

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**Evaluación del efecto de la obstrucción de una columna en el flujo de agua en un canal
mediante velocimetría por imágenes de partículas.**

POR:

JOSÉ ELÍAS VILLA HERRERA

TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN INGENIERÍA

CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO

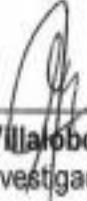
JUNIO /2021



Evaluación del efecto de la obstrucción de una columna en el flujo de agua en un canal mediante velocimetría por imágenes de partículas. Tesis presentada por José Elías Villa Herrera como requisito parcial para obtener el grado de Doctorado en Ingeniería, ha sido aprobado y aceptado por:



M.I. Javier González Cantú
Director de la Facultad de Ingeniería



Dr. Alejandro Villalobos Aragón
Secretario de Investigación y Posgrado



Dr. Alejandro Villalobos Aragón
Coordinador de Doctorado en Ingeniería



Dr. Cornelio Álvarez Herrera
Director de Tesis

FECHA: 16/06/2021

Comité:

Dr. José Guadalupe Murillo Ramírez
Dr. Antonio Campa Rodríguez
Dr. José Luis Herrera Aguilar
Dr. Humberto Silva Hidalgo

© Derechos Reservados

José Elías Villa Herrera

DIRECCIÓN PERSONAL

(o como mera referencia informativa, la correspondiente a la unidad académica de adscripción)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

16 de junio de 2021

M.I. JOSÉ ELÍAS VILLA HERRERA.
Presente

En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de Doctorado en Ingeniería, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta dirección, propuesto y dirigido por el director la Dr. Cornelio Álvarez Herrera para que lo desarrolle como tesis con el título **"EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA OBSTRUCCIÓN DE UNA COLUMNA EN EL FLUJO DE AGUA EN UN CANAL MEDIANTE VELOCIMETRÍA POR IMÁGENES DE PARTÍCULAS."**

ÍNDICE DE CONTENIDO

Capítulo 1. Introducción.

Capítulo 2. Marco teórico.

Capítulo 3. Diseño experimental.

Capítulo 4. Presentación de resultados.

5. Conclusiones y recomendaciones.

Anexos

- + Efecto del diámetro de una columna en el flujo de agua que pasa sobre ella
- + Comportamiento del flujo del agua en estribos de un puente
- + Ejemplo de correlación cruzada (PIV) usando Matlab
- + Curriculum Vitae

Solicitamos a Usted tomar nota de que el título del trabajo se imprima en lugar visible de los ejemplares de las tesis.

ATENTAMENTE
"naturam subiecit aliis"

FACULTAD DE
INGENIERÍA
U.A.CH.



EL DIRECTOR

EL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN
Y POSGRADO

M.I. JAVIER GONZÁLEZ CANTÚ DIRECCIÓN DR. ALEJANDRO VILLALOBOS ARAGÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
Circuito No.1, Campus Universitario 2
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125
Tel. (614) 442-95-00
www.fing.uach.mx

Dedicatoria

A mis padres José Elías Villa Pérez y Blanca Irma Herrera Amaya por su incondicional apoyo, así como a mi familia y amigos por su gran ayuda.

A mis Maestros por su gran actitud de enseñanza y guía en el trayecto para la obtención de este grado.

A mis alumnos tesistas que trabajamos a la par, donde también aprendí junto con ellos y adquirir en parte, el hábito de la investigación.

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua, al Centro de Investigación en Materiales Avanzados y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por darme esta gran oportunidad.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el soporte otorgado con la beca de doctorado

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua, por darme la oportunidad de estudiar.

al Centro de Investigación en Materiales Avanzados.

Agradecimientos

Al Dr. Cornelio Álvarez Herrera por brindar su experiencia, dirección y permitirme ser parte de este proyecto. A los Dres. José Guadalupe Murillo Ramírez, José Luis Herrera Aguilar, Humberto Silva Hidalgo y Antonio Campa Rodríguez por su colaboración. A cada uno de los representantes de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua por facilitar instalaciones, al Centro Aeroespacial de la Facultad de Ingeniería UACH, equipos y recursos necesarios, así como capacitación para lograr este trabajo. De igual manera, agradecer al Centro de Investigación de Materiales Avanzados, a todo el personal que estuvo involucrado durante mis estudios de doctorado.

Índice

Índice de Figuras	i
Índice de Tablas.....	ii
Resumen	iii

Capítulo 1. Introducción.

1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Objetivo	3
1.3. Hipótesis	3
1.4. Justificación.....	3
1.5. Clasificación de la socavación.....	5
1.6. Mecanismo de la socavación	5
1.7. Medidas de control de la socavación.....	8
1.8. LaVision DaVis 8	11
1.9. Tecplot 360.....	15

Capítulo 2. Marco teórico.

2.1. Fórmula para determinar la socavación en un puente	16
2.2. Fórmula para obtener Numero de Raynolds.....	18
2.3 Fórmula para obtener la vorticidad.....	18
2.4. Velocimetría por imágenes de partículas.....	19

Capítulo 3. Diseño experimental.

3.1. Arreglo del trabajo.....	24
-------------------------------	----

Capítulo 4. Presentación de resultados.

4.1. Resultados.....	32
----------------------	----

5. Conclusiones y recomendaciones.

5.1. Conclusiones..... 53

5.2. Recomendaciones 55

6. Bibliografía..... 56

Anexos

+ Efecto del diámetro de una columna en el flujo de agua que pasa sobre ella 61

+ Comportamiento del flujo del agua en estribos de un puente..... 68

+ Ejemplo de correlación cruzada (PIV) usando Matlab 70

+ Currículum Vitae..... 79

Índice de Figuras

Figura 1. Inicio de la socavación en una columna.....	2
Figura 2. Mecanismo de la socavación en una columna	6
Figura 3. Leve socavación en columna de un puente	7
Figura 4. Leve socavación en estribo de un puente	8
Figura 5. Colocación de piedras alrededor de un muelle	9
Figura 6. Recubrimiento de concreto alrededor del muelle.....	9
Figura 7. Recubrimiento asfáltico en el ala de estribo	10
Figura 8. Realización de dique para contrarrestar la fuerza del agua.....	10
Figura 9. Procesamiento de imagen por software LaVision DaVis 8	15
Figura 10. Imágenes divididas en zonas de interrogación.....	22
Figura 11. Esquema de imágenes en movimiento	23
Figura 12. Correlación cruzada entre dos sub-imágenes.....	23

Figura 13. Generación de la vorticidad cerca de la columna.....	24
Figura 14. Equipo utilizado para desarrollar el experimento	25
Figura 15. Columna cruzada por flujo frontal de iluminación láser con esferas.....	26
Figura 16. (a) Columna cuadrada, (b) Columna circular, (c) Columna de gota.....	26
Figura 17. Diseño de los experimentos, vista superior.....	28
Figura 18. Depósito de agua: 200 litros de capacidad.....	28
Figura 19. Canal de agua y modelo de columna en el interior	28
Figura 20. La luz láser Lincoln de 532 nm.....	29
Figura 21. Cámara de video Phantom M 310 CCD.....	29
Figura 22. Esquema de las partes que integran el funcionamiento de la técnica PIV	30
Figura 23. Áreas de estudio del primer experimento	32
Figura 24. Medición para el tamaño del radio, del área aguas arriba.....	33
Figura 25. Caudal 0.10 L/s frente	34
Figura 26. Caudal 0.44 L/s frente	35

Figura 27. Caudal 0.77 L/s frente	36
Figura 28. Caudal 1.06 L/s frente	37
Figura 29. Caudal 1.58 L/s frente	38
Figura 30. Distancia de la columna al vórtice, área aguas abajo	40
Figura 31. Caudal 1.58 L/s posterior	41
Figura 32. Caudal 2.20 L /s posterior	42
Figura 33. Caudal 2.72 L/s posterior	42
Figura 34. Caudal 3.24 L/s posterior	43
Figura 35. Caudal 3.26 L/s posterior	43
Figura 36. Gráfico sección frontal	44
Figura 37. Gráfico sección posterior	46
Figura 38. Área de estudio del segundo experimento	47
Figura 39. Columna cuadrada vista superior	48
Figura 40. Columna circular vista superior	49

Figura 41. Columna de gota invertida vista superior.....	49
Figura 42. Columna de gota vista superior.....	50
Figura 43. Columna doble cuchilla vista superior.....	50
Figura 44. Flujo de la columna cuadrada	51
Figura 45. Flujo de la columna circular.....	51
Figura 46. Flujo de la columna de gota	52

Índice de Tablas

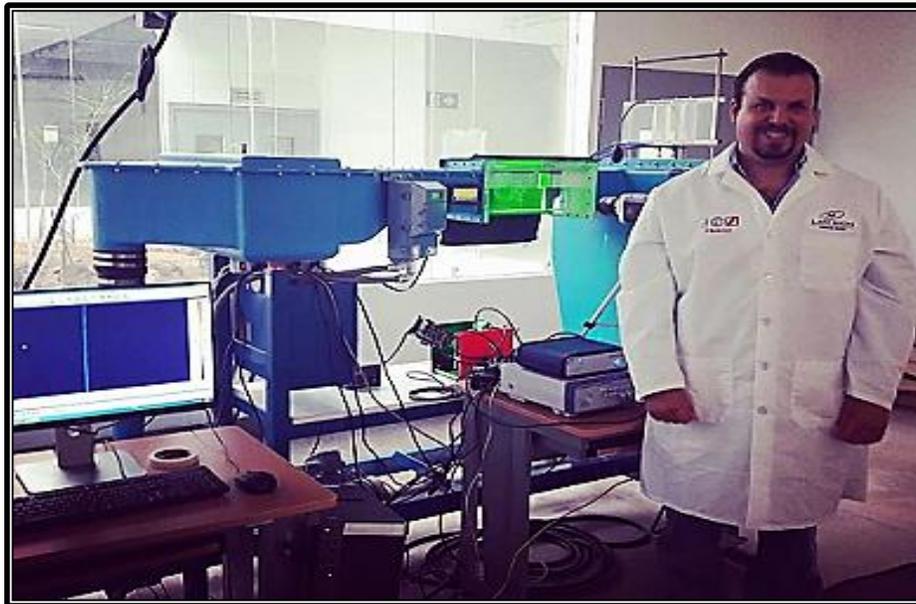
Tabla 1: Caudal, radio y tendencia de flujo parte frontal	39
Tabla 2: Número de Reynolds primer experimento parte frontal.....	39
Tabla 3: Caudal y tendencia de flujo parte posterior.....	45
Tabla 4: Número de Reynolds primer experimento, parte posterior	45
Tabla 5: Número de Reynolds segundo experimento.....	47
Tabla 6: Resultados de las observaciones.....	52

Resumen

En este trabajo, se realiza el estudio del flujo de agua que interactúa alrededor de un modelo a escala de una columna puesta dentro de un canal de agua en condiciones de laboratorio, con el propósito de estudiar la dinámica de los flujos que podrían causar socavación. Debido a que la socavación que se produce en los cimientos de las obras de infraestructura civil, como los puentes construidos en los principales cauces naturales o ríos, siendo una de las principales causas por las que estas estructuras colapsan, se consideró pertinente la investigación que se presenta en este trabajo. Hoy en día, todavía no existe una solución adecuada para este problema, por lo que hay varias metodologías que intentan estimar y reducir las fuerzas de arrastre de los sedimentos por el efecto del flujo de agua y así obtener un mejor entendimiento de la socavación en el futuro. Esta investigación se centró en dos experimentos, utilizando la técnica óptica llamada por sus siglas en inglés PIV (Velocimetría por Imágenes de Partículas), el primero, fue obtener datos, sobre la relación de distancia - vorticidad, del flujo de agua cuando está obstruido por una columna circular a diferentes velocidades, el segundo, fue utilizar cinco diferentes geometrías de columnas para obtener un índice de vorticidad. Se utilizó un canal hidráulico, microesferas de vidrio plantadas en el agua como partículas de seguimiento de las líneas de corriente de flujo, un equipo de iluminación láser Lincoln de 532 nm, una cámara de video Phantom M 310 CCD, diferentes columnas fabricadas con impresora 3D como modelos y dos softwares de procesamiento de imágenes. llamados LaVision DaVis 8 y Tecplot 360. El equipo PIV con el que se cuenta en el Centro de Aeroespacial de esta Facultad de Ingeniería UACH, fue de gran utilidad para lograr imágenes de calidad, obteniendo patrones del movimiento del flujo a diferentes velocidades, cuando éste es obstruido por una estructura como una columna.

Con la investigación fue posible determinar los puntos críticos donde este flujo puede generar socavación dada la geometría de la estructura proponiendo de igual forma una mejoría de ella. Se espera que la combinación de diversos estudios, conlleven a resultados de laboratorio más realistas, además de llevar acabo modelos numéricos sofisticados, para lograr obtener un mejor entendimiento de la socavación en el futuro.

Todas las Figuras en este trabajo son originales, aunque cuenten con referencia, solo son un complemento.



Equipo de la Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV) y Canal Hidráulico. Centro de Aeroespacial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua.



Capítulo 1. Introducción

1.1. Antecedentes

La técnica óptica de campo completo, no destructiva, llamada comúnmente Velocimetría por Imágenes de Partículas por sus siglas en inglés PIV (Particle Image Velocimetry), ha sido utilizada como una herramienta de gran utilidad en el desarrollo de modelos, que han intentado brindar un mejor entendimiento del comportamiento del fenómeno de la socavación. Desde principios de la década de 1980 a la fecha (Hill y Younkin, 2006), mediante esta técnica se obtiene información acerca del flujo turbulento, como el que se genera en el fondo de un cauce hidráulico, debido a la obstrucción de los apoyos de estructuras como los puentes, ya sean columnas y/o estribos, mediante la toma de fotografías (Keshavarzi y Ball, 2017), mediante las que se caracteriza el flujo y su comportamiento hidrodinámico, velocidad, patrones de flujo, contorno de vórtices y el esfuerzo cortante (Akoz *et al.*, 2010 y Campa *et al.*, 2016). También, por medio de esta técnica, ha sido posible analizar el transporte de sedimentos y el tipo de socavación que se genera en las inmediaciones de un puente, generando un modelo donde se observen los grados de remoción de sedimentos, además de poder coleccionar datos (Younkin, 2008).

La interacción del flujo de agua con estructuras de puentes puede generar el fenómeno de la socavación, que es el resultado de la acción erosiva de las corrientes de agua sobre el lecho del cauce, en especial en épocas de lluvias durante la creciente de los ríos (Yang y Su, 2015). Ésta corresponde a la causa principal por la que los puentes colapsan y terminan prematuramente su vida de servicio (Bao y Liu, 2017; Campa y Astorga, 2015; Chen *et al.*, 2013), enfrentando altos costos de reparación (Fisher *et al.*, 2013), además de generar pérdida de accesibilidad en el transporte, e incluso pérdidas humanas (Li *et al.*, 2006).



El tratar de entender las causas de este fenómeno, ha cobrado especial atención desde décadas atrás (Hager y Oliveto, 2002; Ettma *et al.*, 2004; Ettema *et al.*, 2008; Sturm *et al.*, 2016), ya que en la actualidad no existe una solución ideal debido a su complejidad (Santiago, 2007), sin embargo se realizan diversos estudios que tratan de estimar el equilibrio de la profundidad de socavación (Masjedi *et al.*, 2010), basándose en: flujo del agua, clasificación del suelo, columnas y estribos, pero no correlacionando los resultados obtenidos en laboratorio, con los efectos observados de campo (Ettema *et al.*, 2004). Según Etemad-Shahidi y Rohani (2014), comentaron que las fórmulas no dan resultados precisos, además de que solo se analiza una columna o estribo de manera aislada, no teniendo en cuenta la interacción que hay entre ellos, sobre todo cuando están próximas. En la Figura 1 se observa el fenómeno de la socavación de un puente indicado por flecha roja.



Figura 1. Inicio de la socavación en una columna de un puente.

El determinar la posible profundidad de la socavación en columnas, es de mayor importancia para el diseño adecuado de la cimentación de un puente y así poder contrarrestar este efecto devastador (Radice y Davari, 2014).



En el diseño de la cimentación de un puente se deben tener en cuenta parámetros hidráulicos, geometría de las columnas, material del fondo del cauce, tiempo de duración de la máxima crecida del cauce, la ubicación del puente, así como sus elementos de apoyo sobre el terreno (Santiago, 2007).

1.2 Objetivo

Obtener datos e imágenes de alta calidad acerca del comportamiento del flujo del agua a diferentes velocidades, que genera socavación en el lecho del cauce de un río cuando es obstruido por estructuras como las columnas de un puente y usando diferentes geometrías de estas, mediante la técnica óptica Particle Image Velocimetry (PIV).

1.3 Hipótesis

Mediante la aplicación de la técnica óptica PIV a un modelo a escala de una columna colocada en un canal en un laboratorio, será posible estudiar y comprender el mecanismo del fenómeno de socavación, observando y analizando numéricamente el cambio de velocidad y dirección del flujo.

1.4 Justificación

Más de un 50% de las fallas de los puentes en los cauces de ríos en los Estados Unidos de América, han sido reportados debido a inundación y socavación en los últimos 40 años (Elsaid y Seracino, 2014; Masjedi *et al.*, 2010), destinando un presupuesto anual de alrededor de los 30 millones de dólares (Lagasse *et al.*, 2012), y por tanto cobrando atención desde la década de 1990 el tratar de entender las causas de este fenómeno (Hager y Oliveto, 2002), ya que todavía hasta nuestros tiempos no existe una solución ideal debido a su complejidad,



realizándose diversos estudios que tratan de estimar el equilibrio de la profundidad de socavación (Masjedi *et al.*, 2010; Sturm *et al.*, 2016), basándose en: flujo del agua, clasificación del suelo, columnas y estribos, no correlacionando al llevarse a cabo en laboratorio (Ettema *et al.*, 2004), ya que es difícil simular el desarrollo de la erosión (Ettema *et al.*, 2003).

México no es ajeno a los problemas por socavación, los principales Estados con afectación son: Chiapas, Veracruz, Tabasco, Oaxaca y Morelos donde se presentan grandes lluvias cada año, generando grandes costos de reparación en las obras que van desde asentamientos, colapsos parciales y totales (Aguado, 2012). Un ejemplo reciente es el paso Exprés en Cuernavaca Morelos que fuera inaugurado en este mismo año 2017 con un costo aproximado de 2 mil 200 millones de pesos, en solo tres meses socavó considerablemente en uno de sus tramos, debido a una alcantarilla, que fue saturada por el agua subterránea, por acumulación de desperdicios sólidos, erosionando materiales térreos y causando la muerte de dos personas (Miranda, 2019). Se espera que la combinación de diversos estudios, conlleven a resultados de laboratorio más realistas, aunados a modelos numéricos sofisticados y caracterización de la erosión de sedimentos, den un mejor entendimiento de la socavación en el futuro (Sturm *et al.*, 2016).

En este trabajo se realizará el estudio principalmente del flujo de agua al interactuar con las estructuras de puentes como columnas y de manera complementaria los estribos, ya que esta interacción puede cambiar la dinámica del flujo de agua causando vórtices o cambios de velocidad abruptos, los cuales pueden erosionar al suelo o generar esfuerzos en estas estructuras y causarles un daño.



1.5. Clasificación de la socavación

La socavación se clasifica principalmente en dos tipos:

La primera es conocida como natural, que se origina por modificaciones morfológicas, topográficas, características del suelo, entre otros aspectos (Santiago, 2007).

La segunda, es conocida como socavación local, presentándose en una determinada sección del cauce por el efecto de obstrucción de elementos estructurales como columnas y estribos (Santiago, 2007).

La socavación en general es originada por el aumento del flujo del agua incrementando su velocidad y por tanto su fuerza de arrastre sobre los sedimentos del fondo del cauce, ya sea ocasionada por crecientes o por una reducción de su sección hidráulica, generando también la llamada socavación transversal, al aumentar la profundidad del fondo hasta ser compensada. Otro tipo de socavación se puede presentar en curvas, en especial del lado cóncavo de esta, debido a los cambios de dirección del flujo del agua, por lo que el talud exterior queda expuesto, produciendo también la llamada erosión en márgenes, no solo en curvas, arrastrando todo material terreo en las orillas sobre todo en las crecidas de los causes (Santiago, 2007).

