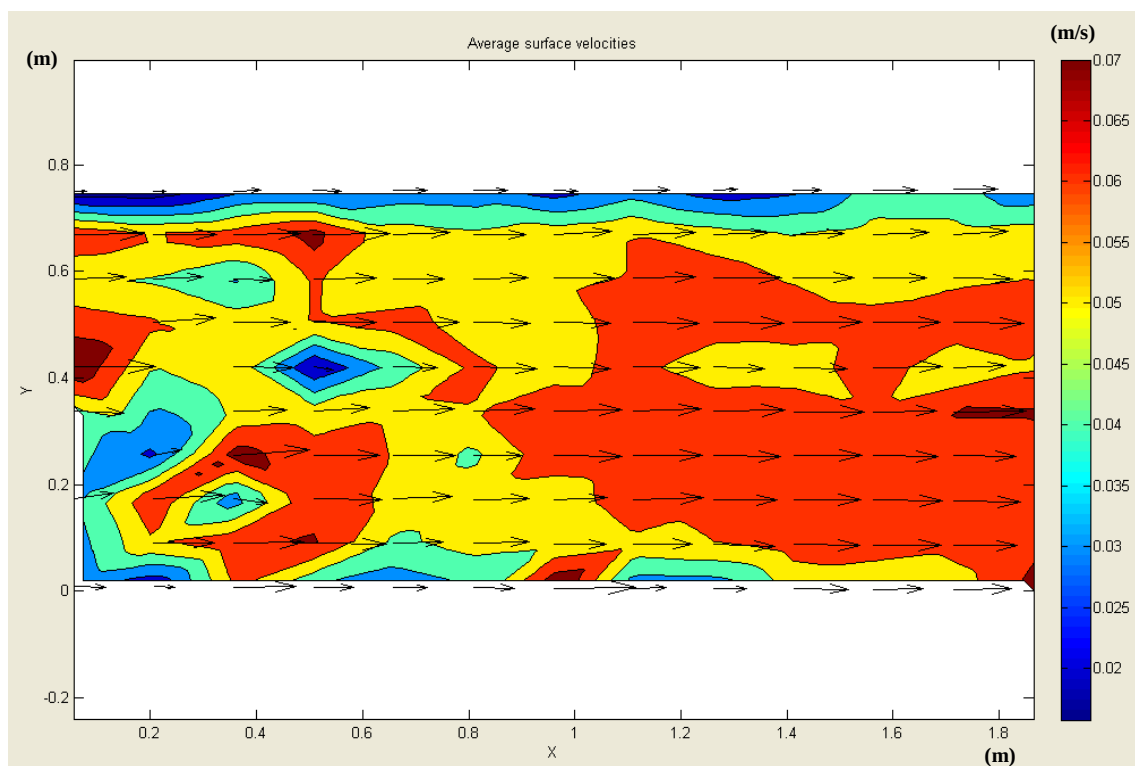


FIGURA 91. Campo de velocidad obtenido de las pruebas con biobolas utilizadas como trazadores artificiales en el modelo hidráulico del IMTALAB.

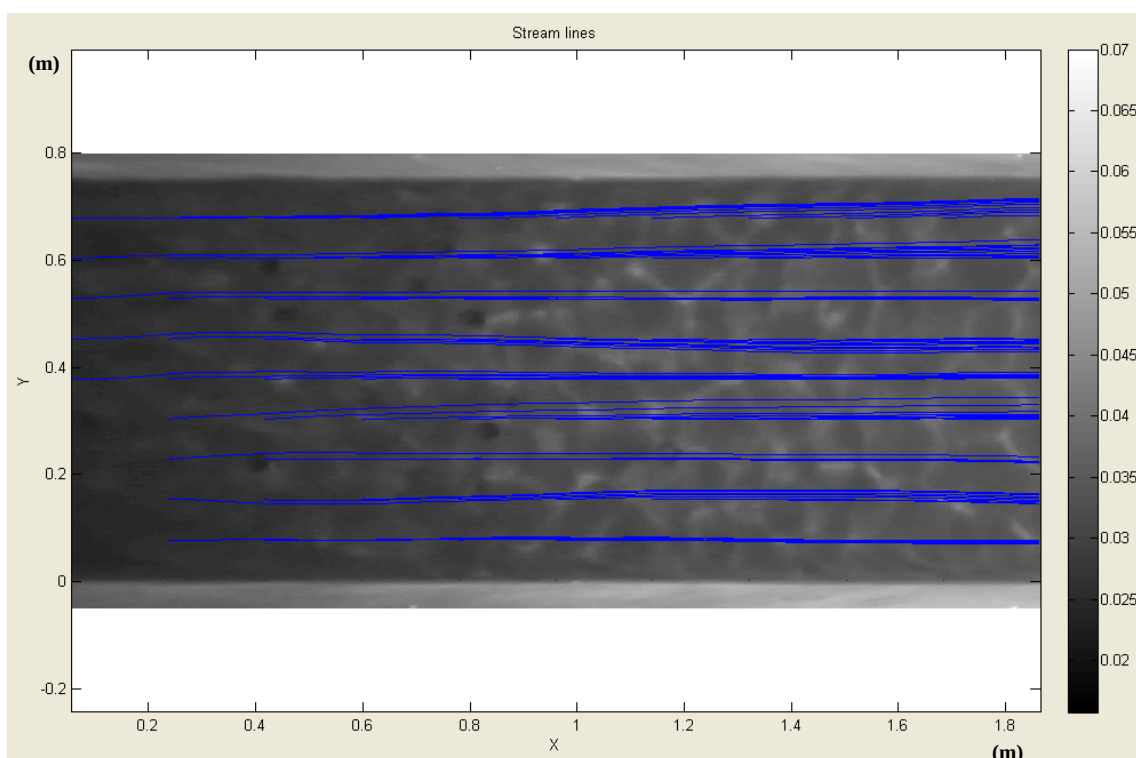


FIGURA 92. Líneas de flujo obtenidos de de las pruebas con biobolas utilizadas como trazadores artificiales en el modelo hidráulico del IMTALAB.

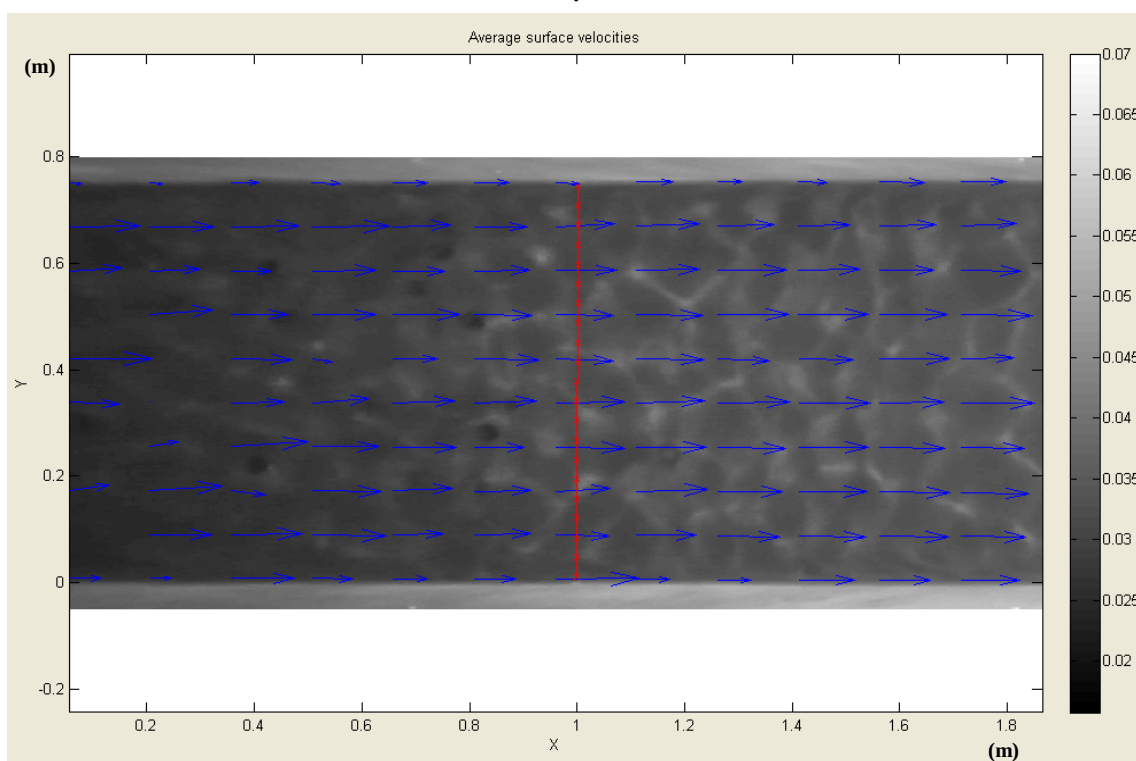


FIGURA 93. Perfil transversal de velocidades obtenido de las pruebas con biobolas utilizadas como trazadores artificiales en el modelo hidráulico del IMTALAB.

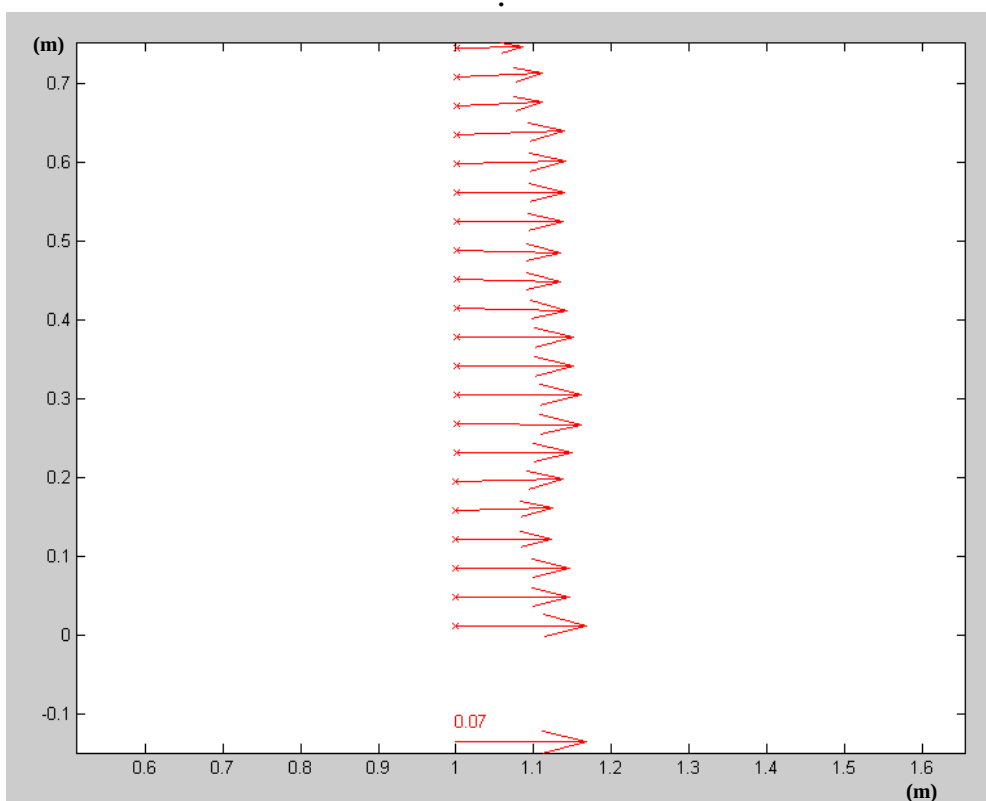


FIGURA 94. Perfil transversal de velocidades obtenido de las pruebas con biobolas utilizadas como trazadores artificiales en el modelo hidráulico del IMTALAB.