1.6. Mecanismo de la socavación

En una estructura como por ejemplo una columna, la socavación ocurre en términos generales, debido a la obstrucción del flujo que origina el elemento. El flujo se divide verticalmente hacia arriba causando un retro flujo, y hacia abajo golpeando el fondo del cauce.

Posteriormente el flujo rodea la geometría de la estructura, y por efecto de separación de flujo se desarrollan vórtices por el flujo turbulento llamados de herradura.



La fuerza de este tipo de vórtices es la principal causante de la remoción de los materiales del lecho del cauce (Raudkivi, 1986), ya que tienen un comportamiento similar a una succión, debilitándose aguas abajo y almacenando los sedimentos posteriormente (Melville, 1975). En la Figura 2 se muestra el mecanismo de socavación en una columna de puente.

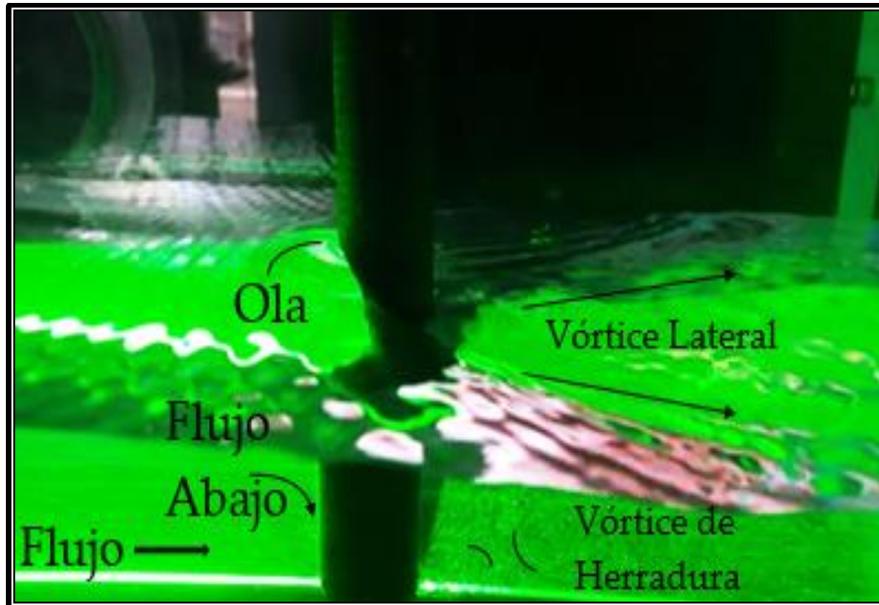


Figura 2. Mecanismo de la socavación en una columna (Melville, 1975).

1.6.1. Socavación en un puente

La formación de fosos alrededor de las columnas de un puente sobre un cauce fluvial, es casi inevitable debido a la socavación, disminuyendo la elevación del fondo debido a un alto nivel de turbulencia y vorticidad (Moncada *et al.*, 2007). Determinar el nivel de la socavación en una crecida es uno de los aspectos más complicados para el diseñador de la estructura (Santiago, 2007).

Se debe evitar en lo posible la presencia de cimentaciones sobre el cauce (Oben-Nyarko y Ettema, 2011) y en dado caso ser lo más esbeltas posibles para evitar lo más posible la



obstrucción del mismo (Radice y Davari, 2014). En la Figura 3 se muestra leve socavación en columna indicado por flecha roja.



Figura 3. Leve socavación en columna circular de un puente.

La socavación en un puente es una de las causas de falla de la estructura (Li *et al.*, 2006), siendo motivo de estudio (Wu *et al.*, 2015), representando mayor riesgo de daño en columnas y estribos cuando se presenta una creciente en un cauce, en especial en puentes pequeños donde no se suele contar con un diseño hidráulico, ni monitoreo de su comportamiento, ni mantenimiento periódico, solo realizando obras de protección como diques o recubrimiento de los taludes, con la idea de que la corriente de agua no alcanzará los extremos de la cimentación del puente, al no ser tan fuerte (Ettema *et al.*, 2003).

Es importante estimar con la mayor precisión posible la profundidad de socavación en el particular punto de los estribos (Mohammadpour *et al.*, 2016). Se debe tener en cuenta la estabilidad geotécnica de los taludes alrededor del estribo en cuanto a su resistencia a la socavación (Sturm, Hong y Stoesser, 2015).



Es importante tener en cuenta la interacción que hay entre estribos y columnas, sobre todo cuando están cerca (Etemad-Shahidi y Rohani, 2014).

Existen tres condiciones de socavación en los estribos (Ettema *et al.*, 2008): Justo debajo del estribo en el lecho del cauce, en las orillas del estribo sobre el talud y la combinación de ambas. En la Figura 4 se muestra leve socavación en estribos indicado por flecha roja.



Figura 4. Leve socavación en estribo de un puente.

1.7. Medidas para control de la socavación

Hay dos aspectos básicos para tratar de evitar la socavación local, una es el colocar material en el lecho del cauce alrededor de la cimentación del puente que sea capaz de resistir la erosión, y la otra es reducir la potencia del flujo turbulento obstruido por la estructura hidráulica, adicionando algún elemento que lo produzca (Amini *et al.*, 2017).



En las siguientes Figuras de la 5 a la 8, se muestran algunas de las diversas protecciones que se han llevado a cabo para tratar de prevenir la socavación en puentes. En la Figura 5 se puede observar la colocación de material granular de gran tamaño para evitar el arrastre de los sedimentos por la fuerza del agua disminuyendo la erosión.



Figura 5. Colocación de piedras alrededor de un muelle (Moncada *et al.*, 2007).

En este caso en la Figura 6 se puede observar la colocación de material más resistente como concreto alrededor del muelle y en toda la sección del puente sobre el lecho del cauce.



Figura 6. Recubrimiento de concreto alrededor del muelle, indicado por flecha (Moncada *et al.*, 2007).



En la Figura 7 se observa la colocación de material asfáltico tanto en la parte inferior como superior del ala del estribo del puente para evitar erosión de los terrenos.



Figura 7. Recubrimiento asfáltico en el ala de estribo, indicado por flechas (Ettema *et al.*, 2003).

En la Figura 8 se observa la colocación de dique de material asfáltico para la contención del agua, alejándola del estribo, además de material granular para evitar erosión en su base indicado por flecha roja.



Figura 8. Realización de dique para contrarrestar la fuerza del agua (Jiménez, 2012).



1.8. LaVision DaVis 8 (*Software for Intelligent Imaging – LaVision Davis 8, 2010*),
<https://www.lavision.de/en/download.php>,

Los sistemas de imágenes inteligentes de LaVision están controlados por DaVis, siendo un potente y completo software para la adquisición, visualización y procesamiento de datos. DaVis es la solución de software completa para imágenes inteligentes (láser) en los campos de dinámica de fluidos, combustión, aplicaciones de rociado, así como imágenes de deformación y deformación de materiales (LaVision DaVis 8).

Los modos de adquisición de imágenes flexibles, los algoritmos avanzados de procesamiento de imágenes, el almacenamiento inteligente y la presentación de datos de imágenes multidimensionales, así como el funcionamiento controlado por software de todo el hardware implementado, son las características clave de DaVis (LaVision DaVis 8).

Esta nueva versión del software confiable de LaVision DaVis 8, está diseñada para Windows 7 (32/64 bit), admite una variedad de nuevos componentes de hardware e impresiona por un aumento significativo de la velocidad de procesamiento (LaVision DaVis 8).

LaVision DaVis 8 proporciona configuraciones de hardware muy flexibles a través de una gran cantidad de componentes y combinaciones disponibles. Este software ofrece varias rutas de actualización desde herramientas compactas de un solo propósito hasta soluciones de imágenes de parámetros múltiples para crecer con sus aplicaciones de gama alta. DaVis 8 proporciona la calidad de alto nivel acostumbrada a una velocidad de procesamiento tremendamente más rápida mediante el uso de la aceleración de hardware de unidades de procesamiento de gráficos (GPU) opcional. Los paquetes de software orientados a la



aplicación están disponibles para tareas diarias de laboratorio y control de calidad, así como para experimentos de investigación altamente sofisticados (LaVision DaVis 8).

Los paquetes de aplicaciones funcionan con la misma plataforma DaVis 8 y proporcionan una amplia gama de herramientas de generación de imágenes de múltiples parámetros.

¿Por qué DaVis 8?

- Solución de software integral para imágenes multidimensionales y de parámetros múltiples (láser).
- La mejor integración del sistema basada en un control de dispositivo integrado totalmente software algoritmos de procesamiento de imágenes de vanguardia.
- DaVis está ampliamente probado en campo y mejorado continuamente por ingenieros y científicos experimentados.
- Basado en más de 25 años de liderazgo en imágenes multiparamétricas.

Características y beneficios

- Algoritmos de vanguardia para obtener la mejor calidad de resultados.
- Adquisición de datos muy flexible y versátil con control de cámara y dispositivo totalmente integrado.



- Los modelos mixtos de cámaras múltiples y sistemas de láser múltiples soportan esquemas de sincronización avanzados para eventos externo.
- Aplicación nativa del sistema operativo de 64 bits para una memoria de imágenes enorme y rápida.
- Visualización de datos en 2D y 3D, especialmente para campos vectoriales, sus estadísticas derivadas e imágenes en bruto de datos de imagen, campos vectoriales, derivados vectoriales e incertidumbre PIV.
- Procesamiento de aceleración mediante el uso de CPU de múltiples núcleos y GPU.
- Gran biblioteca extensible de funciones integradas de procesamiento y filtrado.
- Importación y exportación de datos desde y hacia diversos formatos de imágenes, películas y formatos numéricos en proyectos específicos de la aplicación.
- Complementos gratuitos para MATLAB y Tecplot.
- Soporte y actualizaciones gratuitas de por vida dentro de un lanzamiento importante durante muchos años.



Módulos de aplicación

DaVis ofrece una amplia gama de módulos de aplicaciones específicas para:

Mecánica de fluidos

Campos de flujo resueltos en 4D completos de Stereo-PIV, PIV de resolución temporal, PIV tomográfico.

Ciencia de materiales

Deformación superficial, deformación, forma de la superficie de DIC, Interacción fluido-estructura, deformación volumétrica por DVC.

Sprays

Geometría de la pluma, patrón de rociado, densidad, D32 planar, separación líquido-vapor, tamaño de gota.

Combustión y mezcla

Temperatura, fracción de la mezcla, propagación de la llama, radicales de la llama, hollín y otras emisiones, valor de pH.



En la Figura 9 se muestra imagen por software LaVision DaVis 8 donde se puede observar la corriente de un flujo indicado por vectores, además de su vorticidad indicado por colores.

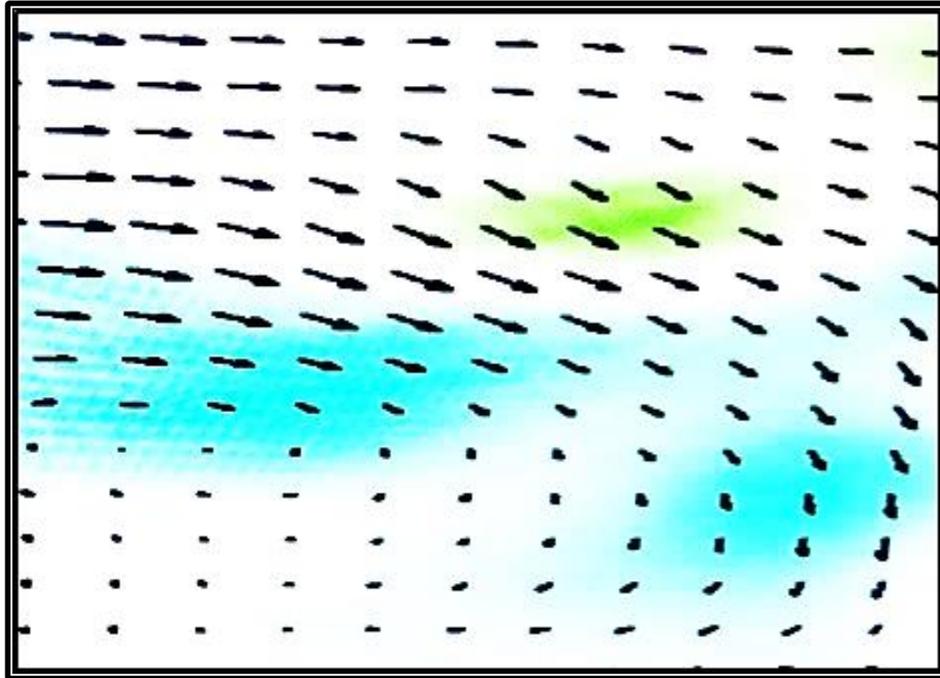


Figura 9. Procesamiento de imagen por software LaVision DaVis 8.

1.9. Tecplot 360 (*Tecplot 360 CFD post processing tools to analyze data, 2014*)

<https://www.tecplot.com/products/tecplot-360>.

Tecplot 360 es un paquete de software de dinámica de fluidos computacional por sus siglas en inglés (CFD) y de simulación numérica utilizado en los resultados de simulación de post procesamiento. Tecplot 360 también se usa en aplicaciones de química para visualizar la estructura de la molécula mediante el procesamiento posterior de los datos de densidad de carga (Tecplot 360).



Es esencial tener las herramientas adecuadas para analizar eficazmente un CFD, otras simulaciones o resultados de pruebas. Las herramientas adecuadas manejarán grandes conjuntos de datos, automatizarán los flujos de trabajo y visualizarán resultados paramétricos (Tecplot 360).

Tecplot 360 es un software de ingeniería que al integrar gráficos 2D y 3D ayuda a comunicar los resultados con imágenes y animaciones brillantes, representadas exactamente de la forma que se desea.

Las tareas comunes asociadas con el análisis de post procesamiento del solucionador de flujo (por ejemplo, Fluent, OpenFOAM) incluyen el cálculo de cantidades de cuadrícula (por ejemplo, relaciones de aspecto, asimetría, ortogonalidad y factores de estiramiento), datos de normalización; Derivar funciones de campo de flujo como el coeficiente de presión o la magnitud de vorticidad, verificar la convergencia de la solución, estimar el orden de precisión de las soluciones, explorar datos de forma interactiva a través de planos de corte (un corte a través de una región), iso-superficies (mapas 3D de concentraciones), partícula Trayectorias (dejando caer un objeto en el "fluido" y observando a dónde va).

Capítulo 2. Marco teórico

2.1. Fórmula para determinar la socavación en un puente

Según el modo de transporte de los sedimentos desde aguas arriba del flujo, las formas de socavación local se clasifican en socavación en agua clara y socavación en lecho móvil. La socavación en agua clara se produce cuando el sedimento es removido de la fosa de erosión, pero no existe reabastecimiento del hueco socavado; mientras la socavación en lecho móvil se produce cuando hay un transporte de sedimentos, por lo que parte de este sedimento se queda atrapado en el hueco de socavación (Santiago, 2007).



Es importante estimar lo más preciso posible la profundidad de socavación en este punto particular (Mohammadpour et al. 2016). Varias condiciones de socavación pueden ocurrir en un puente y las existentes fórmulas para estimar este fenómeno no son precisas (Masjedi, Bejestan y Esfandi, 2010; Etemad-Shahidi y Rohani, 2014). Estimar la socavación en estribos es algo complejo, teniendo en cuenta los diferentes flujos de un río, la variedad de sedimentos y la proximidad con columnas, siendo complicado en un laboratorio simular el mecanismo de la erosión (Ettema *et al.* 2003).

Se toma la fórmula desarrollada por primera vez por Laursen para ser mejorada (Laursen, 1960), siendo modificada por Sturm (Sturm, 2006) y recientemente por Ettema y colaboradores (Ettema, Nakato y Muste 2010) para calcular la profundidad de socavación en cimentaciones de un puente. En esta fórmula se toman en cuenta el efecto de la turbulencia, así como también la importancia del remanso del cauce (Sturm *et al.*, 2016).

Ec. (2.1).

$$\frac{Y_{2\max}}{Y_0} = r_T \left(\frac{Y_1}{Y_0} \right) \left[\left(\frac{V_1}{V_{c1}} \right)^{\frac{6}{7}} \left(\frac{q_2}{q_1} \right)^{\frac{6}{7}} \right] \quad (2.1)$$

Donde:

q_1 Caudal por unidad de ancho en la sección de flujo de aproximación.

q_2 Caudal por unidad de ancho a través de la sección de puente.

V_1 Velocidad media del flujo de aproximación.

V_{c1} Velocidad crítica del flujo de aproximación.

Y_0 Profundidad de flujo no restringida en la sección del puente.

Y_1 Profundidad del flujo de aproximación.

$Y_{2\max}$ Profundidad máxima del agua en la ubicación de la máxima socavación.

r_T Coeficiente de amplificación para tener en cuenta los efectos locales de la turbulencia.



2.2. Fórmula para obtener número de Reynolds

Ciertos flujos suelen ser suaves y ordenados, por otra parte, otros son considerados abruptos. El movimiento altamente en orden de un fluido, se denota por sus capas no alteradas por lo que se considera como laminar. La palabra laminar ha sido tomada debido al movimiento de partículas juntas adyacentes del fluido, en “láminas”. El flujo de los fluidos intensamente viscosos, como los aceites a bajas velocidades, suele ser del tipo laminar. El movimiento ampliamente desordenado de un fluido, que es típicamente observado a altas velocidades y se denota por sus fluctuaciones en la velocidad, por tanto, llamándose turbulento (Cengel y Cimbala, 2006). Ec. Reynolds (2.2).

$$Re = \frac{\rho v R h}{\mu} \quad (2.2)$$

Dónde: ρ = densidad del agua; v = velocidad del agua; $R h$ = radio hidráulico y μ = viscosidad del agua) ($500 \leq Re \leq 2000$). $Re < 500$ se considera flujo laminar; $Re > 2000$ se considera flujo turbulento (Morillo, 2013).

2.3. Fórmula para obtener la vorticidad

La vorticidad es una medición vectorial que se denota por la rotación que experimenta y a la que se puede encontrar el fluido. El movimiento de un fluido se puede considerar en equilibrio, es decir de forma solenoide, si el fluido gira en círculo o en hélice, o de manera general si tiende a rotar en torno a un eje. Cualquier tipo de flujo circular o rotatorio que posee vorticidad podría ser denominado como un vórtice. Un vórtice es un flujo turbulento con una rotación espiral y formaciones de corriente cerradas (Cengel y Cimbala, 2006). Ec. Vorticidad (2.3).

$$\vec{\zeta} = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \vec{k} \quad (2.3)$$



Dónde: dv/dx representa la velocidad transversal, du/dy representa la velocidad axial y k la dirección de la vorticidad. $(i, j, k); (x, y, z)$ dos dimensiones (Cengel y Cimbala, 2006).

2.4. Velocimetría por Imágenes de Partículas

Si bien, es probable que el método de sembrar partículas u objetos a un fluido para observar su flujo se haya usado de vez en cuando a través de los años, no se conoce una aplicación sostenida del método. El primero en utilizar partículas para estudiar fluidos de una manera más sistemática fue Ludwig Prandtl, a principios del siglo XX (Martínez y González, 2014).

Desde hace algunos años se han desarrollado métodos que permiten medir el campo de velocidad de imágenes, de los cuales la técnica óptica conocida como la velocimetría por imágenes de partículas (PIV) ha sido el más destacado (Martínez y González, 2014). La velocimetría con láser Doppler es anterior a la PIV como sistema de análisis láser digital que se llevará a cabo para la investigación y el uso industrial. Capaz de obtener todas las mediciones de velocidad de un fluido en un punto específico, puede considerarse la inmediata predecesora de la técnica PIV bidimensional. La propia técnica óptica PIV encontró sus raíces en la velocimetría de moteado láser, una técnica con la que se comenzó a experimentar a fines de los años setenta. (Hill y Younkin, 2006), unos años después, se encontró que era ventajoso disminuir la concentración de partículas a niveles en los que se pudieran observar partículas individuales (Martínez y González, 2014). En estas densidades de partículas, se observó además que era más fácil estudiar los flujos si se dividían en muchas áreas muy pequeñas de "interrogación", que podían analizarse individualmente para generar una velocidad para cada área (Adrian, 1991 y López, 2006). Las imágenes generalmente se grababan con cámaras analógicas y se necesitaba una inmensa cantidad de potencia informática para analizarlas.



Con el aumento del poder de cálculo de las computadoras y el uso generalizado de las cámaras CCD (Charge Coupled Device), la técnica óptica PIV digital se ha vuelto cada vez más común, hasta el punto de que es la técnica principal en la actualidad (Westerweel, 1993). El desarrollo en las técnicas de visualización y medición de la velocidad en fluidos se ha desarrollado con respecto a los avances tecnológicos, hoy en día existen técnicas que se adaptan a los diferentes softwares de simulación (Raffel *et al.*, 1996); por lo que no se requiere de un banco físico de pruebas para determinar los parámetros de velocidad de flujo o la visualización de las líneas de corriente del mismo fluido. Aún existe la necesidad de utilizar bancos de prueba para determinar ciertas propiedades y características de los fluidos en aplicaciones industriales, por ende, se siguen utilizando las técnicas intrusivas para su determinación (Moncada, 2007). En contraparte, las técnicas no intrusivas están ampliando su campo de aplicación. Un claro ejemplo de ellas es la técnica de medición de la velocidad de flujo y visualización de sus líneas de corriente como la velocimetría por imágenes de partículas (Adrian, 1988).

La técnica óptica PIV es un sistema bidimensional que se compone de una cámara de video, un láser de color verde de alta intensidad y un software computacional para el procesamiento de las imágenes (Adrian, 1984). Debido al avance de las computadoras y las cámaras con tecnología CCD este método se empezó a denominar (DPIV) Digital Particle Image Velocimetry (Adrian, 1988). Hoy en día se utilizan, cámaras digitales para la grabación directa de las imágenes y la valoración a nivel de sub-píxel (Westerweel, 1993; Willert y Gharib, 1991), iluminando el plano que se desea medir con un haz láser, utilizando una lente cóncava y otra cilíndrica para formar así una hoja delgada de luz e introducir en el campo, partículas de igual densidad que la del fluido para que exista flotabilidad interna dentro de este y sigan la corriente del flujo, estas partículas sembradas esparcen la luz que incide sobre ellas la cual es capturada posteriormente por la cámara CCD formando una imagen del flujo (Willert y Gharib, 1991). El software de procesamiento de imágenes también



fue modificado (Raffel et al., 1996). La velocimetría de partículas en imágenes digitales (DPIV), se basa en la ecuación (2.4):

$$V = \frac{d}{t} \quad (2.4)$$

donde d es la distancia recorrida de una partícula en un tiempo determinado t y V es la velocidad adquirida de las partículas. Para las imágenes expuestas, la variación de desplazamiento es determinada en este caso por la correlación cruzada de las zonas de interrogación correspondientes a las primeras y segundas imágenes Ec. (2.4). Para la evaluación con correlación cruzada, las imágenes PIV se dividen en pequeñas áreas rectangulares llamadas "zonas de interrogación". Una zona de interrogación es una región de una imagen f , es decir, una sub-imagen de f . Se supone que todas las partículas que están en una zona de interrogación se mueven en un movimiento uniforme. El algoritmo estándar de la técnica óptica PIV consiste en procesar dos zonas de interrogación 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 10. Las zonas de interrogación deben procesarse para encontrar un promedio de movimiento de partículas en las dos imágenes. De esta manera, la metodología consiste en calcular directamente la correlación cruzada entre las dos zonas. La localización del pico más alto de la correlación del plano corresponde a la variación de desplazamiento más probable de la partícula en el área de interrogación. La velocidad del subpíxel del desplazamiento es obtenida usando una función gaussiana al pico de la correlación, y encontrando la localización máxima exacta (Martínez y González, 2014). En la Figura 10 se muestran imágenes divididas en zonas de interrogación.

$$f(x, y) \cdot g(x, y) = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=N}^N f(i, j)g(i + x, j + y) \quad (2.5)$$



Para $f(x, y)$ es la sub-imagen correspondiente a la primera zona de interrogación, $g(x, y)$ es la sub-imagen asociada a la segunda zona, y M y N son el ancho y la altura en píxeles de la zona de interrogación, respectivamente (Campa *et al.*, 2016). El proceso consiste en mover una sub-imagen sobre la otra y agrega los productos de los valores donde se produce la superposición. Cada valor se guarda como una matriz llamada "matriz o plano de correlación cruzada", en la posición que representa el movimiento de la segunda sub-imagen sobre la primera.

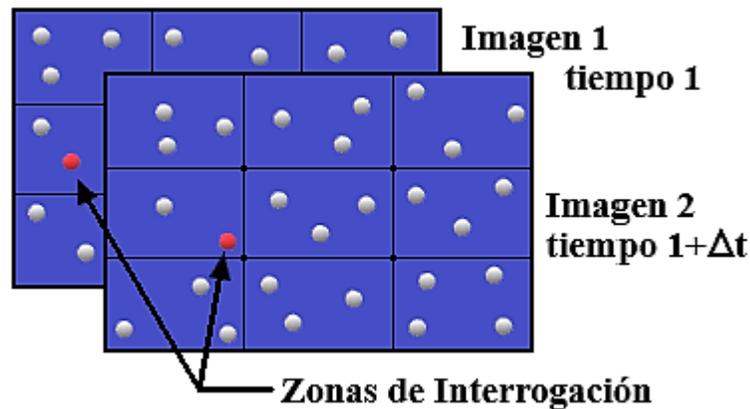


Figura 10. Se muestran imágenes divididas en zonas de interrogación (Adrian, 1991 y López, 2006).

En el proceso de imágenes, la correlación cruzada se utiliza para encontrar la posición más similar entre dos imágenes como se muestra en las Figuras 11 (a) y 11 (b), correspondientes a imágenes consecutivas en el tiempo.

A continuación, estos tipos de imágenes se procesan para determinan el movimiento individual descrito por las partículas entre una imagen y la otra. La figura 11 (c) muestra movimiento de cada una de estas partículas que puede verse como un par de partículas que van desde el tiempo t_1 hasta el tiempo t_2 (Adrian, 1991).

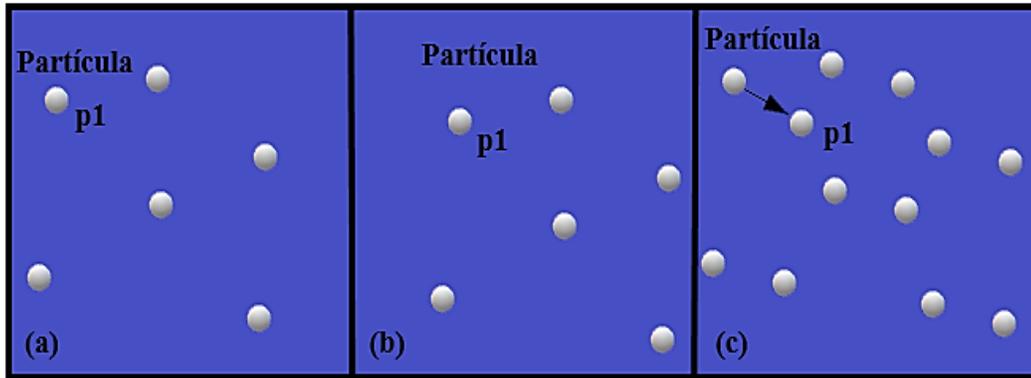


Figura 11. Esquema de imágenes en movimiento (Adrian, 1991 y López, 2006) a) en tiempo t_1 , b) en tiempo t_2 y c) superposición de imágenes en los dos tiempos.

Figura 12. Esquema de la correlación cruzada entre dos sub-imágenes con partículas sembradas en los tiempos t_1 y t_2 , generando un pico central en posición $p(0,0)$ y un vecino cercano en posición $p(\Delta x, \Delta y)$.

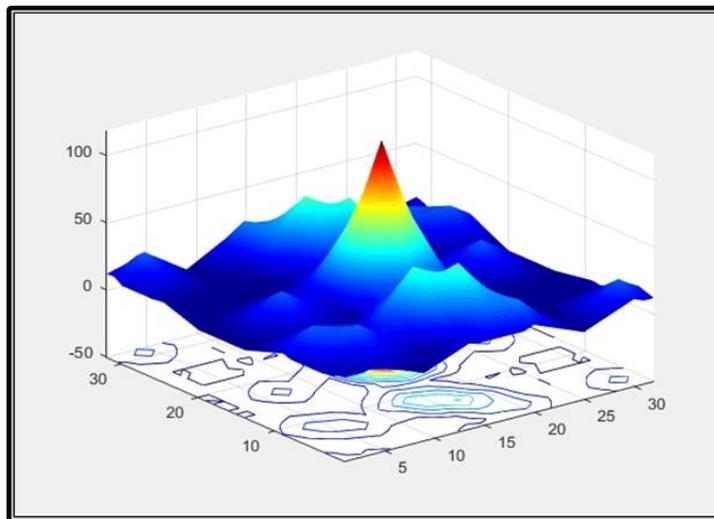


Figura 12. Correlación cruzada entre dos sub-imágenes.

En la Figura 13 se muestra el comportamiento del flujo del agua con las partículas sembradas e iluminado por láser en un canal de flujo de agua al ser obstruido.

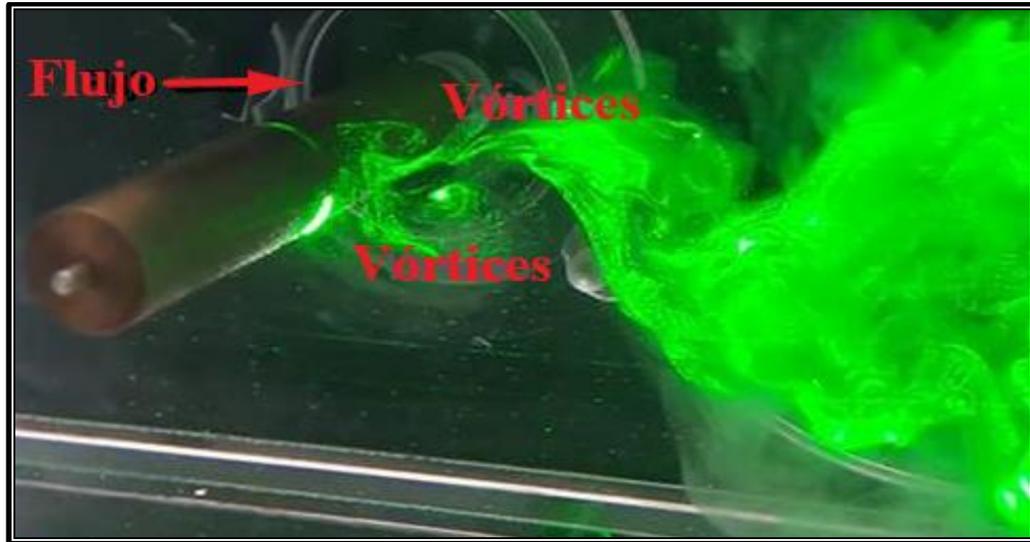


Figura 13. Generación de la vorticidad cerca de la columna.

Capítulo 3. Diseño experimental

3.1. Arreglo del trabajo

Se utilizó un canal hidráulico rectangular con 0.50 m de largo, 0.15 m de profundidad y 0.15 m de ancho, provisto con una bomba eléctrica de 1.5HP . Las paredes del canal son de acrílico transparente, para permitir que la luz láser Lincoln de 532 nm pase a través de microesferas de vidrio de $9\text{-}13\text{ }\mu\text{m}$ plantadas en el agua. Se dispuso un depósito para proporcionar agua con una capacidad de 200 litros . Para simular el efecto de la obstrucción, se utilizaron columnas de sección cuadrada, circular, de gota y doble cuchilla, hechas de plástico de ABS de 2 cm de ancho y 15 cm de largo. Se utilizó una cámara de video CCD Phantom M 310 y un software de imagen de procesamiento llamado LaVision DaVis 8 para obtener imágenes y extraer datos generales del comportamiento del flujo. En la Figura 14 se muestra el equipo utilizado.



Figura 14. Equipo utilizado para desarrollar los experimentos.

Las pruebas se llevaron a cabo en un área oscura con el objetivo de registrar la dinámica de las partículas y el flujo de agua mediante la configuración óptica de PIV. Se aplicó una pendiente longitudinal de cero por ciento al flujo de agua en el canal.

En la primera parte del experimento se analizó el flujo del agua cuando es obstruido por una estructura como en este caso una columna circular, realizándose en concordancia con el número de Reynolds, del flujo laminar al turbulento con gastos de 0.107253 L/s , 0.44794 L/s , 0.7760094 L/s , 1.066224 L/s y 1.583 L/s para el flujo frontal de la columna, es decir aguas arriba, luego 1.583564 L/s , 2.220775 L/s , 2.725496 L/s , 3.242836 L/s y 3.268072 L/s para el flujo posterior, es decir aguas abajo (ver Figura 23, áreas de estudio del primer experimento). Se utilizó agua potable sin ningún tratamiento especial, alcanzando un tirante de agua igual a 9.0 cm . Se usó una columna circular como modelo. En la Figura 15 se muestra la columna atravesada por el flujo de agua con esferas de vidrio sembradas y la iluminación con una hoja de luz láser.

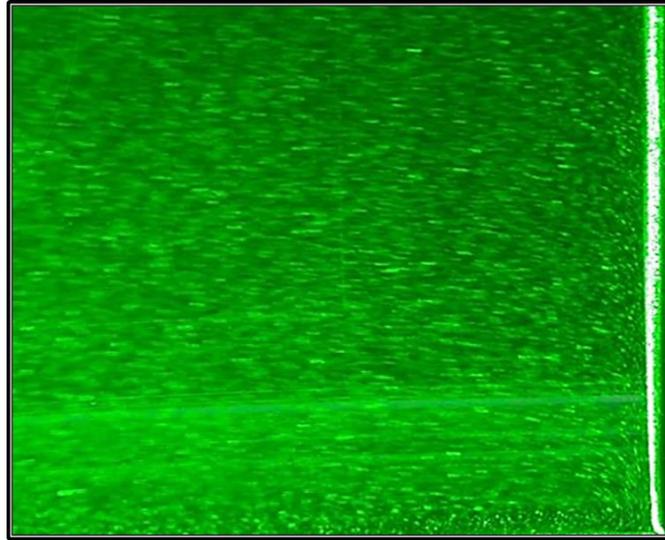


Figura 15. Columna cruzada por flujo aguas arriba mediante iluminación láser con esferas.

De igual forma, para la segunda parte del experimento se realizó en concordancia con el número de Reynolds, en flujo de turbulencia con un gasto de 1.583 L/s . Se utilizó agua potable sin ningún tratamiento especial, alcanzando un tirante de agua igual a 15 cm . La observación del flujo fue en planta como se muestra en Figura 37, añadiendo una columna cuadrada, circular, de gota, gota invertida y doble cuchilla. En la Figura 16 se muestran las geometrías utilizadas para la segunda parte del experimento.

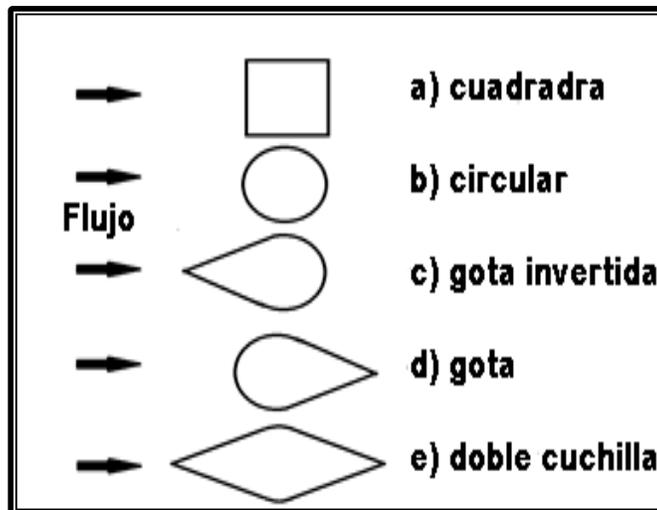


Figura 16. Diferentes geometrías usadas para el segundo experimento.



Para ambos experimentos una hoja de luz verde emitida por el un arreglo óptico que consta de un espejo hexagonal rotante y un láser, cruza paralelamente a la columna a lo largo del canal, iluminando a las esferas de vidrio sembradas en el flujo de líquido, causando el efecto óptico de esparcimiento de la luz. La luz esparcida es utilizada para formar la imagen de las partículas sembradas en el flujo del líquido, en el CCD de la cámara de video. Para obtener el movimiento de las partículas arrastradas por el flujo de agua, la cámara CCD de video fue sincronizada, nivelada, su lente enfocada para ver lo más nítidas las partículas y además colocada perpendicular al canal a una distancia de 50 cm, y aproximadamente al centro del área de observación (ver Figura 17).

Se tomó video para la obtención de 40 imágenes con un tiempo de separación entre ellas de $700 \mu s$. Para obtener un solo vector con desplazamientos Δx y Δy en el plano imagen (x,y) se utilizó dos sub-imágenes o ventanas de 24×24 píxeles consecutivas en el tiempo con un promedio de 25 partículas o esferas de vidrio dentro de estas.

De esta manera, el movimiento de las esferas se puede ver en detalle, con la vorticidad y los vectores en el flujo de agua en el frente y atrás, debido a la obstrucción generada por las diversas geometrías, especialmente a altas velocidades. Se verificó que la velocidad del agua en el canal fuera muy cercana a la velocidad de las imágenes obtenidas por la cámara a través de la relación *longitud / píxeles*.

El software de procesamiento de imágenes LaVision DaVis8 facilitó enormemente la tarea de obtener la resolución de las imágenes, áreas específicas para observar, cantidad y tamaño de vectores, así como la división de colores de la vorticidad, entre otros aspectos. En la Figura 14 se muestra el equipo completo de trabajo. En la Figura 18, 19, 20 y 21, se muestran los elementos del equipo utilizado.

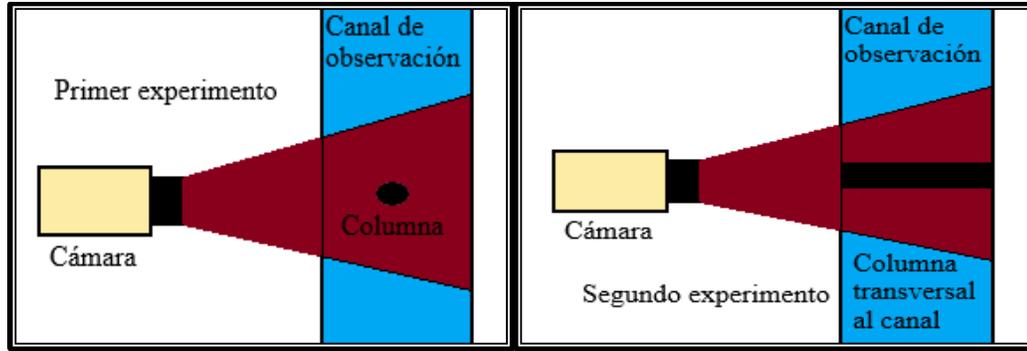


Figura 17. Diseño de los experimentos, vista superior.

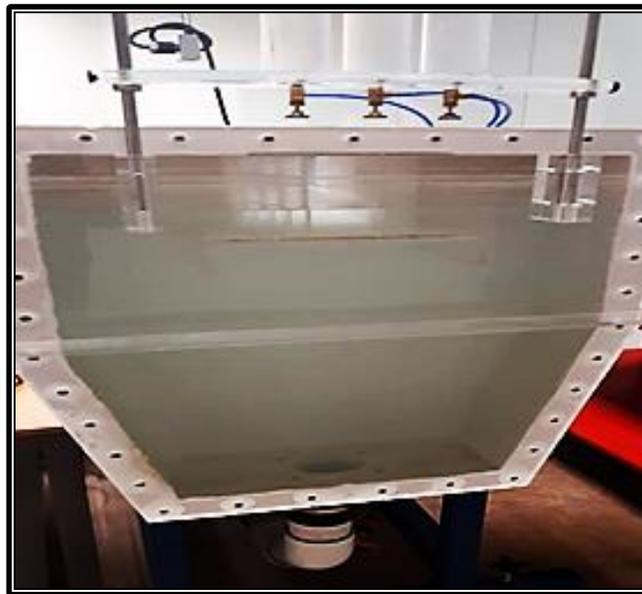


Figura 18. Depósito de agua: 200 litros de capacidad.