Los resultados de utilizar las biobolas como trazadores demuestran una consistencia en el trazado del flujo, una de las ventajas que ofrece este material es que la mayoría de su volumen permanece sumergido, lo que impide a los efectos físicos como el aire y la capa limite interactuar con él, el principal problema de este material es que no puede ser utilizado en mediciones de campo, ya que no son biodegradables, otro aspecto importante es el no reflejar adecuadamente la luz, debido a sus color oscuro, los resultados en el perfil de velocidades muestran cero cantidad de vectores espurios,.

5.2.2.4 Siembra con confeti como partículas trazadoras.

El confeti utilizado en esta prueba es el residuo de las perforadoras de papel bond, durante las pruebas se pudo observar un seguimiento del flujo adecuado, debido a que el color de las partículas de papel en su mayoría eran de color blanco, estas reflejaban la luz

correctamente, no se mostro interacción entre ellas ni con las paredes del canal, otra ventaja que presentaban estos trazadores era la densidad muy por debajo a la del fluido y su forma plana, lo que permitía que no tuviera un volumen que pudiera interactuar con el aire, sin embargo el volumen sumergido también era mínimo, lo que permitía que interactuará con la capa limite del fluido, podría considerarse este material uno de los mejores para ser aplicado en laboratorio, mas no para el campo, ya que el tamaño de las partículas no sería el adecuado cuando las áreas de filmación sean muy grandes, debido a la resolución espacial de las cámaras.

Los resultados de la siembra con partículas de confeti se muestran en la Figura 95.

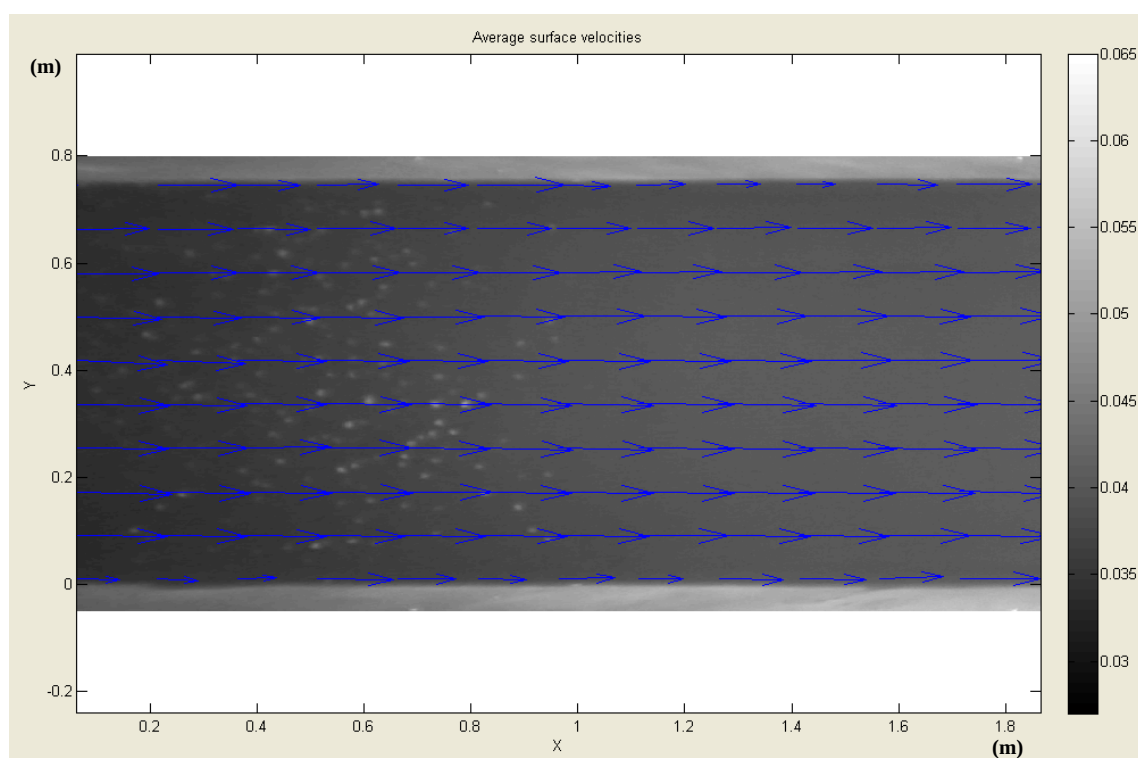


FIGURA 95. Vectores de velocidad obtenidos de las pruebas con confeti de papel utilizado como trazadores artificiales en el modelo hidráulico del IMTALAB.