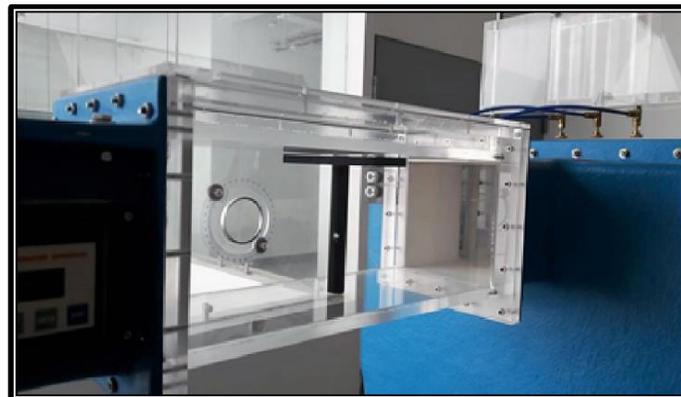


Figura 19. Canal de agua y modelo de columna en el interior.

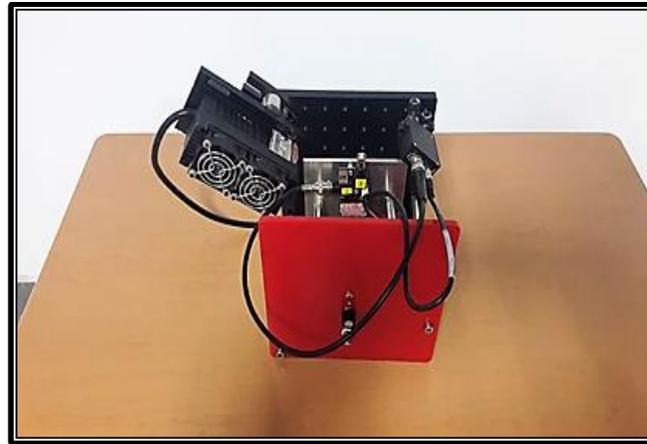


Figura 20. La luz láser Lincoln de longitud de onda $\lambda = 532 \text{ nm}$.



Figura 21. Cámara de video Phantom M 310 CCD.



En la Figura 22 se muestra esquema de las partes que integran el funcionamiento de la técnica PIV.

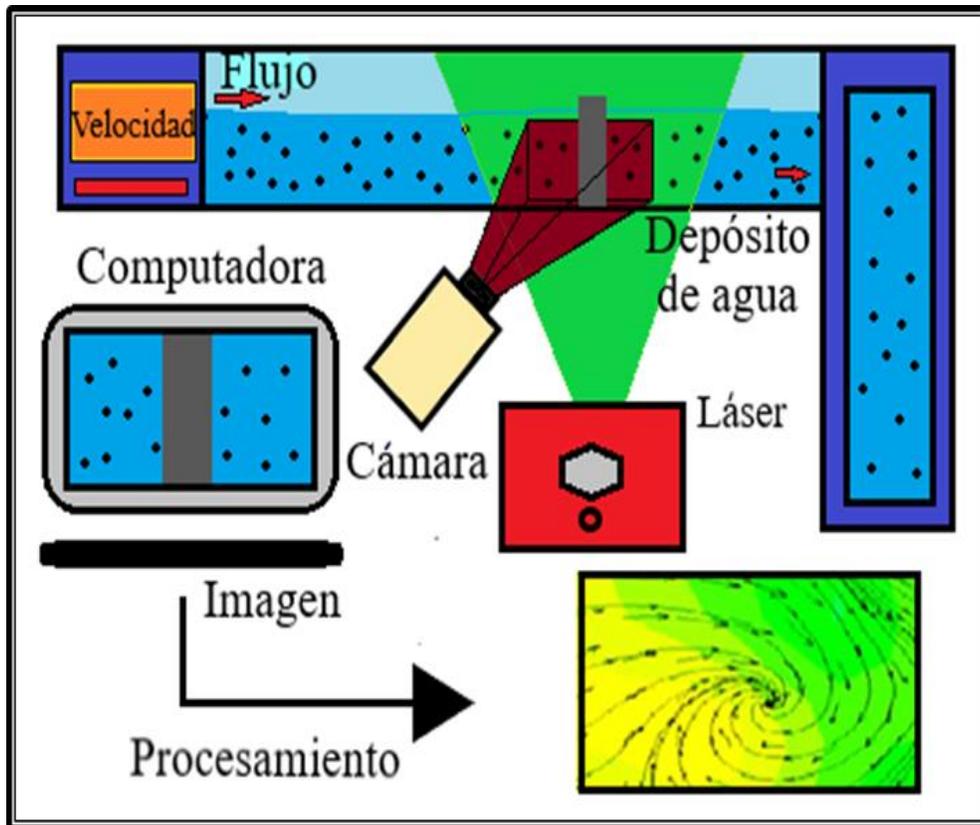


Figura 22. Esquema de las partes que integran el funcionamiento de la técnica PIV (González, 2005).



3.1.2. Diagrama de flujo del experimento.

Verificación del buen funcionamiento del equipo a utilizar como canal hidráulico, software y sistema PIV.

Proposición y fabricación de columnas diferentes geometrías.

Experimentación con equipos y columnas para la obtención óptima de datos procesados, diferentes velocidades y tomas con camara.

Pos - procesamiento de datos para el desarrollo de imágenes

Obtención del comportamiento del flujo del primer experimento.

Obtención del comportamiento del flujo del segundo experimento.

Análisis de los resultados y conclusiones.



Capítulo 4. Presentación de resultados

4.1. Resultados

Las áreas del primer experimento al frente (aguas arriba) y posterior (aguas abajo) junto a la columna circular se muestran a continuación, siendo habilitadas por el software y posteriormente procesadas a diferentes velocidades. La Figura 22, muestra las áreas de estudio.

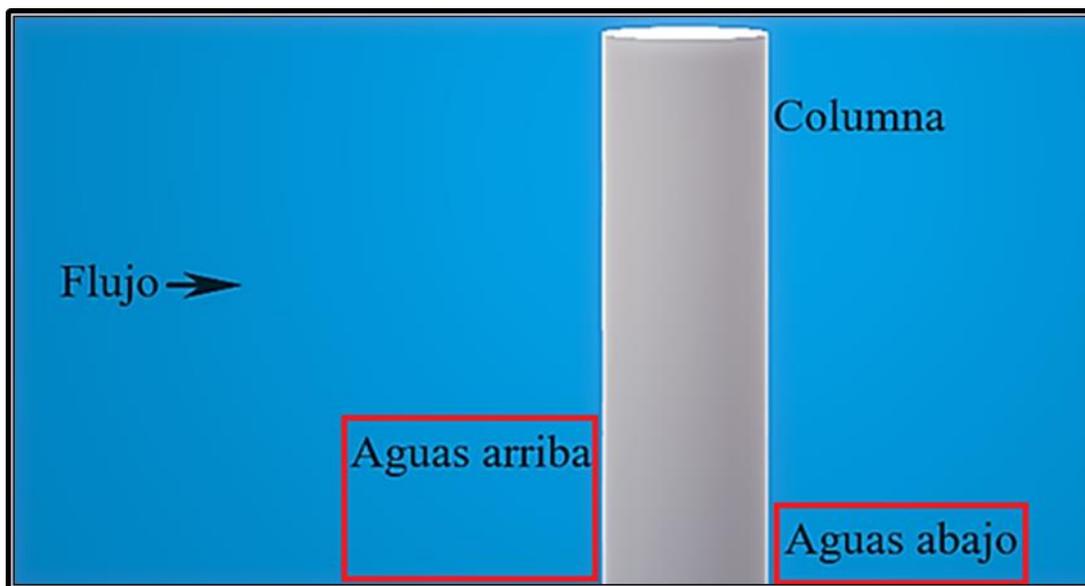


Figura 23. Áreas de estudio del primer experimento.

4.1.1 Resultados del primer experimento de la sección de estudios frontal (aguas arriba)



A continuación, se muestran las imágenes correspondientes a la sección de estudio frontal utilizando los datos obtenidos de Davis 8 y procesándolos por software Tec Plot 360 para la obtención de las imágenes finales. En este apartado se presentan imágenes correspondientes a la sección de estudio frontal (aguas arriba) utilizando los datos obtenidos de Davis 8 y procesándolos por software Tec Plot 360 para la obtención de las imágenes finales. En las Figuras de la 25 a la 29 se muestra la vorticidad a diferentes velocidades de flujo, correspondientes al área de estudio frontal aguas arriba. El flujo de agua a una velocidad baja choca con la columna y se devuelve, lo que se conoce como retro flujo, además se observa una tendencia a desplazarse hacia al fondo, ya que la velocidad de flujo aumenta, y tiende a desplazarse linealmente sobre la base de la columna. En la Figura 30, se muestra una función desarrollada que relaciona el tamaño del radio de curvatura generado por el flujo a diferentes velocidades cuyos valores se encuentran en la Tabla 1 y 2. Las mediciones para el tamaño del radio de curvatura se tomaron de las mismas imágenes aguas arriba por visualización como se muestra en la Figura 24. También se obtuvieron desviación estándar (S) y coeficiente de determinación (r^2).

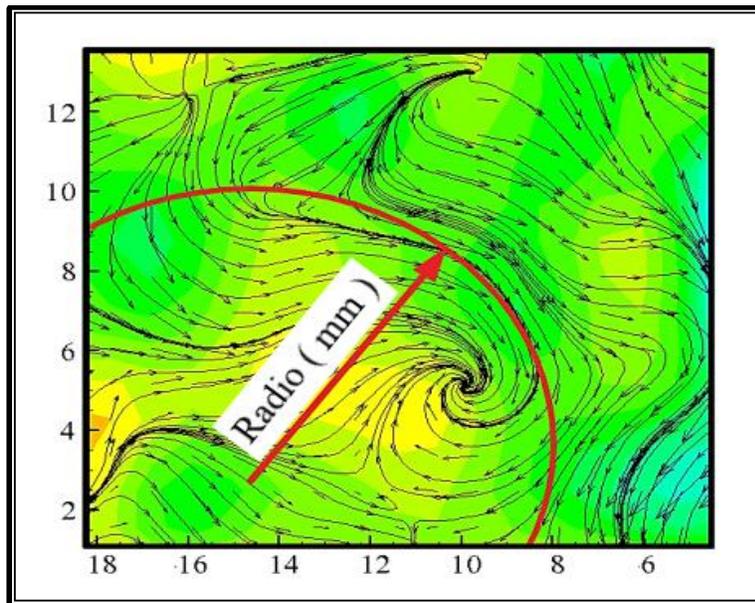


Figura 24. Medición para el tamaño del radio de curvatura, del área aguas arriba.

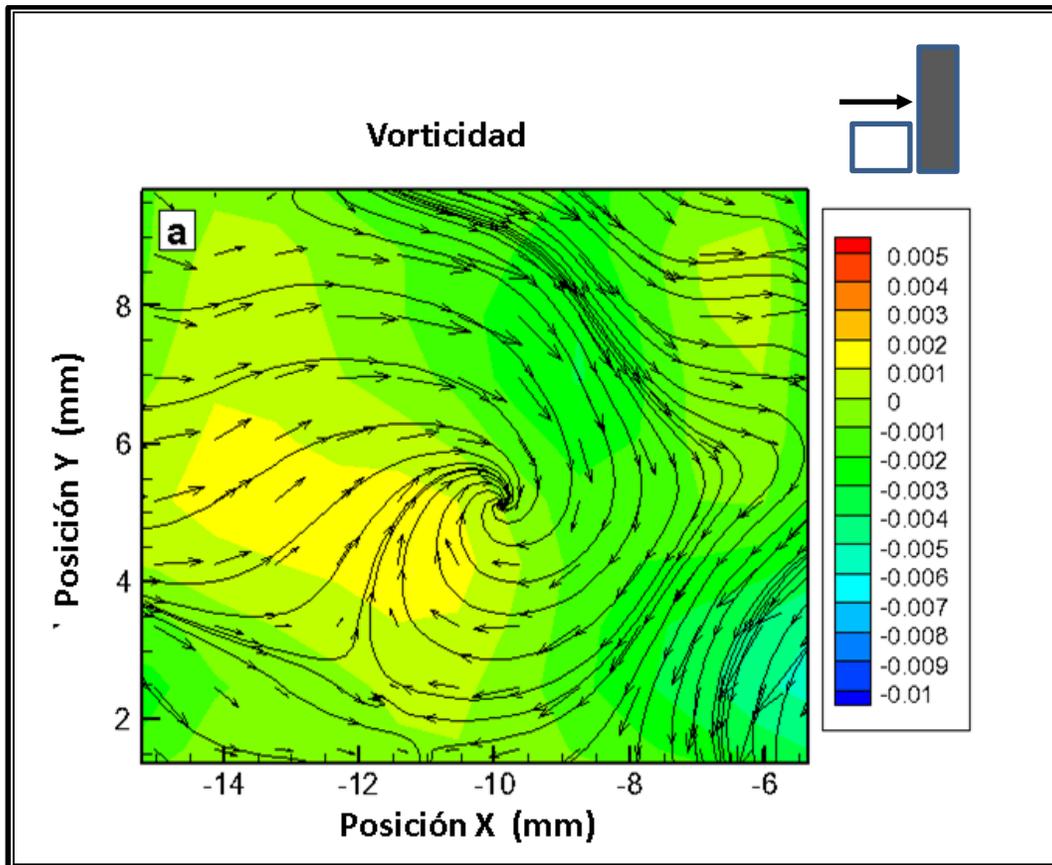


Figura 25. Caudal 0.10 L/s : Flujo laminar muy bajo, se realiza de línea de circunferencia y retro flujo debido a la obstrucción.

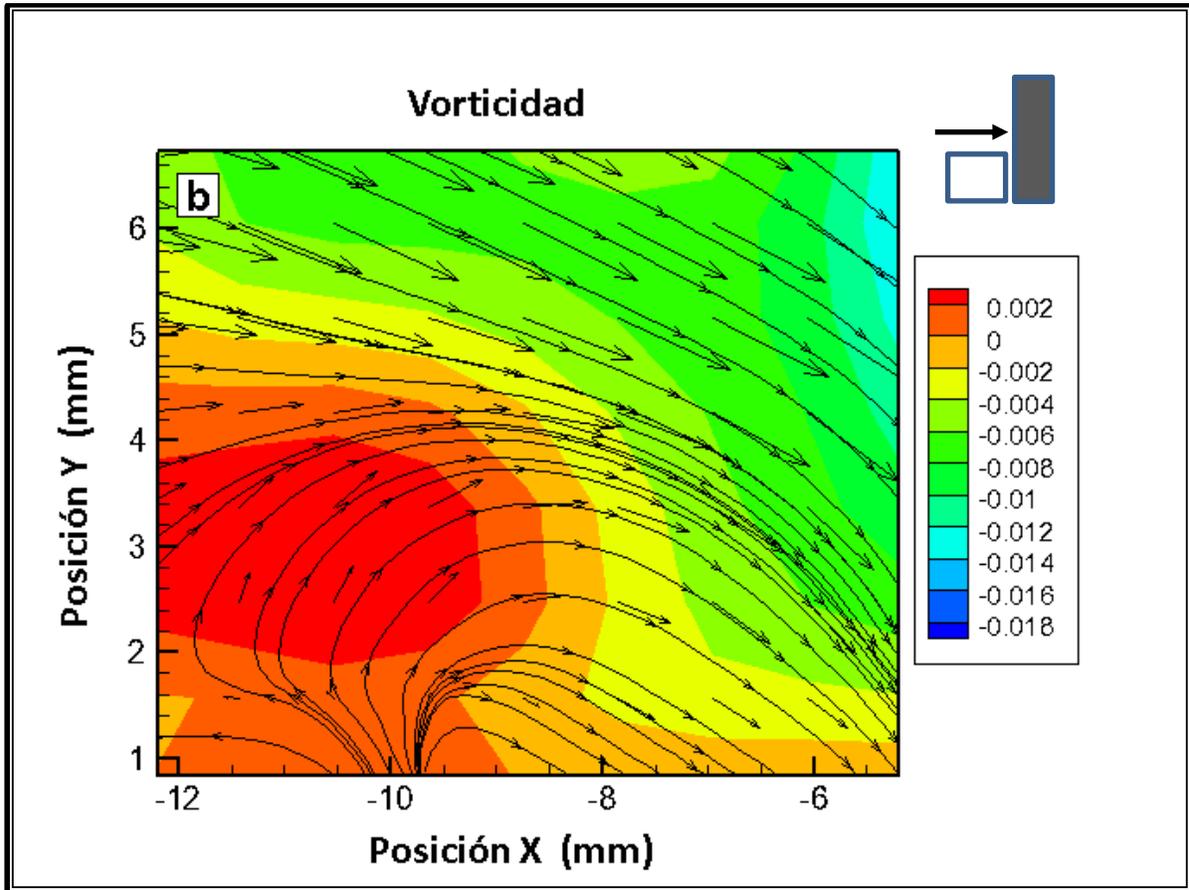


Figura 26. Caudal 0.44 L/s : La línea circular comienza a perderse con una tendencia en ángulo recto, el retro flujo de igual forma se ha perdido.

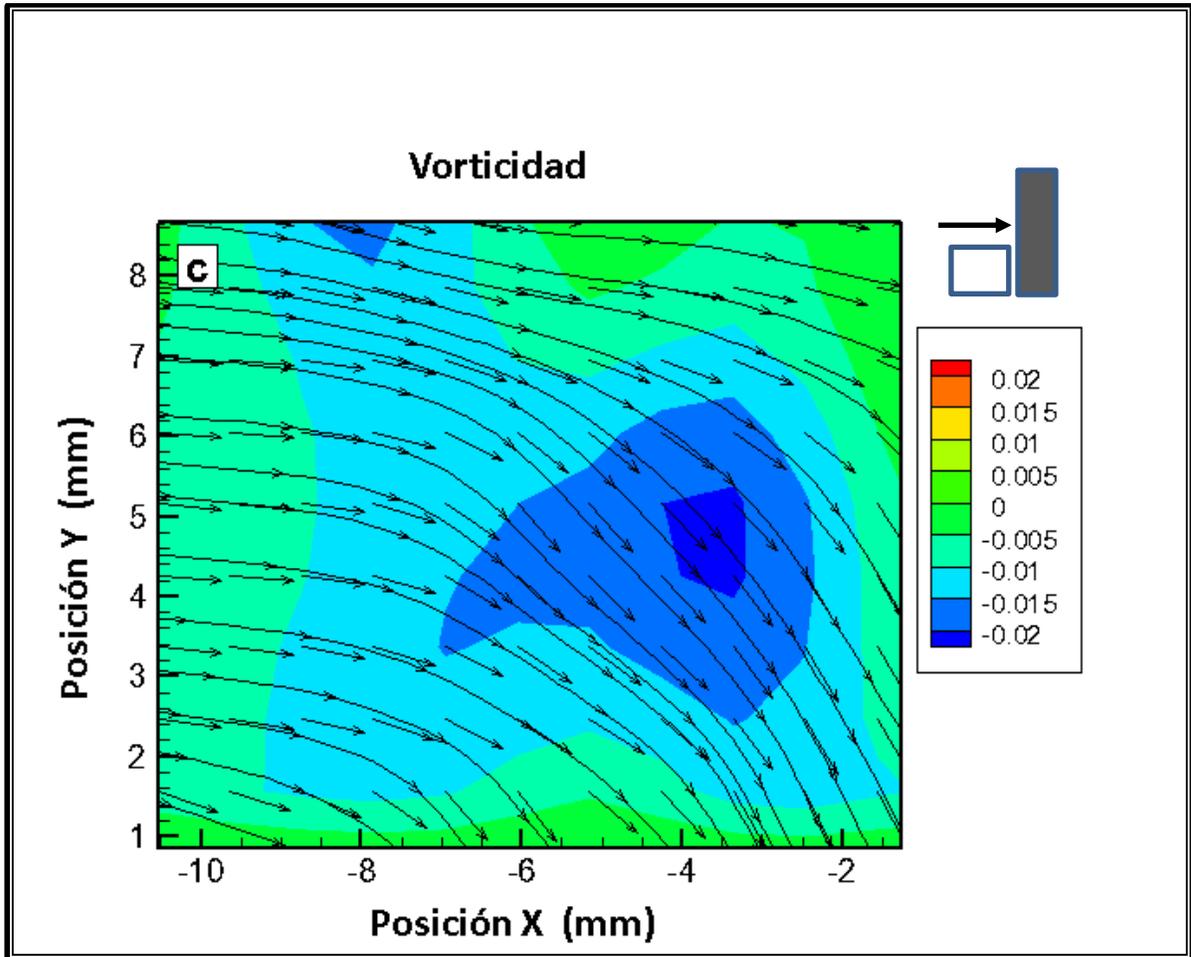


Figura 27. Caudal 0.77 L/s : La línea circular se ha perdido, con una tendencia a ir en línea recta.