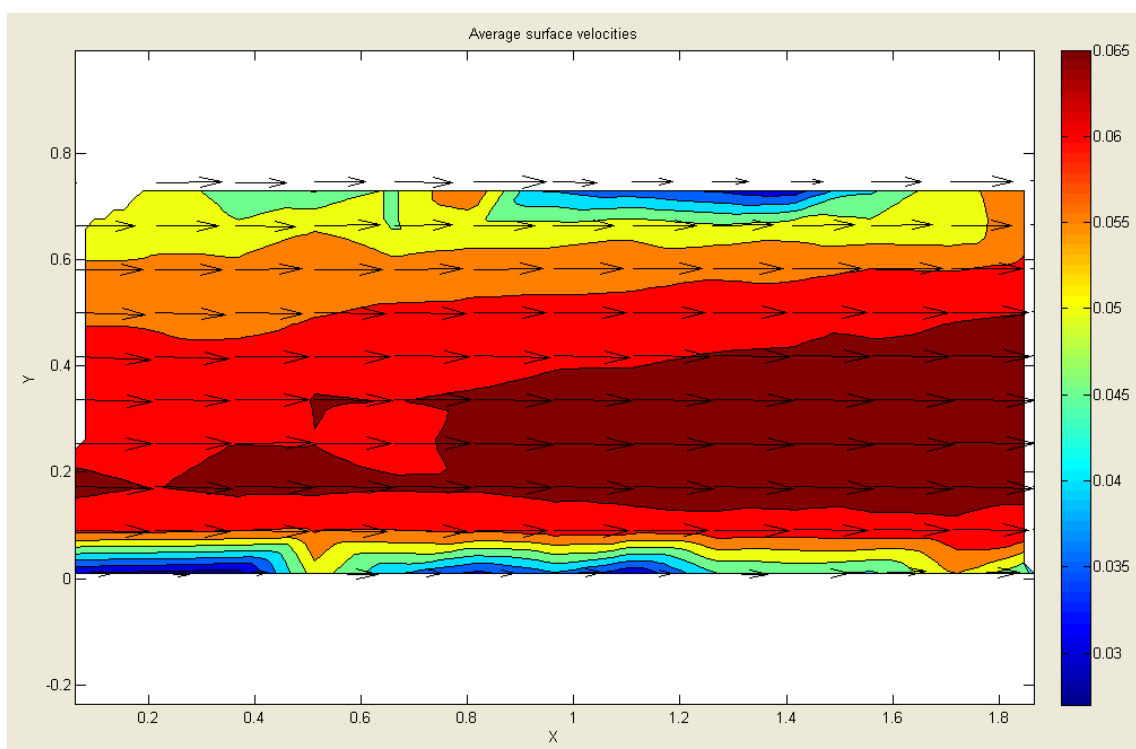


FIGURA 96. Campo de velocidad obtenido de las pruebas con confeti de papel utilizado como trazadores artificiales en el modelo hidráulico del IMTALAB.

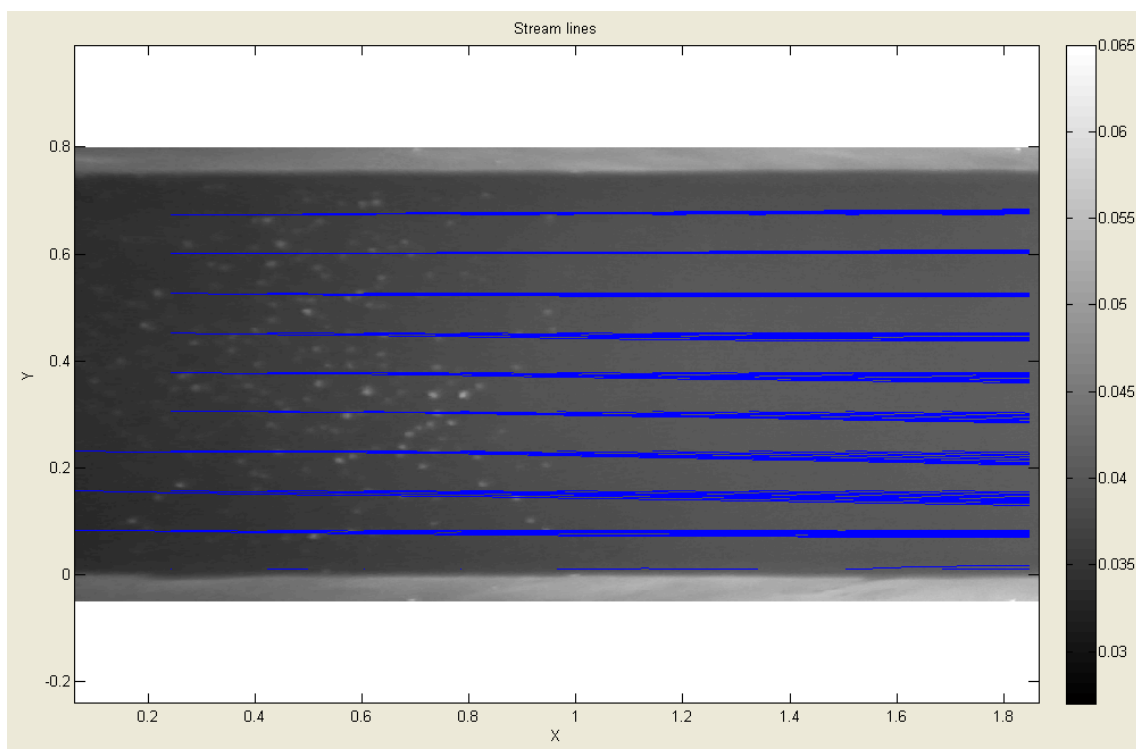


FIGURA 97. Líneas de flujo obtenidas de las pruebas con confeti de papel utilizado como trazadores artificiales en el modelo hidráulico del IMTALAB.