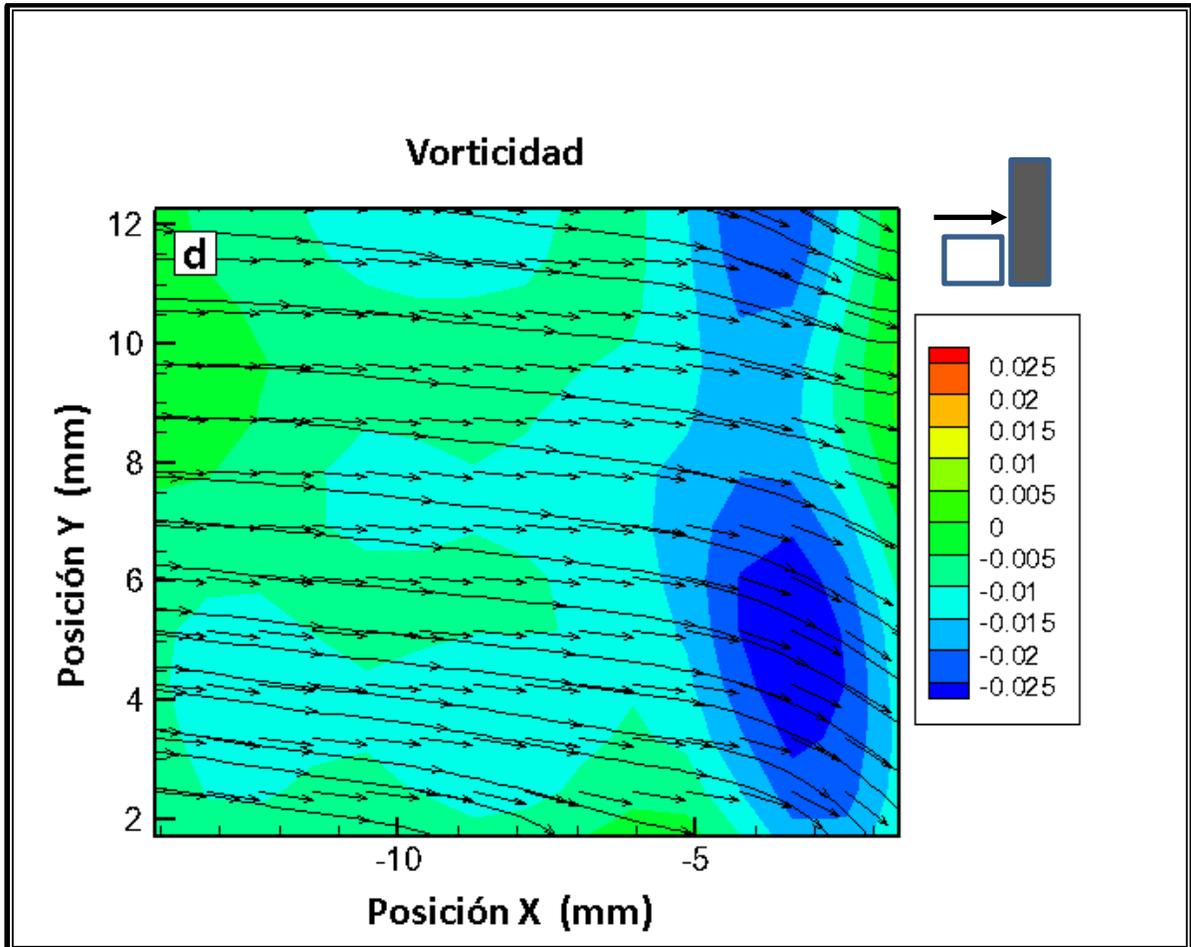


Figura 28. Caudal $1.06 L/s$: El flujo de agua empieza a mostrar una tendencia lineal debido a la velocidad.

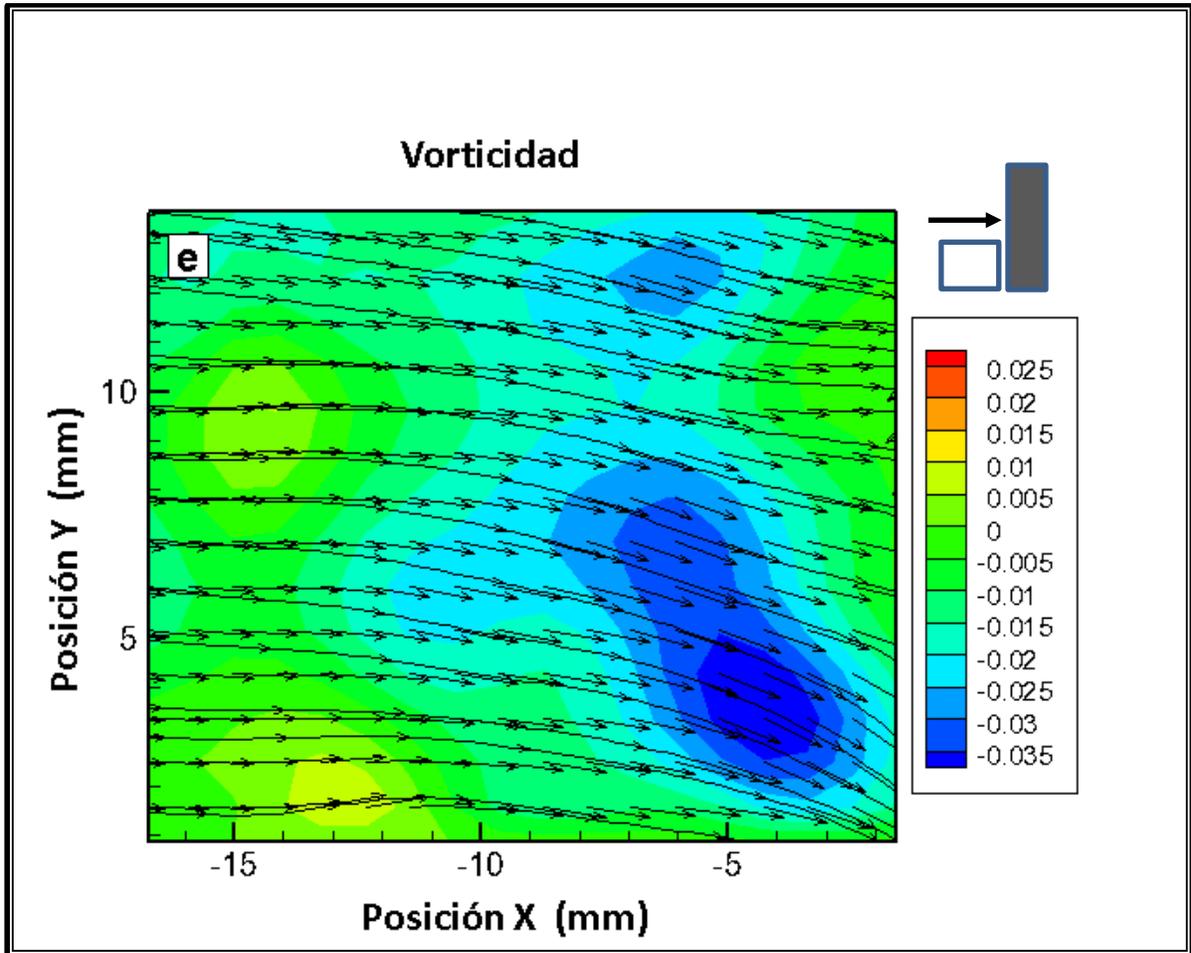


Figura 29. Caudal 1.58 L/s: Flujo de agua totalmente lineal, con un alto grado de vorticidad.



La Tabla 1 muestra los datos correspondientes al caudal, el radio de curvatura del vórtice y la tendencia del flujo que pertenece al lado frontal.

Tabla 1: Caudal, radio de curvatura y tendencia de flujo parte frontal.

Caudal (L/s)	Radio de curvatura (mm)	Visualización cualitativa de la intensidad de la vorticidad
0.107253	7	Bajo
0.44794	4	Moderado
0.7760094	2	Alto
1.066224	0.5	Muy alto
1.583564	0.0	Extremadamente alto

En la Tabla 2 se muestra la magnitud de escala, correspondiente al número de Reynolds $Re = \rho v R_h / \mu$, donde: ρ = densidad del agua; v = velocidad del agua; R_h = radio hidráulico y μ = viscosidad del agua. Para el lado de frente del canal hidráulico ($500 \leq Re \leq 2000$). $Re < 500$ se considera flujo laminar; $Re > 2000$ se considera flujo turbulento.

Tabla 2: Número de Reynolds primer experimento parte frontal.

Caudal (L/s)	Velocidad (m/s)	Reynolds (Re)
0.107253	0.009166923	324.3603702
0.44794	0.03828547	1354.68457
0.7760094	0.06632559	2346.849936
1.066224	0.091130256	3224.532753
1.583564	0.13534735	4789.100587



En la siguiente gráfica generada se muestra el flujo del agua correspondiente a la sección aguas arriba.

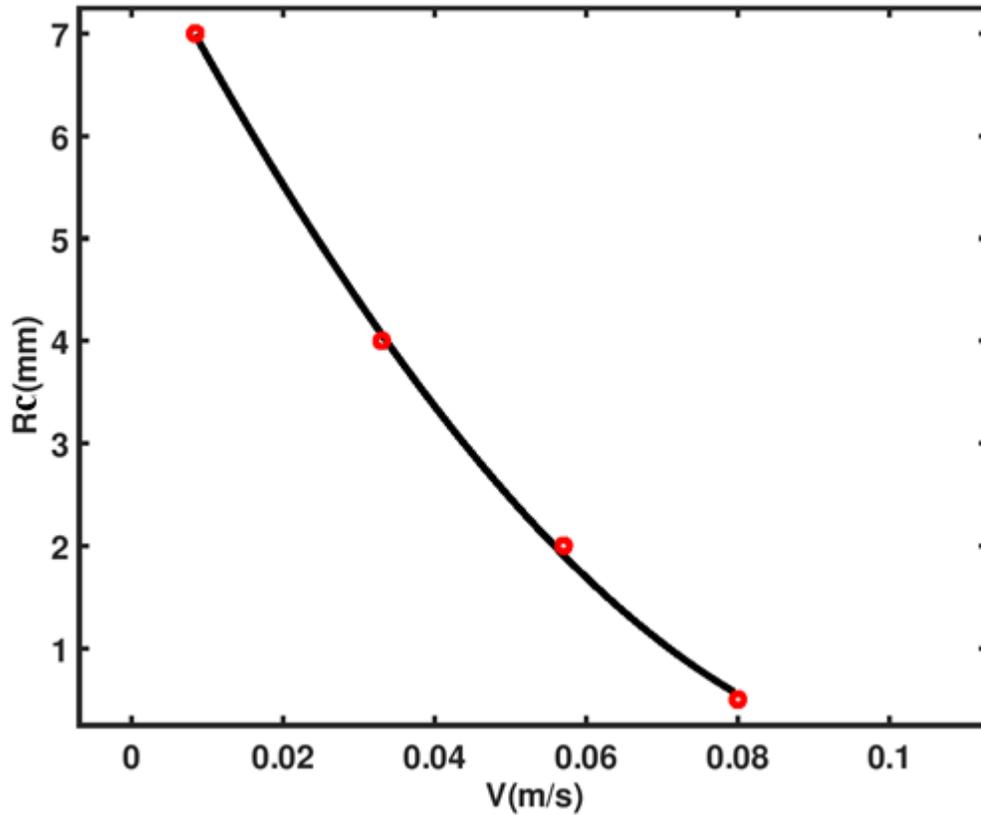


Figura 30. Los puntos del Radio de Curvatura en función de la Velocidad, correspondientes al experimento, se trazan en círculos rojos, y unidos mediante una curva de color negro.

En la función de la Figura 30, fue obtenida realizando un ajuste de curvas con los puntos medidos del tamaño del Radio de curvatura en función de la Velocidad con; $S = 0.107394$; $r^2 = 99.90\%$. Ec. (3.1). Para el ajuste de los puntos con la curva se utilizó la función *polyfit* del software Octave.

$$Rc(V) = 8.119 - 148.1V + 665.4V^2 \quad (3.1)$$



4.1.2 Resultados del primer experimento de la sección de estudios posterior (aguas abajo).

En las Figuras de la 32 a la 36 se muestra la vorticidad a diferentes velocidades de flujo, correspondientes al área de estudio posterior, aguas abajo. A un caudal bajo (turbulencia mínima) se observa baja vorticidad, pero a medida que aumenta la velocidad, se incrementa la vorticidad y el flujo de agua golpea fuertemente la base de la columna. En la Figura 37, se muestra una función desarrollada que relaciona la distancia entre la columna y el vórtice a diferentes velocidades, valores en Tabla 3 y 4. Las mediciones para la distancia se tomaron de las mismas figuras aguas abajo por visualización, como se muestra en la Figura 31. También se obtuvieron desviación estándar (S) y coeficiente de determinación (r^2).

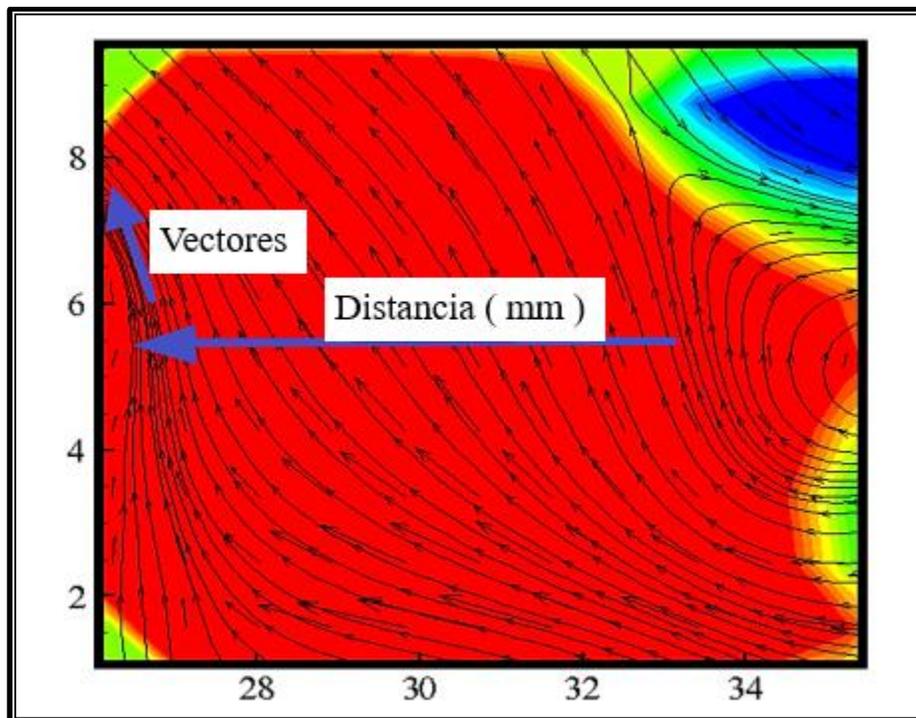


Figura 31. Distancia de la columna al vórtice, área aguas abajo.

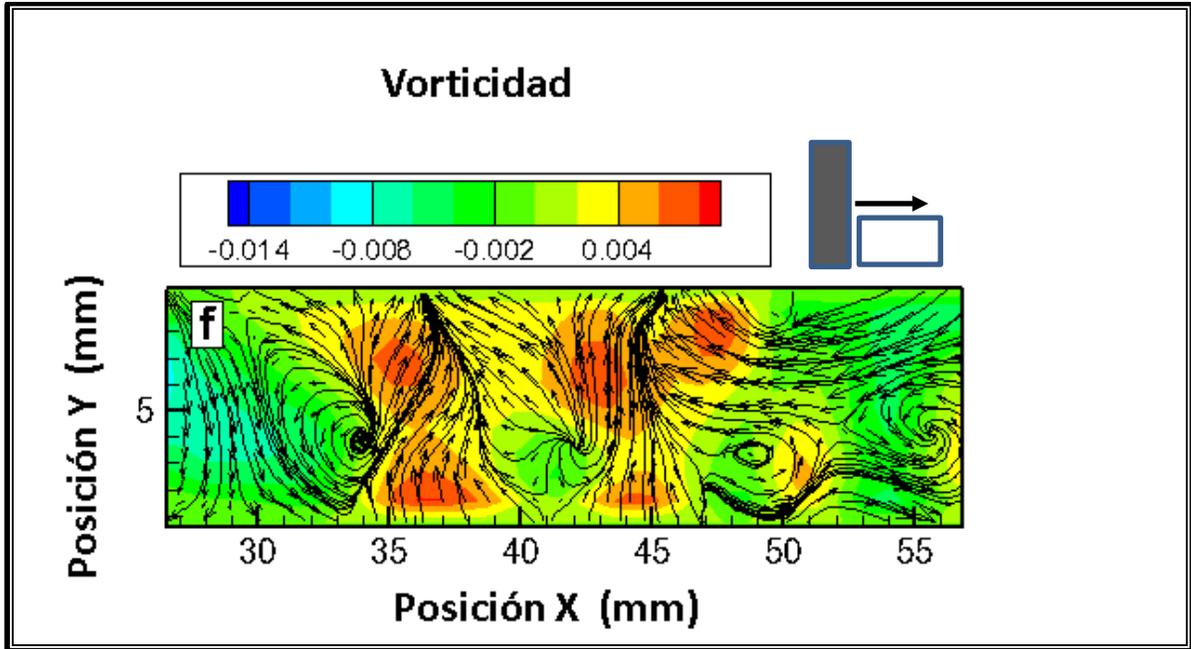


Figura 32. Caudal 1.58 L/s : No se observa vorticidad con suficiente fuerza o flujo en contra cercano a la columna.

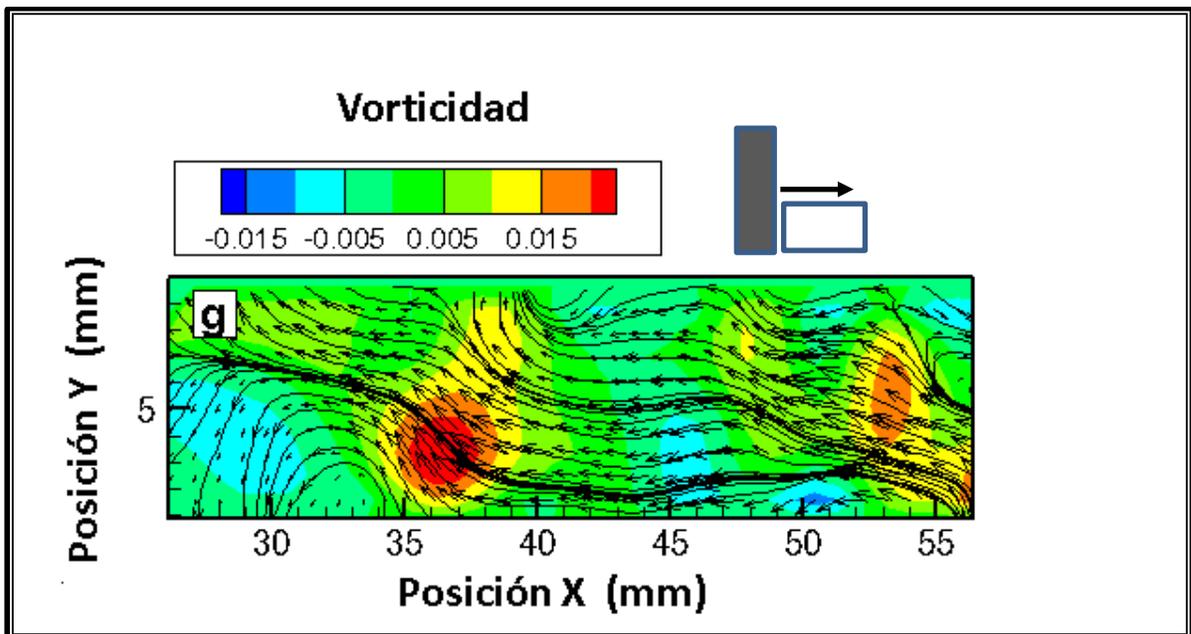


Figura 33. Caudal 2.20 L/s : Se observa formación de vórtices, así como de flujo en contra cercano a la columna.