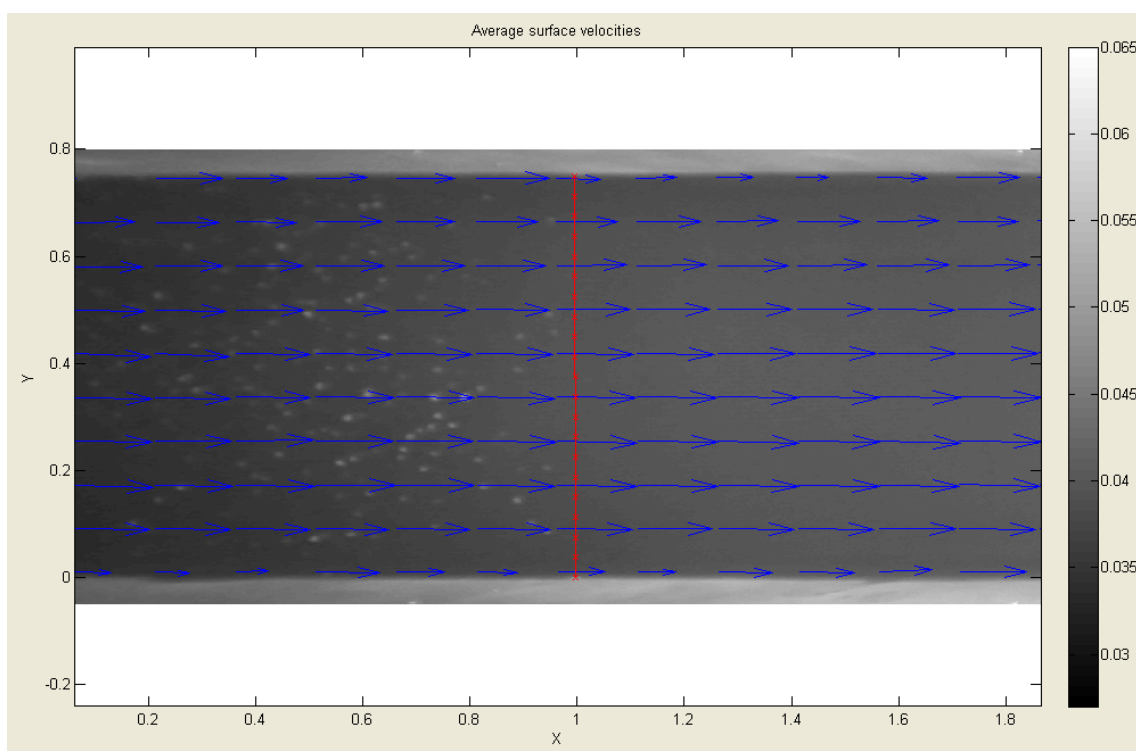


FIGURA 98. Perfil transversal de velocidades obtenido de las pruebas con confeti de papel utilizado como trazadores artificiales en el modelo hidráulico del IMTALAB.

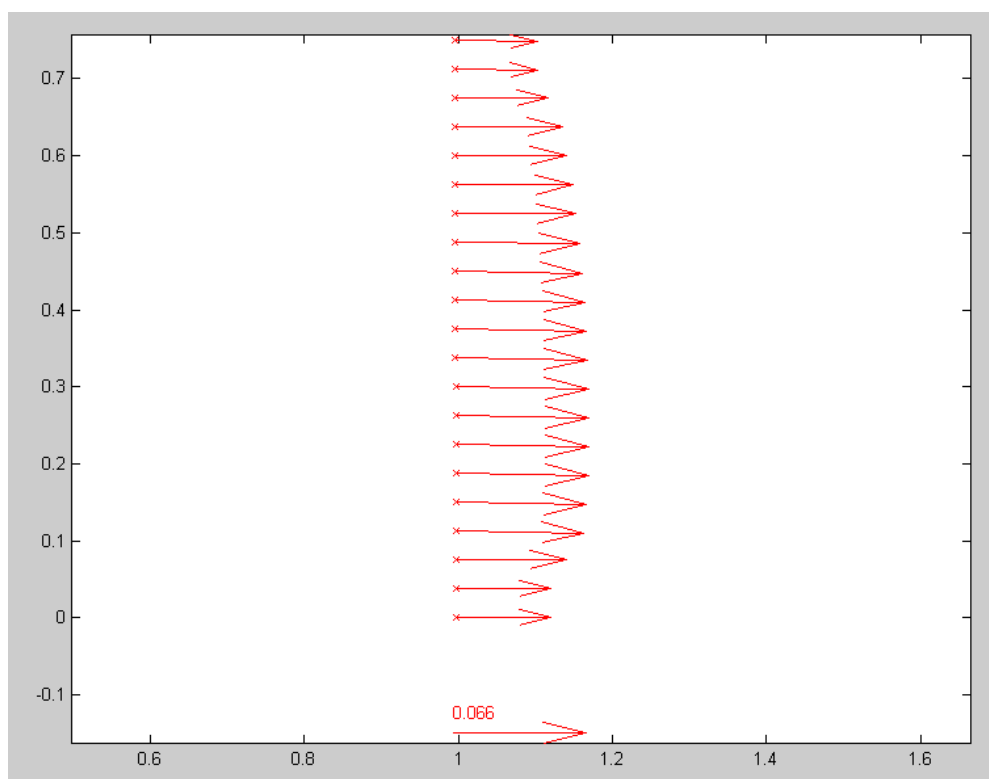


FIGURA 99. Perfil transversal de velocidades obtenido de las pruebas con confeti de papel utilizado como trazadores artificiales en el modelo hidráulico del IMTALAB.

Los resultados de utilizar confeti de papel como trazadores demuestran una consistencia en el trazado del flujo, una de las ventajas que ofrece este material es que el volumen que permanece sobre la superficie del flujo es casi nulo, lo que impide la interacción con el aire, sin embargo el volumen sumergido de igual forma también es mínimo lo que permite la interacción con la capa limite del fluido, el principal problema de este material es que no puede ser utilizado en mediciones de campo, ya que sus dimensiones no lo permiten debido a la resolución espacial en el momento de capturar las imágenes, sin embargo a sido utilizado en infinidad de veces en el IMTALAB como trazador de flujo en modelos hidráulicos, para describir la morfología superficial del flujo. Los resultados en el perfil de velocidades muestran cero cantidades de vectores espurios.

5.2.2.5 Resumen de las pruebas de trazadores.

En la figura 100 se muestra una grafica representativa del número de vectores erróneos contra los vectores correctos de una mallado de 120 puntos que arrojo la técnica de LSPIV en las pruebas de los 4 diferentes trazadores utilizados en laboratorio.