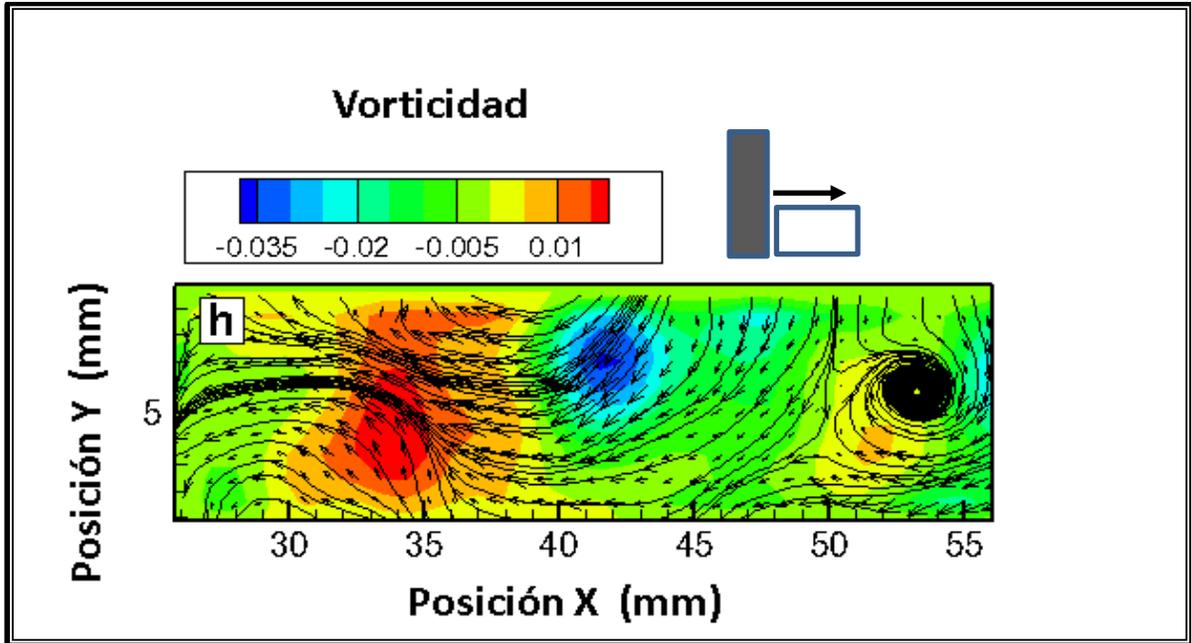


Figura 34. Caudal 2.72 L/s: La formación cercana a la columna tanto de vórtices como flujo en contra es evidente.

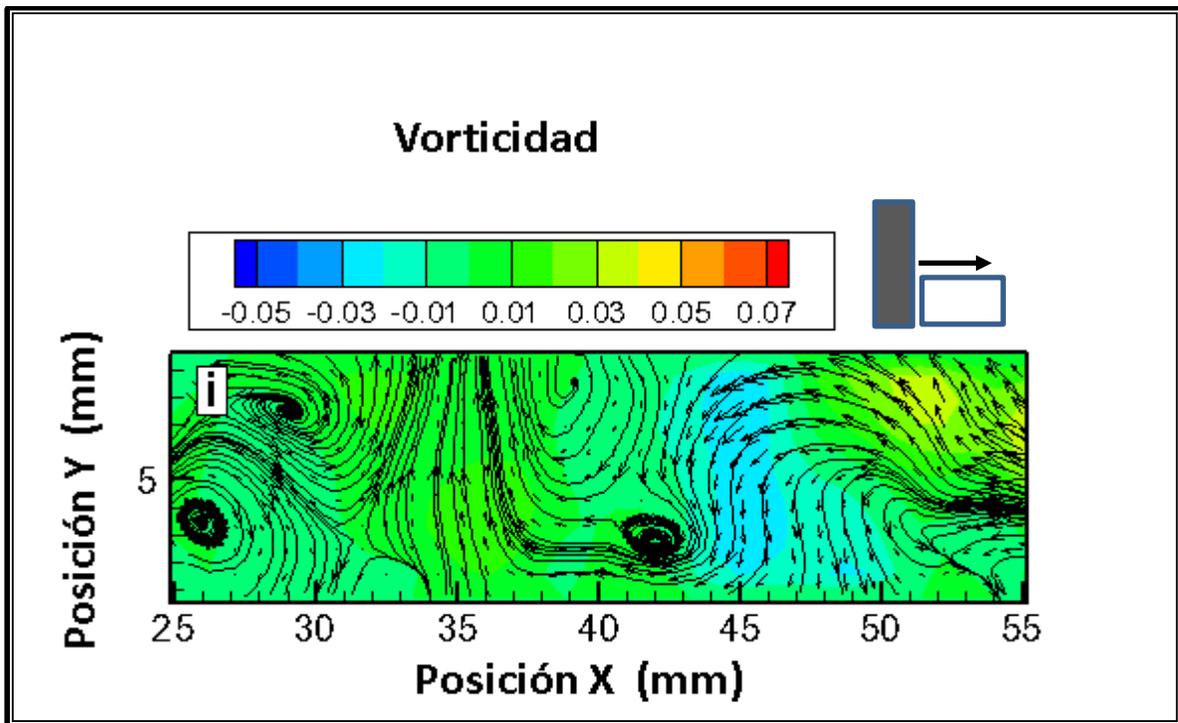


Figura 35. Caudal 3.24 L/s: Existe la presencia de vórtices muy próximos a la columna.

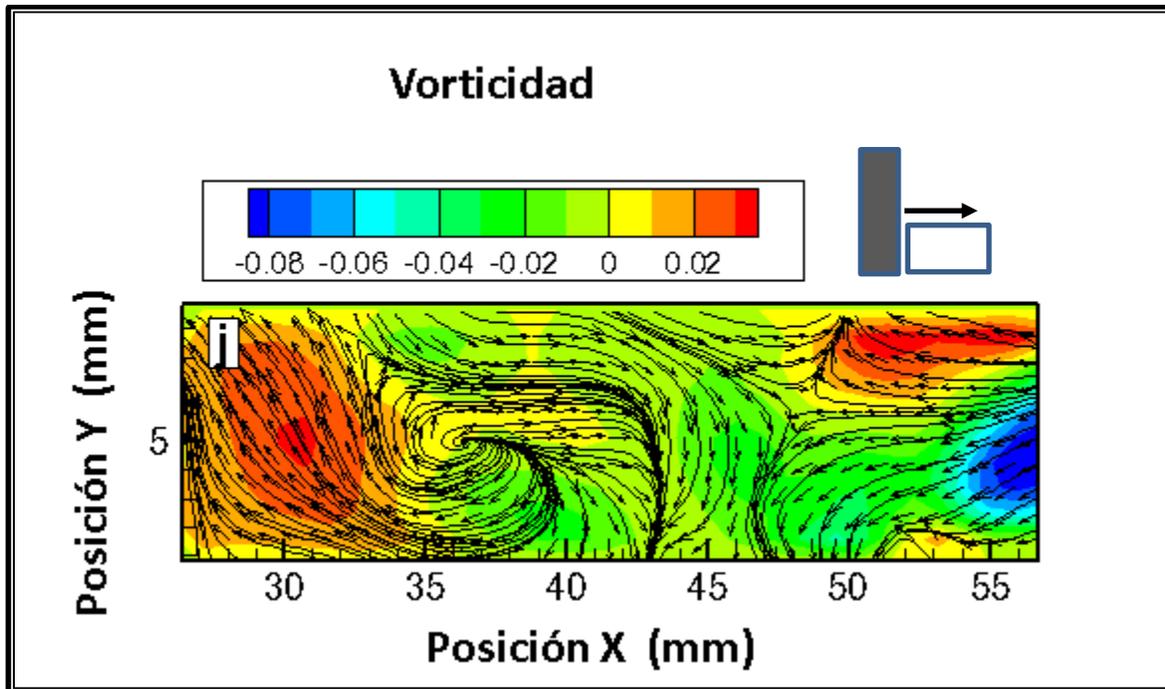


Figura 36. Caudal 3.26 L/s: Se observa fuertemente, presencia de vorticidad, así como flujo en contra, próximo a la columna.



La Tabla 3 muestra los datos correspondientes al caudal, la distancia a la columna y la tendencia del flujo que pertenece a la sección aguas abajo próxima a la columna.

Tabla 3: Caudal y tendencia de flujo parte posterior.

Caudal (L/s)	Distancia (mm)	Visualización cualitativa de la intensidad de la vorticidad
1.583564	3.5	Bajo
2.220775	3.0	Moderado
2.725496	2.1	Alto
3.242836	1.0	Muy alto
3.268072	0.8	Extremadamente alto

En la Tabla 4 se muestra la magnitud de la escala, correspondiente al número de Reynolds para el lado posterior del canal hidráulico ($500 \leq Re \leq 2000$). $Re < 500$ se considera flujo laminar; $Re > 2000$ se considera flujo turbulento.

Tabla 4: Número de Reynolds primer experimento, parte posterior.

Caudal (L/s)	Velocidad(m/s)	Reynolds (Re)
1.583564	0.13534735	4789.100587
2.220775	0.189809829	6716.188834
2.725496	0.232948376	8242.593601
3.242836	0.27716547	9807.161435
3.268072	0.279322393	9883.481522



La siguiente gráfica muestra la función generada por el flujo del agua correspondiente a la sección ubicada aguas abajo, cercana a la columna.

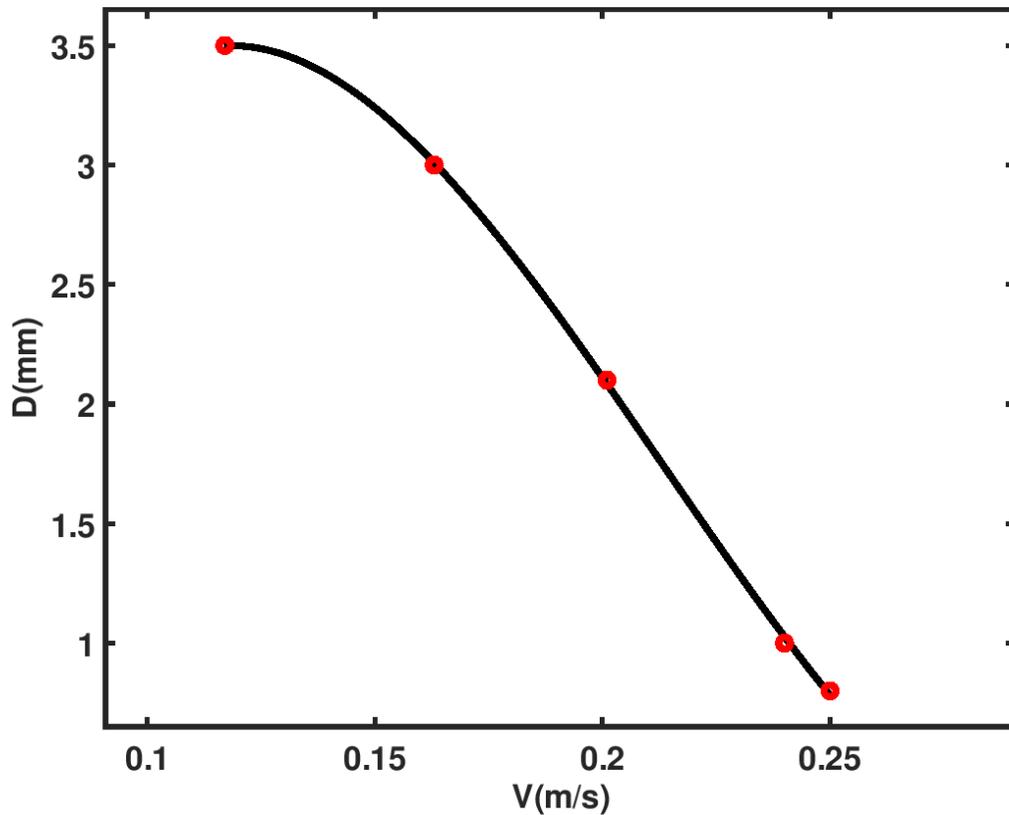


Figura 37. Los puntos de Velocidad/Distancia-vorticidad a la columna, correspondientes al experimento, se trazan en círculos rojos, unidos mediante una curva de color negro.

La función obtenida es mostrada en la siguiente Ec. (3.2) con $S = 0.0867$; $R^2 = 99.7\%$.

$$D(V) = 3.357 + 11.47 V - 86.06V^2 \quad (3.2)$$



4.1. 3 Resultados del segundo experimento

El área de estudio de las columnas para el segundo experimento se muestra a continuación en vista superior, es decir en planta (aguas abajo), que fueron habilitadas por el software y posteriormente procesados en alta velocidad para hacerlo turbulento. La Figura 37 muestra el área de estudio en planta.

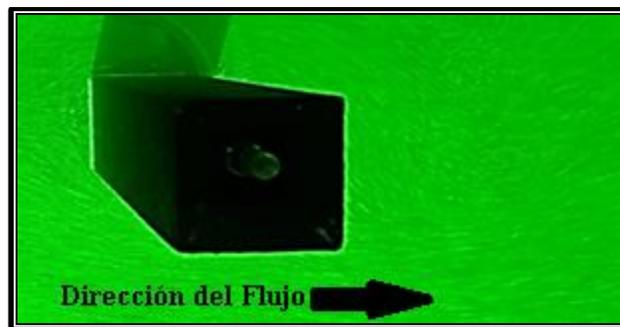


Figura 38. Área de estudio en planta del segundo experimento.

En la Tabla 5 se muestra la magnitud de la escala, correspondiente al número de Reynolds para el canal hidráulico ($500 \leq Re \leq 2000$). El tirante fue de 15 cm . $Re > 2000$ se considera flujo turbulento.

Tabla 5: Número de Reynolds segundo experimento.

Caudal (L/s)	Velocidad (m/s)	Reynolds (Re)
1.583564	0.08120841	3512.007097



En esta sub sección se muestran las imágenes correspondientes a la sección de estudio. En las Figuras 39 a la 43, se observa el comportamiento del flujo del agua que pasa a través de las columnas, vista en planta, con diferentes geometrías: cuadrada, circular, gota, gota invertida y doble cuchilla, con lo cual se establece la geometría de menor generación de turbulencia aguas abajo a la misma velocidad, siendo la columna cuadrada, la que muestra mayor flujo turbulento y de gota la de menor. Sin embargo, la columna de gota invertida presentó otra característica como la significativa disminución del flujo descendente (aguas arriba) como se muestra en la Figura 46.

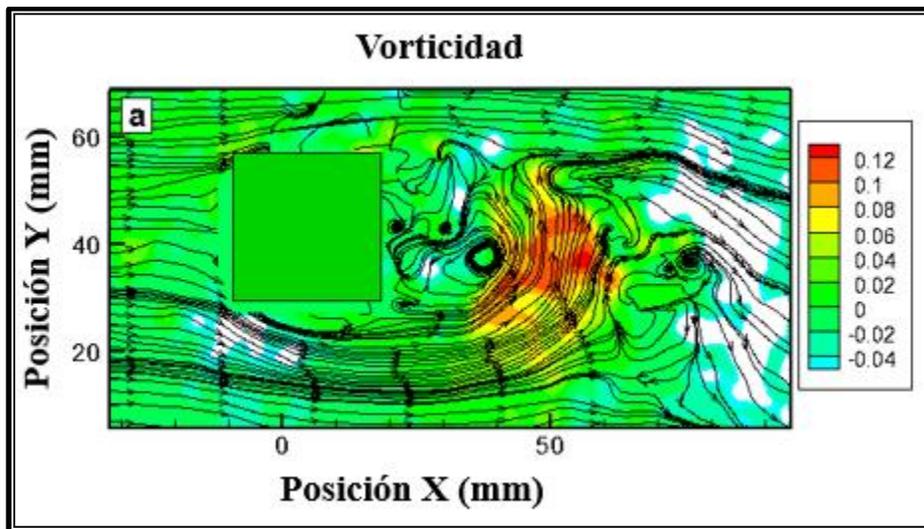


Figura 39. La columna cuadrada muestra un gran flujo turbulento generando vórtices inmediatamente después. Esto se debe a que la superficie del accidente forma un gran vórtice de onda lateral.

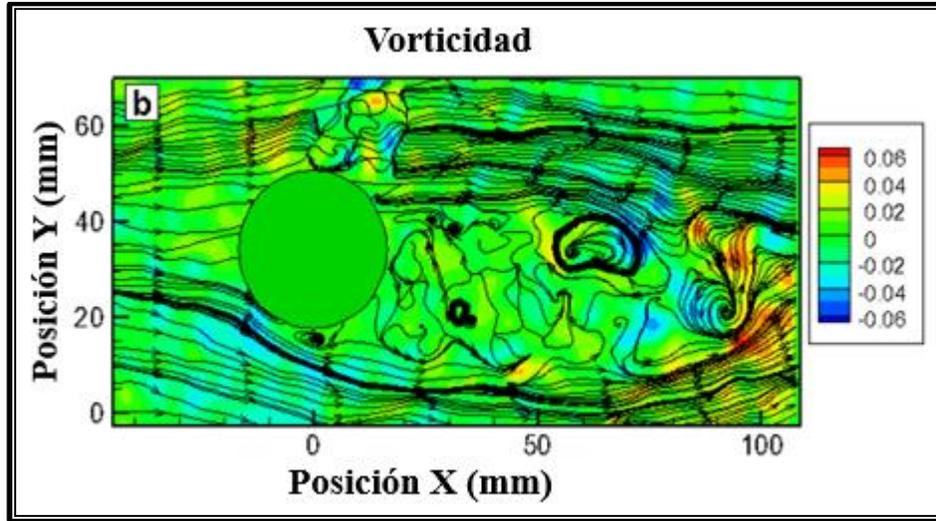


Figura 40. La columna circular muestra más resistencia para el flujo de turbulencia que el muelle cuadrado, debido a la forma geométrica. vórtices moderados se ven después de la estructura.

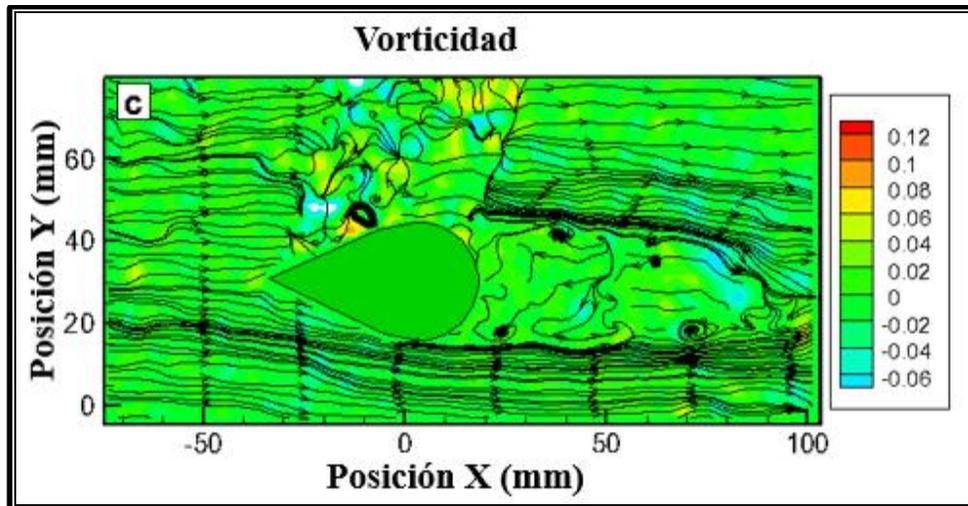


Figura 41. La columna de gota invertida muestra la mejor resistencia a la turbulencia utilizando el pico para dividir el flujo de agua. Pequeños vórtices se ven después de la estructura debido a la sección frontal afilada.