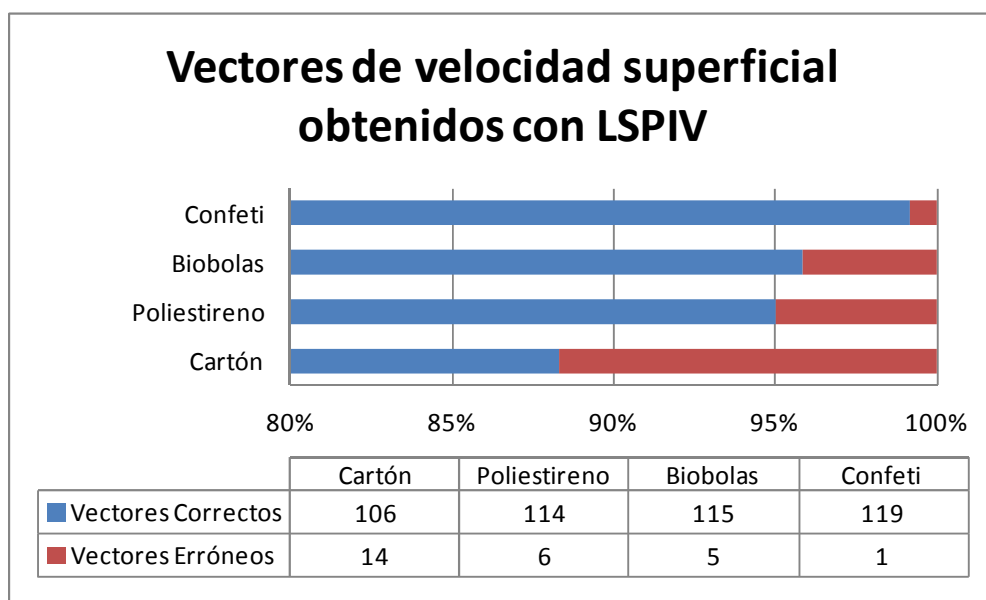


FIGURA 100. Grafica de comparación de vectores erróneos que resultaron de la aplicación de LSPIV en las pruebas de los 4 distintos trazadores.

En la figura 101 se muestra los 4 perfiles transversales que arrojo el Pos-procesamiento con Mat_LSPIV en las pruebas de los 4 diferentes trazadores utilizados en laboratorio.

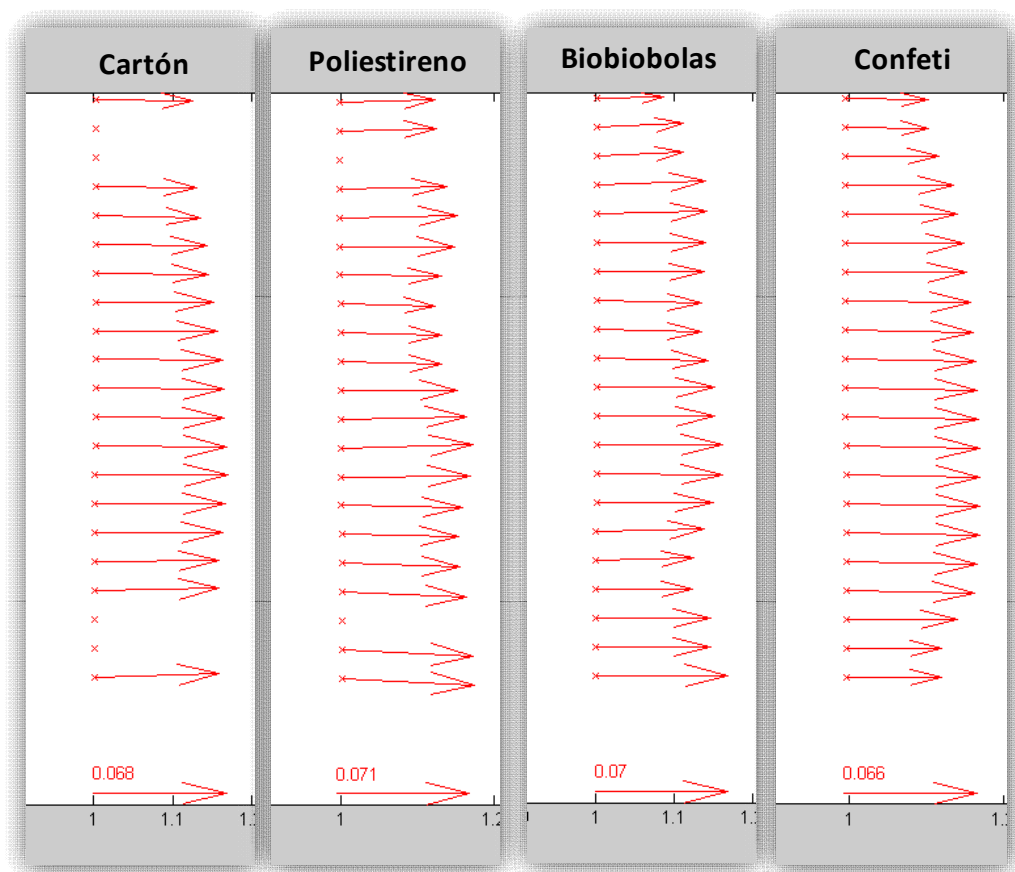


FIGURA 101. Perfiles transversales obtenidos del Pos-procesamiento con Mat_ LSPIV en las pruebas de los 4 distintos trazadores.

5.3. Incertidumbre de la técnica de LSPIV

En este trabajo se diseñó y se puso en operación la técnica de LSPIV para estimar las velocidades superficiales del agua en canales y modelos hidráulicos en laboratorio. Esta técnica es la primera instalada en las inmediaciones del IMTALAB y con ella se busca estudiar diferentes fenómenos relacionados con velocidades superficiales en los modelos, así como aplicar esta técnica en distintos puntos donde se desea analizar y medir el flujo superficial en obras y canales de gran escala.