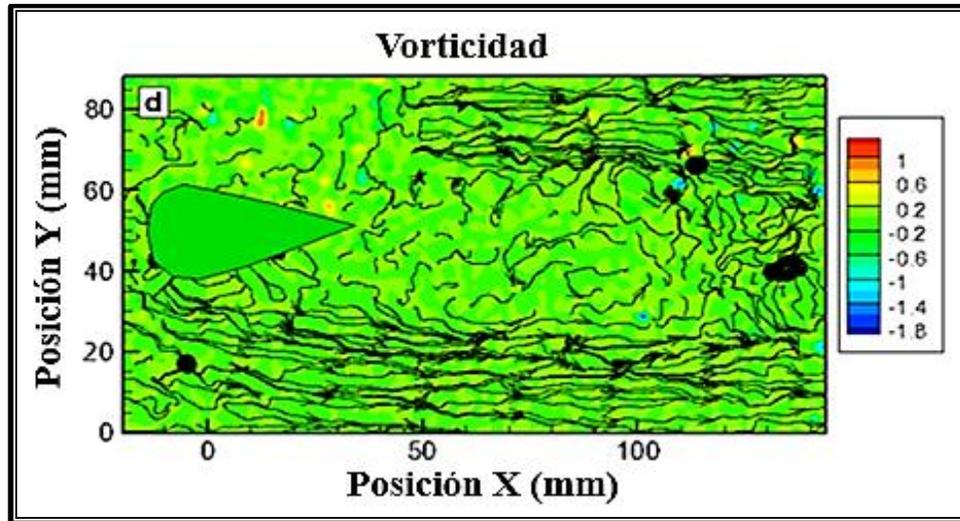


Figura 42. La columna de gota muestra aguas abajo la mejor resistencia a la turbulencia, debido a que el pico corta la vorticidad del flujo del agua. En la parte frontal se tiene igual que la columna circular, el flujo abajo que causa socavación.

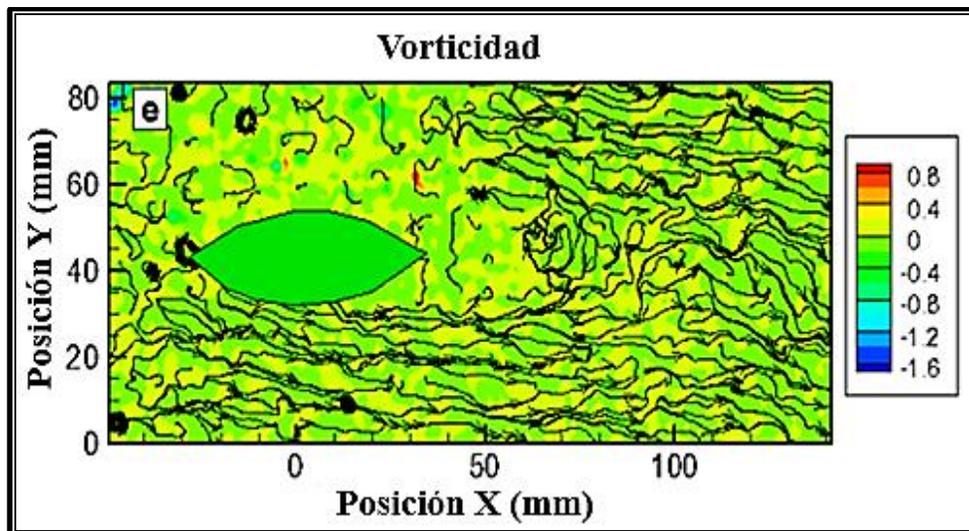


Figura 43. La columna de doble cuchilla, como se observa en la figura, no es una buena opción para romper vorticidades, debido a los cambios de dirección que el flujo del agua tiene, al pasar por su geometría.



Se genera un flujo descendente en columnas cuadradas, circulares y gota debido al modelo geométrico, siendo el cuadrado el crítico de estos debido a la superficie plana. En cambio, la columna de gota tiene una tendencia lineal de flujo frontal a la velocidad probada, debido a la sección frontal afilada del modelo. En las figuras 44, 45 y 46, los detalles se muestran en las secciones frontales de los modelos. En la Tabla 6 se muestran los resultados de las observaciones.

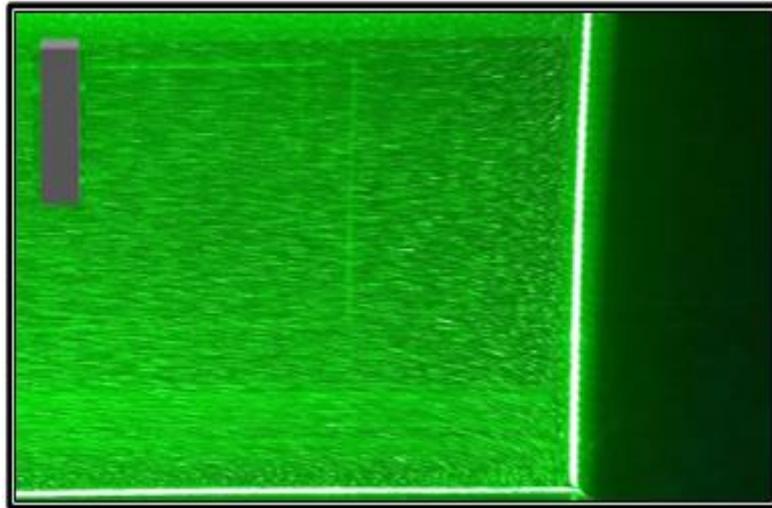


Figura 44. Flujo de la columna cuadrada.

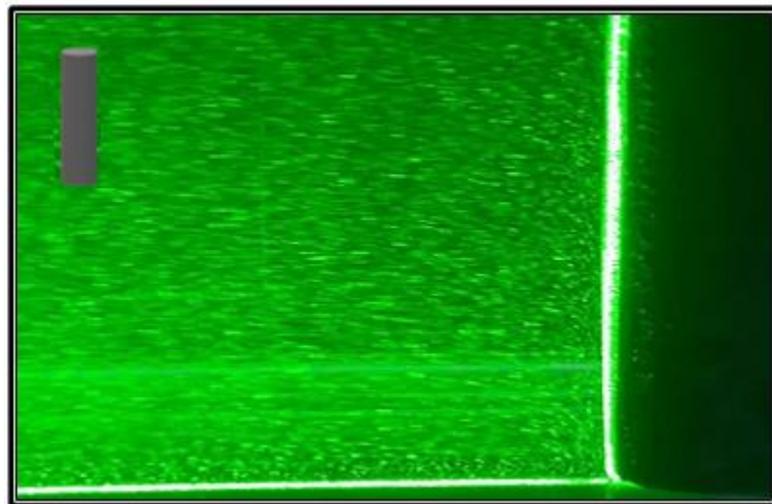


Figura 45. Flujo de la columna circular.

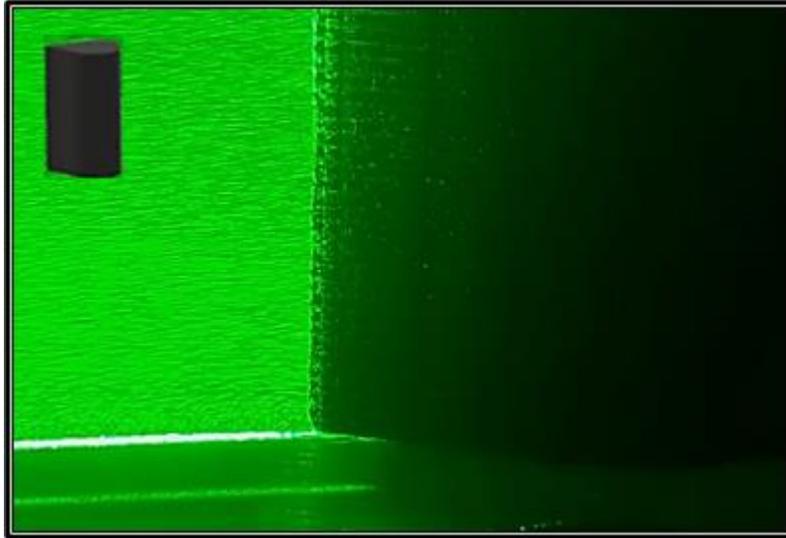


Figura 46. Flujo de la columna de gota.

Tabla 6: Resultados de las observaciones.

Modelo	Ancho (<i>W</i>)	Distancia de la Turbulencia (<i>D</i>)
Cuadrada	20mm	10mm
Circular	20mm	70mm
Gota invertida	20mm	120mm
Gota	20mm	140mm
Doble cuchilla	20mm	50mm



5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

En este trabajo se desarrolló una investigación sobre el estudio del comportamiento del flujo de agua clara obstruida por una columna situada en la región central de un canal de agua experimental. Se experimentó con cuatro formas de sección transversal de columna y se probó cada una individualmente: sección transversal cuadrada, cilíndrica, forma de gota, forma de gota invertida y una columna con una sección transversal de doble cuchilla.

A partir de la determinación de los campos de velocidad de pequeñas partículas de vidrio huecas sembradas en el agua utilizando una configuración experimental basada en la técnica PIV, se obtuvo el comportamiento de las líneas de flujo establecidas en el canal experimental. Se observó tanto el establecimiento de vórtices laterales como la generación de turbulencia aguas abajo en algunos de los perfiles de columnas probadas.

La columna de perfil cuadrada presentó el mayor nivel de efectos de vórtice y turbulencia aguas abajo. Los perfiles de columna circular y en forma de gota también presentaron la formación de vórtice y turbulencia en el flujo de agua, pero a un nivel más moderado. Además, se observó que, en los casos de los perfiles de columna cuadrada, circular y en forma de gota, aparece el efecto de flujo descendente, mientras que en los casos de "gota invertida" y columna de "doble cuchilla" no se produce en el rango de velocidades probados. El hecho de que la "forma de gota invertida" y el perfil de "doble cuchilla" no se observara el efecto de flujo descendente en el rango de parámetros probado, es un resultado significativo debido a que estas geometrías son prometedoras para tratar de evitar o cuando menos minimizar el efecto de socavación inducido en la base de la columna.



Un parámetro definido para medir el grado de vorticidad en el flujo de agua obstruido por la columna permitió caracterizar, el nivel de turbulencia en el flujo de agua corriente en su parte posterior aguas abajo en el canal en función de la distancia medida con esta posición de los vórtices a la columna. Los resultados mostraron que la columna con una sección transversal cuadrada presenta la distancia más cercana, por tanto, el comportamiento hidráulico menos favorable, mientras que la forma de gota presenta la distancia más lejana. La columna de “gota invertida” presenta las mejores condiciones en cuanto a menor turbulencia, tanto en su parte frontal como en su parte posterior.

El efecto del flujo descendente cerca de la base de la columna a altas velocidades, conduce altos niveles de turbulencia con generación de vórtices que pueden inducir altos niveles de socavación. De esta manera, podemos concluir que el uso del perfil de columna en forma de gota "invertida" puede ayudar a reducir considerablemente el fenómeno de la socavación inducido por la interacción del flujo de agua con la columna.

Se realizó el ajuste de los puntos medidos experimentalmente utilizando una función cuadrática para ambas áreas de estudio, debido a que es el ajuste más cercano a los puntos obtenidos de los parámetros de velocidad, radio para la sección de aguas arriba, y velocidad, distancia de vorticidad a la columna para la sección aguas abajo. Con una función matemática, estimando la velocidad más alta del canal de agua, se podría obtener la distancia crítica teórica del vórtice a la columna en términos de riesgo de socavación, como parte de una medida de protección.

La técnica óptica de velocimetría por imágenes de partículas (PIV) fue adecuada para desarrollar este trabajo. Fue posible observar el comportamiento del flujo de agua, entendiendo las relaciones que existen entre velocidad del flujo, vorticidad, posición del vórtice con respecto a la base de la columna y turbulencia de manera experimental pero que



se puede asociar a la movilización de sedimentos del fondo en un cauce natural o un canal de agua debido a la obstrucción como una columna.

El desarrollo de modelos numéricos sofisticados y softwares de simulación, serán una herramienta en conjunto, que dará un mejor entendimiento al fenómeno de la socavación en el futuro.

Como parte de la investigación se desarrollaron investigaciones paralelas, programación para obtener los desplazamientos de partículas utilizando imágenes de las partículas sembradas, las cuales se documentaron en los Anexos de esta investigación.

5.2 Recomendaciones

Se debe hacer más trabajo, tal como más tipos de geometrías, socavación en estribos proponiendo diversas formas, interacción de columnas y estribos, medidas de protección contra la socavación, mejoramiento del perfil de columna tipo gota para evitar el flujo descendente, realización de nomogramas respecto a espesor de columnas, velocidad del flujo, tirante del agua, en relación a la vorticidad que se puede generar y estudios de densidad de agua/partículas.



6. Bibliografía

Adrian, R. J., 1984, *Scattering particle characteristics and their effect on pulsed laser measurements of fluid flow: speckle velocimetry vs. particle image velocimetry*, *Appl. Optics* 23, pp. 1690-91.

Adrian, R. J., 1988, *Statistical properties of particle image velocimetry measurements in turbulent flow*”, *Selected Papers 3rd Int. Symp. on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics* ed T Asanuma et al (Lisbon: Ladoon), pp 115–290.

Adrian, R. J., 1991, *Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics*. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 23: 261-304.

Aguado, A., 2012, *Estimación de la socavacion en puentes para su uso en el calculo del riesgo físico*. Tesis. Universidad Autónoma de México - División de Ingeniería Civil y Geométrica.

Amini, N., B. Balouchi, and M. S. Bejestan, 2017, *Reduction of local scour at river confluences using a collar*: *International Journal of Sediment Research*.

Akoz, M. S., B. Sahin, and H. Akilli, 2010, *Flow characteristic of the horizontal cylinder placed on the plane boundary*: *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 21, p. 476-487.

Bao, T., and Z. Liu, 2017, *Vibration-based bridge scour detection: A review*: *Structural Control and Health Monitoring*, v. 24, p. n/a-n/a.

Campa, A., F. Astorga, C. Alvarez, J. G. Murillo, and G. Estrada, 2016, *Enhanced Method of Particle Image Velocimetry Applied to Measure the Scour Phenomena in Bridge Piers*. *International Journal of Civil Engineering (IJCE)* ISSN(P): 2278-9987; ISSN(E): 2278-9995 Vol. 5, Issue 1.



- Campa, A., and F. R. Astorga, (2015), *Métodos para el cálculo de la socavación local en pilas de puentes. Tecnociencia. Vol. IX, Núm. 1.*
- Cengel Y., and Cimbala J, 2006, *Fluid Mechanics: fundamentals and applications. McGraw-Hill series in mechanical engineering.*
- Chen, G., B. Schafer, Z. Lin, Y. Huang, O. Suaznabar, and J. Shen, 2013, *Real-time monitoring of bridge scour with magnetic field strength measurement. In Transportation Research Board 92nd Annual Meeting (No. 13-4235).*
- Elsaid, A., and R. Seracino, 2014, *Rapid assessment of foundation scour using the dynamic features of bridge superstructure: Construction and Building Materials, v. 50, p. 42-49.*
- Etemad-Shahidi, A., and M. S. Rohani, 2014, *Prediction of scour at abutments using piecewise regression: Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management, v. 167, p. 79-87.*
- Ettema, R, T. Nakato, and M. Muste, 2003, *Prediction of Scour at Abutments. Interim Report on Project 24-20. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, D.C.*
- Ettema, R., B. Yoon, T. Nakato, and M. Muste, 2004, *A review of scour conditions and scour estimation difficulties for bridge abutments. KSCE Journal of Civil Engineering, volume 8, issue 6, pp 643-650.*
- Ettema, R, T. Nakato, A. Yorozuya, and M. Muste, 2008, *Three abutment scour conditions investigated with laboratory flumes. Fourth International Conference on Scour and Erosion.*
- Fisher, M., S. Atamturktur, and A. A. Khan, 2013, *A novel vibration-based monitoring technique for bridge pier and abutment scour: Structural Health Monitoring, v. 12, p. 114-125.*
- González, S. G., 2005, *Velocimetría por Imágenes de Partículas (VIP) Dpto. de Matemáticas de la ESFM del IPN.*



Hager, W. H., and G. Oliveto, 2002, *Temporal Evolution of Clear-Water Pier and Abutment Scour: Journal of Hydraulic Engineering*, v. 128, p. 811-820.

Hill, D. F., and B. D. Younkin, 2006, *PIV measurements of flow in and around scour holes: Experiments in Fluids*, v. 41, p. 295-307.

Jimenez, R. I., 2012, *Construcción de diques. Equipo de colaboradores y profesionales de la revista ARQHYS.com.* .

Keshavarzi, A., and J. Ball, 2017, *Enhancing PIV image and fractal descriptor for velocity and shear stresses propagation around a circular pier: Geoscience Frontiers*, v. 8, p. 869-883.

Lagasse, P. F., L. W. Zevenbergen, W. J. Spitz, and L. A. Arneson, 2012, *Stream stability at highway structures (No. FHWA-HIF-12-004).*

Laursen, E. M., 1960, *Scour at bridge crossings. J. Hydr. Div.*, 86(HY2), 39-54.

Li, H., B. D. Barkdoll, R. Kuhnle, and C. Alonso, 2006, *Parallel Walls as an Abutment Scour Countermeasure: Journal of Hydraulic Engineering*, v. 132, p. 510-520.

López, H. M., 2006, *Un Nuevo algoritmo en la técnica de velocimetría por imágenes de partículas. Máster in Science Disertación, Instituto Politécnico Nacional. Centro de investigación en computación.*

Martínez, J., and F. J. González, 2014, *Velocímetro de particulas basado en imagenes digitales. Instituto de Investigación en Comunicación Óptica, San Luis Potosi, Mexico.*

Masjedi, A., M. S. Bejestan, and A. Esfandi, 2010, *Reduction of local scour at a bridge pier using collar in a 180 degree flume bend. J. Applied Sci.*, 10: 124-131.



Melville, B. W., 1975, *Local scour at bridges sites. Thesis (PhD--Civil Engineering)-University of Auckland, School of Engineering.*

Miranda, J., 2019, *Más de veinte puntos de filtraciones por agua. Paso exprés Cuernavaca – Morelos. El UNIVERSAL.*

Mohammadpour, R., A. A. Ghani, M. Vakili & T. Sabzevari, 2016, *Prediction of temporal scour hazard at bridge abutment. Natural Hazards, 80, 1891-1911.*

Moncada, M., T. Alix, P. Aguirre, P. Bolivar, C. Juan, N. Flores, and J. Edgar, 2007, *Estudio experimental sobre protección contra la socavación en pilas circulares: Revista Técnica, v. 30, p. 157.*

Morillo J., L. 2013, *Numero de Reynolds: flujo laminar y flujo turbulento. Instituto Universitario Politécnico, Valencia, España.*

Oben-Nyarko, K., and R. Ettema, 2011, *Pier and Abutment Scour Interaction: Journal of Hydraulic Engineering, v. 137, p. 1598-1605.*

Radice, A., and V. Davari, 2014, *Roughening Elements as Abutment Scour Countermeasures: Journal of Hydraulic Engineering, v. 140, p. 6014014.*

Raffel, M., J. Westerweel, C. Willert, M. Gharib, and J. Kompenhans, 1996, *Analytical and experimental investigations of dual - plane particle image velocimetry, Opt. Eng. 35, 2067-2074.*

Raudkivi, A. J., 1986, *Journal of Hydraulic Engineering, A.S.C.E. Functional trends of scour at bridge piers, Vol.112(1), pp.1-13.*

Santiago, M. E., 2007, *Hidráulica de ríos. Socavación en ríos, puentes y carreteras. Instituto Politecnico Nacional. Escuela de Ingeniería y Arquitectura.*



Sturm, T. W., T. Stoesser, S. Hong, S. Kara, Wang, and Y. C, 2016, Estimating Foundation Scour for Extreme Hydrologic Events at Scour-Critical Bridges. Report No.: FHWA-GARPXX.

Sturm, T. W., S. H. Hong & T. Stoesser (2015) Clear Water Abutment Scour in a Compound Channel for Extreme Hydrologic Events. Journal of Hydraulic Engineering, 141, 4015005.

Sturm, T. W. 2006. Scour around bankline and setback abutments in compound channels.” J. Hydraul. Eng., 132(1), 21-32.

Westerweel, J., 1993, Digital Particle Image Velocimetry Theory and Application” (Delft: Delft University Press), Optical diagnostics in fluid and thermal flow SPIE 2005 624–35.

Willert, C. E., and M. Gharib, 1991, Digital particle image velocimetry.” Exp. Fluids 10, pp181-193.