Esta técnica desarrollada ofrece las posibilidades de medir de una forma cuantitativa y cualitativa la morfología superficial del flujo en modelos hidráulicos de laboratorio, ya sea el caso de vertedores, presas, ríos y canales, las cuales eran estudiadas únicamente de forma cualitativa usando trazadoras de tintas como es el caso del azul de metileno.

Como lo mencionan algunos autores (Kim 2006; Muste et al., 2008) existe una gran variedad de factores que afectan las mediciones con la técnica de LSPIV. Errores son generados en todas las etapas de medición, es decir, condiciones de iluminación, cantidad y distribución de trazadores, ortorectificación, hasta el procesamiento, sin embargo una vez puesto en operación esta técnica, podrán ser analizados y estudiados cada uno de los factores que implican la técnica y poder realizar un estudio a profundidad de la incertidumbre que presenta el método.

CAPÍTULO 6

Conclusiones y trabajos futuros.

1. En la campaña de campo se obtuvieron perfiles de velocidades en el canal “LAS ESTACAS”, que al ser comparados con las mediciones de los velocímetros puntuales o correntómetros, muestran una similitud en la forma del perfil, sin embargo las velocidades arrojadas por el procesamiento con LSPIV son mayores que las medidas con los velocímetros, esto confirma la correlación de la velocidad media con la superficial, sin embargo sería adecuado en investigaciones futuras aplicar trazadores de flujo con lastres, esto con el fin de lograr mediciones de las dos técnicas sobre un mismo tirante. La relación entre la velocidad media y la velocidad superficial ha sido de mucha polémica y lo más recomendable es realizar una calibración del sitio, sin embargo la aplicación de los trazadores lastrados podrían evitar esta calibración y hacer de la técnica un proceso instantáneo para el aforo.
2. Como se ha mencionado por la mayoría de los investigadores que han estudiado la LSPIV la necesidad de trazadores de flujo es una de las limitantes en la técnica, la siembra artificial es factible cuando las dimensiones del flujo son pequeñas, donde puede llevarse a cabo manualmente y de una forma general, sin embargo cuando las dimensiones del flujo no lo permiten, la siembra deberá hacerse de una forma puntual, lo cual no garantiza una distribución adecuada de los trazadores para poder calcular aceptablemente el campo de velocidades superficiales.
3. En las pruebas realizadas en el laboratorio con los cuatro trazadores, se demostró que el poliestireno utilizado en la técnica de LSPIV según la literatura, muestra cualidades que no permiten que sea aplicado como trazador artificial, por una parte es un material altamente contaminante, que al ser depositado en grandes flujos éstos se depositaran en el ecosistema, por otra parte la baja densidad permite un alto grado de flotación permitiendo que la mayoría de su volumen permanezca por

encima del flujo y las corrientes de aire interactúen con los trazadores, y más importante aún es la carga electrostática que mantiene el poliestireno lo cual genera que los trazadores interactúen entre si y no sigan las líneas de flujo adecuadamente, éstos al ser procesados con la técnica de LSPIV darán como resultados vectores que no corresponden a los del flujo. Una alternativa para ser aplicado como trazador artificial seria la fabricación de biobolas de materia biodegradable y de algún color claro que refleje adecuadamente la luz, las pruebas en laboratorio muestran cómo la forma y rugosidad de las biobolas siguen de una forma muy precisa las líneas de corriente, una alternativa para la fabricación de estos trazadores sería utilizar la fécula de maíz, la cual tiene cualidades de absorber el agua y lograr una densidad un tanto menor al del fluido, además de ser biodegradable y de bajo costo.

4. Como se pudo observar en las pruebas de laboratorio, cuando el fluido a medir tiene la cualidad de ser translúcido, tienden a aparecer rasgos inmóviles en el fondo del flujo, los cuales al ser procesados con la técnica de LSPIV dan como resultados un gran número de vectores espurios, por lo tanto, es recomendable aplicar esta técnica en flujos donde la turbiedad es alta, esto permitiría que no fuesen capturados los rasgos del fondo, así como también se resaltarían los trazadores, logrando un mejor procesamiento con PIV y resultados más precisos.
5. Un proceso que podría mejorar la técnica, es aplicar un algoritmo de validación y sustitución de vectores espurios, esto con la finalidad de poder tener vectores en toda área de estudio.
6. Un problema muy recurrente en las mediciones con la técnica de LSPIV son los patrones inmóviles en la superficie debidos a las sombras y reflejos, los cuales podrían ser eliminados utilizando un lente polarizado al momento de hacer la captura de las imágenes.

Bibliografía

- Adrian, R. J. (1991). "Particle Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics". Annual Review of Fluid Mechanic, 23(1), pp. 261-304. doi: 10.1146/annu-rev.fl.23.010191.001401.
- Aya,S.; Fujita, I. y Yagyu, M. (1995). "Field observation of flood in a river by video image analysis" Annual Journal of Hydraulic Engineering, 39, pp. 447-452.
- Bieri, M.; Jenzer, J.; Kantoush, S. y Boillat, J.L. (2009). "Large Scale Particle Image Velocimetry applications for complex free surface flows in river and dam engineering". Paper present at 33rd Congress. Int. Assoc. of Hydraul. Eng. Res.
- Bradley, A.; Kruger, A.; Meselhe, E. y Muste, M. (2002). "Flow measurement in streams using video imagery". Water Resources Research. 38(12), pp. 1315+, ISSN 0043-1397, doi: 10.1029/2002WR001317.
- Collins, M. J. y Emery, W. J. (1988). "A computational method for estimating sea ice motion in sequential seasat synthetic aperture radar imagery by matched filtering". Journal of Geophysical Research – Oceans. 93(C8), pp. 9241-9251.
- Creutin, J. D.; Muste, M.; Bradley, A.; Kim, S. C. y Kruger, A. (2003). "River gauging using PIV technique: a proof of concept experiment on the Iowa River". Journal of Hydrology. 227(3-4), pp. 182-194. ISSN 0022-1964. doi: 10.1016/S0022-1694(03)00081-7.
- Creutin, J. D.; Muste, M. y Li, Z. (2002). "Traceless Quantitative Imaging Alternatives for Free-Surface measurements in Natural Streams". 113(40655), pp. 38-38. doi: 10.1061/40655(2002)38.
- Dermisis, D.C. y Papanicolaou A.N. (2009), "Fish passage over hydraulic structures in Midwestern River of the USA", Journal River Basin Management, 7(4), pp. 313-328
- Fox, J.F. y Belcher, B.J. (2009). "Comparison of LSPIV, ADV y PIV data that is decomposed to measure the structure of turbulence over a gavel-bed". Paper present at 33rd Congress. Int. Assoc. of Hydraulic Engineering Research.
- Fox, J.F. y Belcher, B.J. (2011). "Comparison of macroturbulence measured using decomposition of PIV, ADV and LSPIV data". Journal of Hydraulic Research. 49(1), pp. 122-126.

-
- Fujita, I.; Aya, S. y Deguchi, T. (1997). "Surface velocity measurement of river flow using video images of an oblique angle". Paper present at 27th Congress. Int. Assoc. of Hydraulic Engineering Research. San Francisco, California.
- Fujita, I. y Hino, T. (2003). "Unseeded and Seeded PIV Measurement of River Flow Videotaped from a Helicopter". *J. vis.* 6(3), pp. 245-252. ISSN 1343-8875.
- Fujita, I. y Komura, S. (1994). "Aplication of video image analysis for measurements of river-surface flows (in Japanese)". *JSCE*. 38, pp. 733-738.
- Fujita, I.; Watanabe, H. y Tsubaki, R. (2007). "Development of a non-intrusive and efficient flow monitoring technique. The space-time image velocimetry". *International Journal of River Basin Management*. 5(2), pp. 105-114.
- Fujita, I.; Muste, M. y Kruger, A. (1998). "Large-Scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic applications". *Journal of Hydraulic Research*. 36(3), pp. 397-414.
- Hauet, A. (2007) "User Manual Mat_LSPIV". IIRH – Hydrosience & Engineering, The University of Iowa, Iowa City, USA
- Hauet, A.; Creutin, J. y Belleudy, P. (2008a) "Sensitivity study of large-scale particle image velocimetry measurement of river discharger using numerical simulation". *Journal of Hydrologic*, 349(1-2), pp 178-190. ISSN 0022-1694 doi: 10.1061/j.jhydrol.2007.10.062
- Hauet, A.; Kruger, A.; Krajewski, W.; Bradley, A.; Muste, M.; Creutin, J. y Wilson, M. (2008b) "Experimental System for Real-Time Discharge Estimation Using an Image-Base Method". *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(2), pp 105-110. doi: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2008)13:2(105)"
- Holland, K.T.; Holman, R.A. Lippmann, T.C. (1997), "Practical use of video imagery in nearshore oceanographic field studies". *IEEE Journal of Oceanic Enginnering*, 22(1), pp. 81-92
- Jaehne, B. (1997), *Digítale Bildverarbeitung*, 4th edition, Springer Verlag, Berlín Heidelberg
- Jasek, M.; Muste, M.; Ettema, R. y Kruger, A. (2001). "LSPIV and Numerical-Model Estimation of Yukon River Discharge During an Ice Jam Near Dawson". pp. 223-235.
- Jodeau. M.; Hauet, A.; Paquier, A.; Coz, J. Le y Dramais, G. (2008). "Aplication and evaluation of LS-PIV technique for the monitoring or rive surface velocities in high flow condition". *Flow Measurement and Instrumentation*, 19(2), pp. 117-127, ISSN 0955-5986. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2007.11.004.
-

-
- Kantoush, S.; Bollaert, E.; Cesare, G.; Boillat, J.L. y Schleiss, A. (2006). "Flow Field Investigation in a Rectangular Shallow Reservoir using UVP, LSPIV and numerical model". paper presented at 5th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering, pp.129-133.
- Leese, J. A.; Novak, C. S. y Clark, B. B. (1971). "An automated technique for obtaining cloud motion from geosynchronous satellite data using cross correlation". J. Appl. Meteorology, 10, pp. 118-132.
- Meselhe, E.A.; Peeva, T. y Muste, M (2004), "Large Scale particle Image Velocimetry for Low Velocity and Shallow Water Flows", ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, 130(9), pp. 937-940
- Muste, M.; Fujita, I. y Hauet, A. (2008b). "Large-scale particle image velocimetry for measurement in riverine environments". Water Resources Research, 44, pp. W00D19+. ISSN 0043-1397. Doi:10.1029/2008WR006950.
- Muste, M.; Kim, W. y Fulford, J.M. (2008a). "Desarrollo de la tecnología hidrométrica: instrumentos nuevos y emergentes para trazar los mapas de las condiciones hidrodinámicas de los ríos". Boletín de la OMM. 57(3), pp. 163-169.
- Muste, M.; Xiong, Z.; Bradley, A. y Kruger, A. (2000). "Large-scale Particle image Velocimetry—a Reliable tool for Physical Modeling". 104(40517), pp. 311-311. doi:10.1061/40517(2000)311.
- Muste, M.; Xiong, Z. y Kruger, A. (1999). "Error estimation in PIV applied to large scale flows" .paper presented at 3rd International workshop on Particle Image Velocimetry, Univ. of Calif., Santa Barbara, Calif.,16-18 sep.
- Muste, M.; Xiong, Z.; Schöne, J. y Li, Z. (2004a). "Validation and Extension of Image Velocimetry Capabilities for Flow diagnostic in hydraulic modeling". Journal Hydraulic Engineering, 130(3), pp175-185. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429[2004]130:3(175).
- Raffel, M.; Willer, C.E. y Kompenhans, J. (1998). "Particle Image Velocimetry: A Practical Guide". New York