Wu, P., F. Hirshfield, and J.-y. Sui, 2015, Local scour around bridge abutments under ice covered condition – an experimental study: International Journal of Sediment Research, v. 30, p. 39-47.

Yang, H. C., and C. C. Su, 2015, Real-time river bed scour monitoring and synchronous maximum depth data collected during Typhoon Soulik in 2013: Hydrological Processes, v. 29, p. 1056-1068.

Younkin, B. D., 2008, Prediction of scour formation due to a turbulent wall jet along a non-cohesive sediment bed, ProQuest Dissertations Publishing.

Software for Intelligent Imaging – LaVision Davis 8, 2010, <https://www.lavision.de/en/download.php>, comprehensive software solution for multi-dimensional imaging for fluid dynamics.



Tecplot 360 CFD post processing tools to analyze data, 2014, <https://www.tecplot.com/products/tecplot-360>, Tecplot 360. A suite of CFD visualization and analysis tools that can handle large data. ... With over 35 years of experience.

ANEXOS

Anexo 1. Efecto del diámetro de una columna en el flujo de agua que pasa sobre ella

Un video del flujo de agua en un canal hidráulico de 0.50 m de largo, 0.15 m de profundidad y 0.15 m de ancho con una bomba eléctrica de 1.5HP, fue capturado en el laboratorio usando una cámara CCD previamente calibrada, para caracterizar el movimiento cuando es obstruido por un modelo de columna circular de tres espesores.

Las partículas que esparcen la luz de 9-13 μm dentro del agua se usaron para la iluminación mediante un láser verde de 532 nanómetros. Para este experimento se aplicó un nivel de flujo de agua de 0.09 m, con una velocidad de 0.0084 m/s, equivalente a un caudal de 0.107253 l/s, para el área aguas arriba, observando el flujo descendente, con un número de Reynolds (Re) = 343.016, luego se decidió aumentar la velocidad para la apreciación de la turbulencia hasta 0.117 m/s, equivalente a un caudal de 1.577 l/s, con un número de Reynolds (Re) = 4784.272 y 0.163 m/s, equivalente a un caudal de 2.22 l/s, con un número de Reynolds (Re) = 4573 para el área aguas abajo, creando un nomograma de distancia de vorticidad. ($500 \leq Re \leq 2000$) $Re = \rho v R / \mu$, donde: ρ = densidad del agua; v = velocidad del agua; R = radio hidráulico y μ = viscosidad dinámica del agua.

En las Figuras 1, 2 y 3 aguas arriba, se muestra el flujo descendente y las diferentes posiciones del vórtice para un diámetro de columna de 10, 20 y 30 cm. En las Figuras 4, 5 y 6 aguas abajo, correspondiente a la velocidad de 0.117 m/s se muestra el aumento de la vorticidad debido a los diferentes diámetros de columna utilizados, y de igual manera para las Figuras 7, 8 y 9 a una velocidad de 0.163 m/s.



En la Figura 10 se muestra nomograma correspondiente a la distancia horizontal de vorticidad a la columna, obtenido de las Figuras aguas abajo, utilizando la posición horizontal de vorticidad más cercana a la columna referente a las dos velocidades, y los diferentes diámetros de columna.

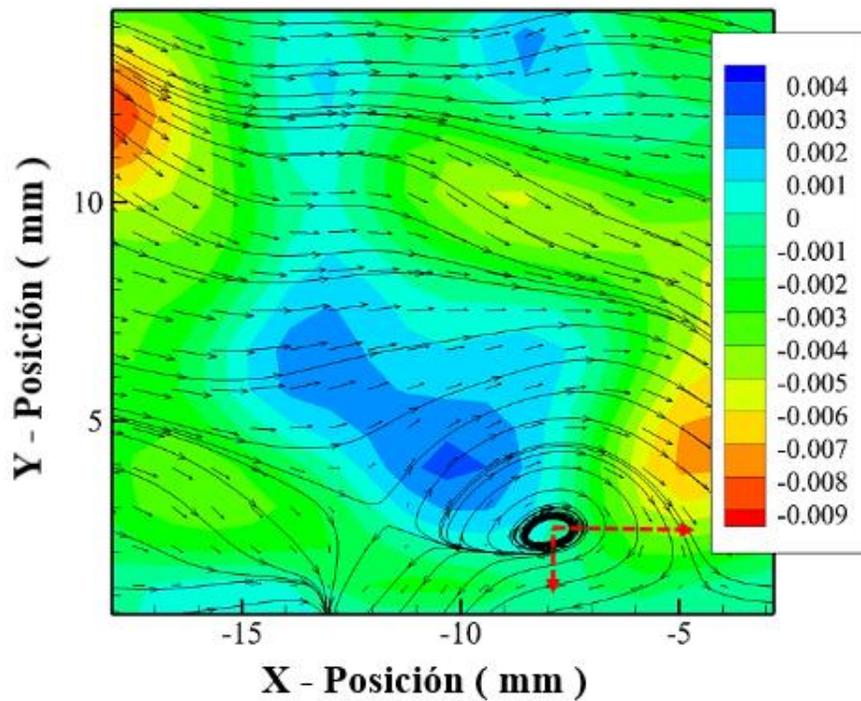


Figura 1: Columna 1 cm de diámetro.

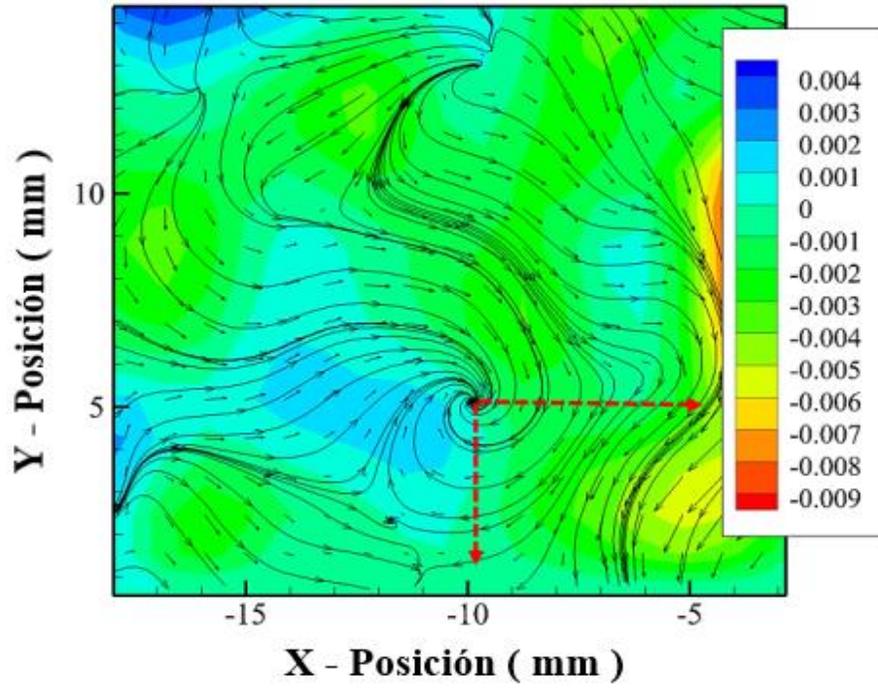


Figura 2: Columna 2 cm de diámetro.

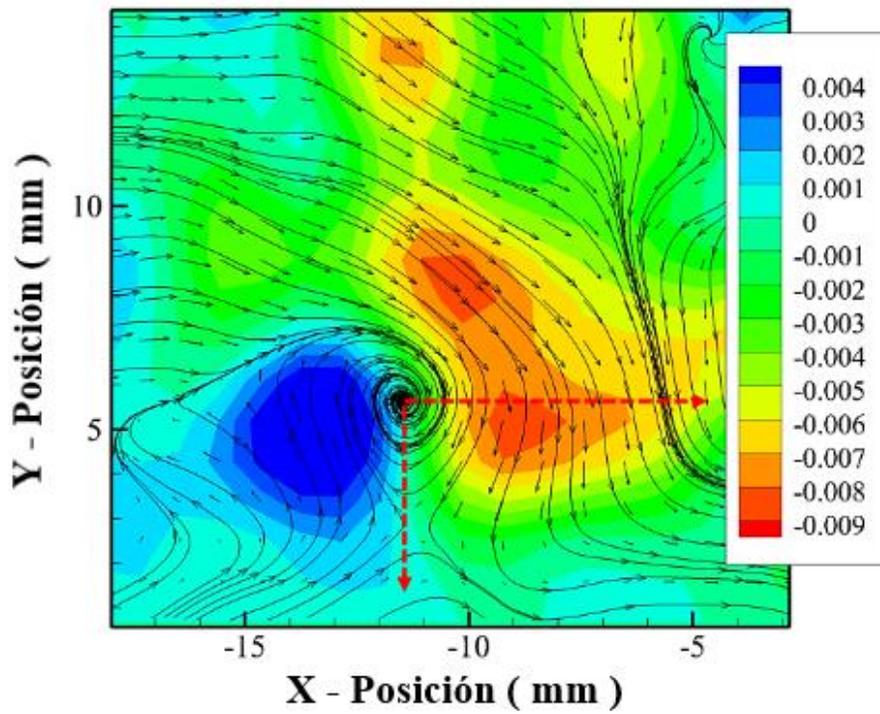


Figura 3: Columna 3 cm de diámetro.

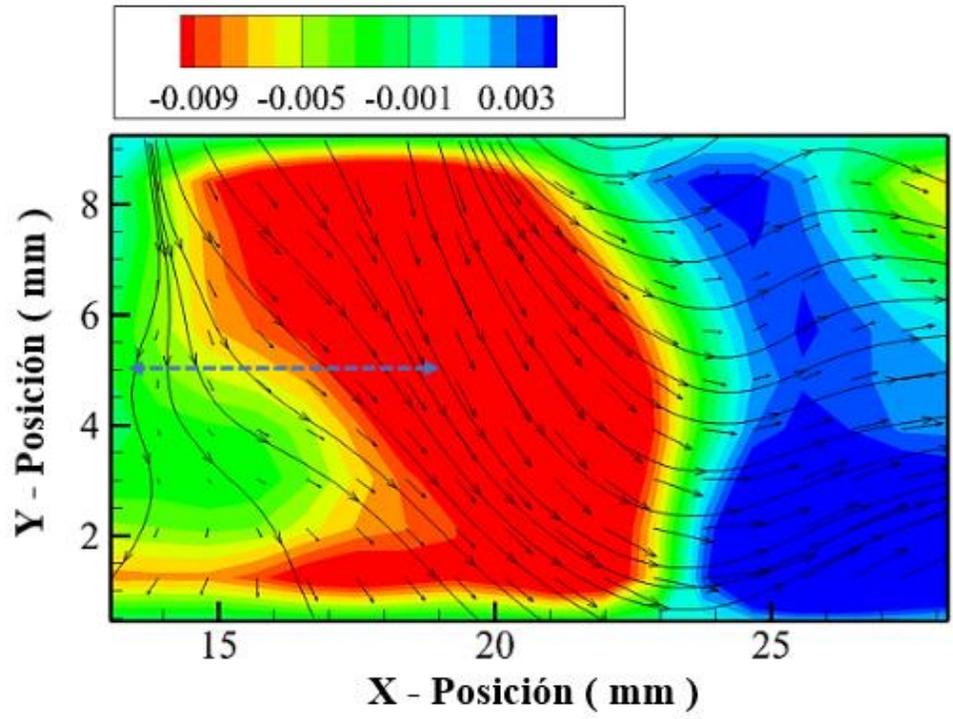


Figura 4: Columna 1 cm de diámetro.

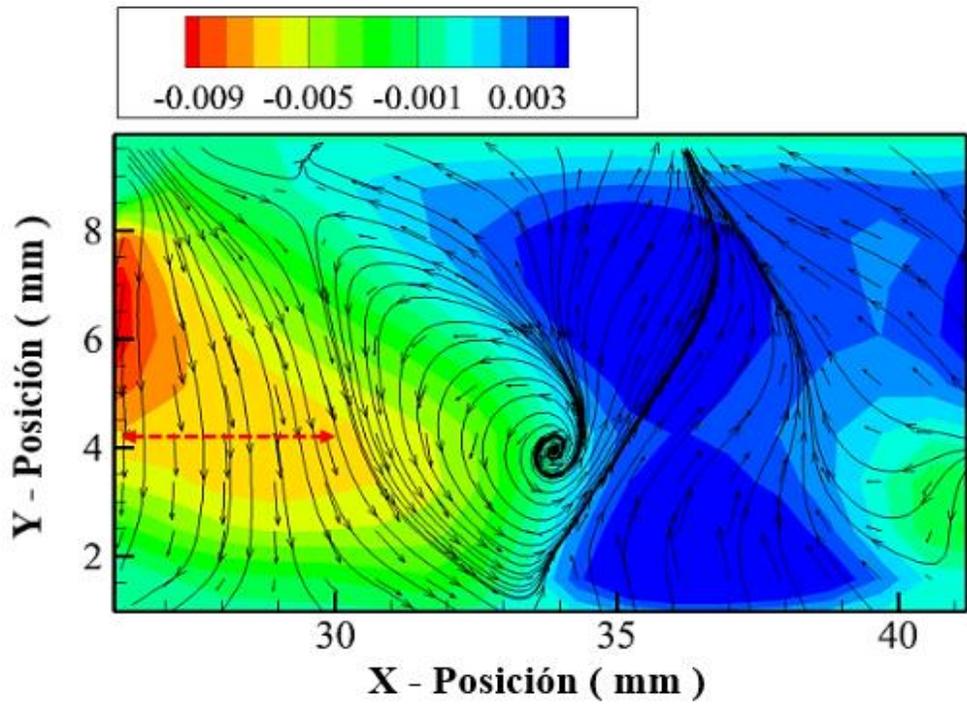


Figura 5: Columna 2 cm de diámetro.

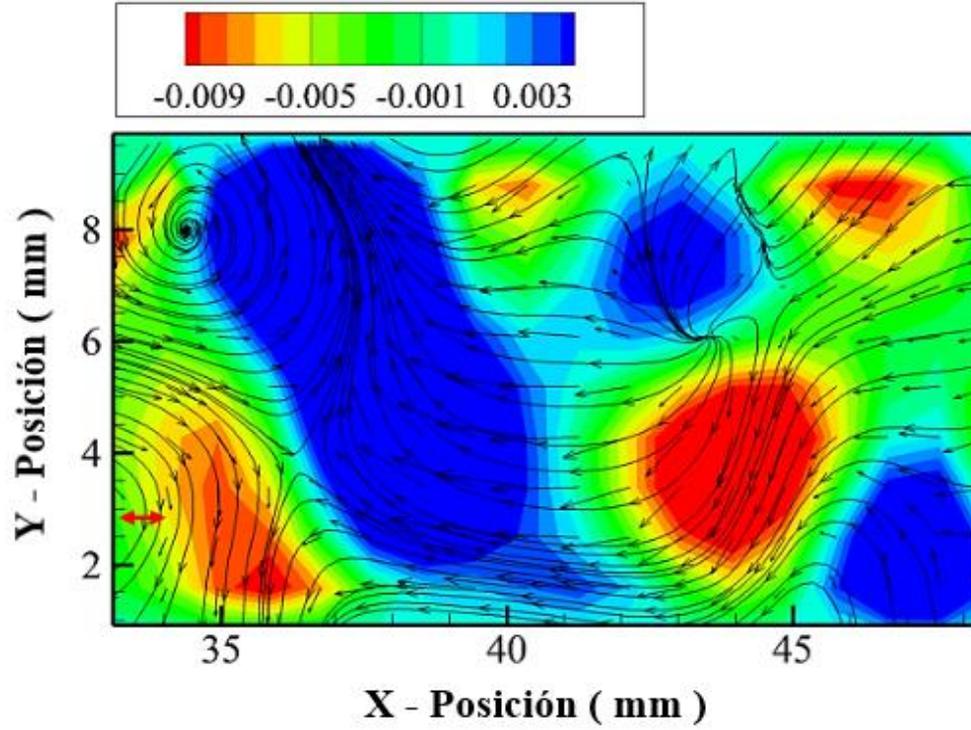


Figura 6: Columna 3 cm de diámetro.

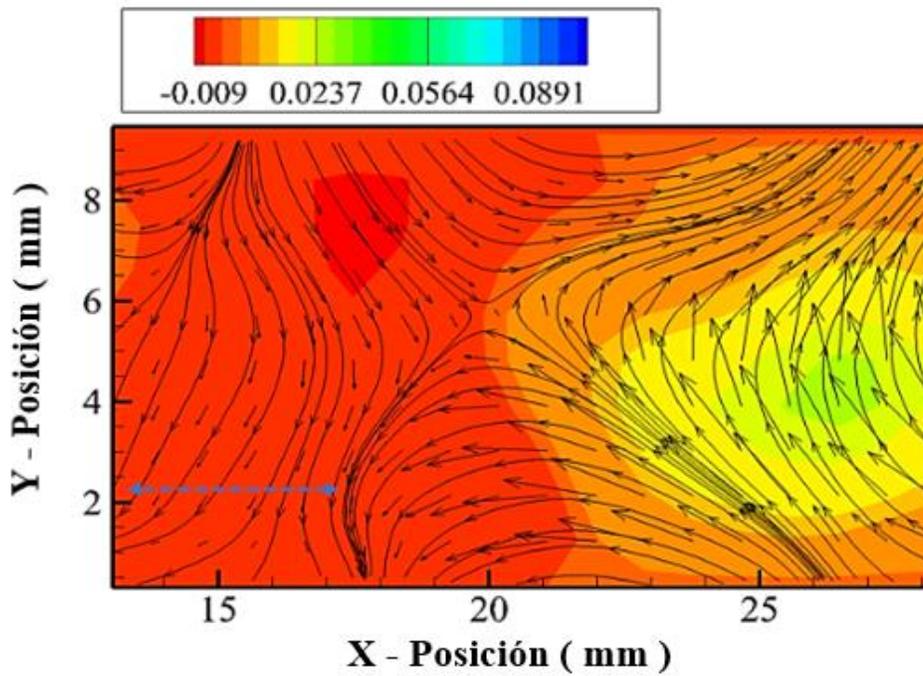


Figura 7: Columna 1 cm de diámetro.

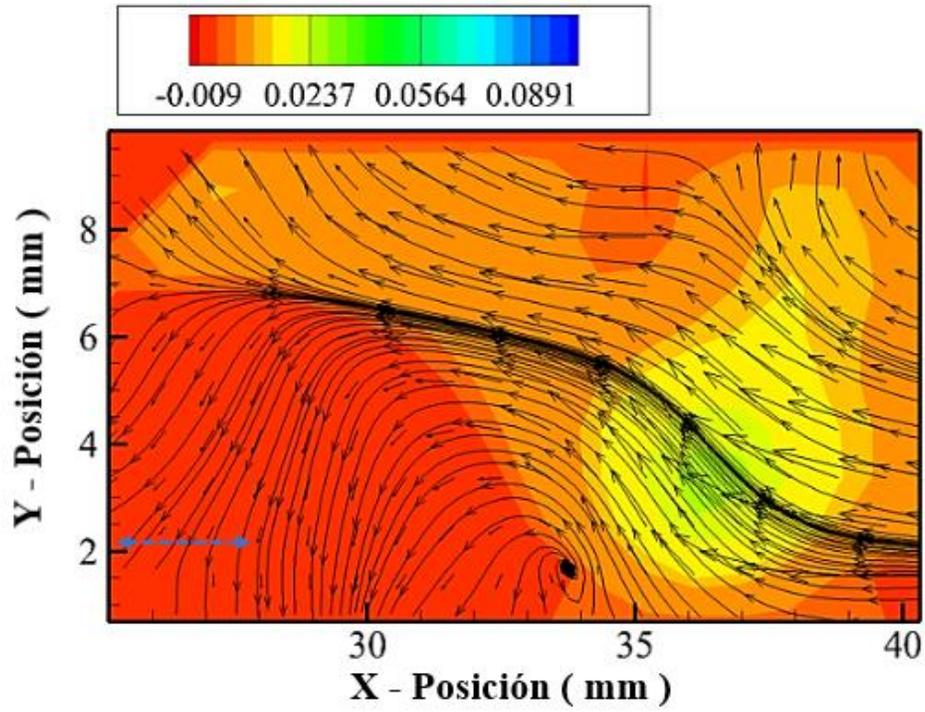


Figura 8: Columna 2 cm de diámetro.

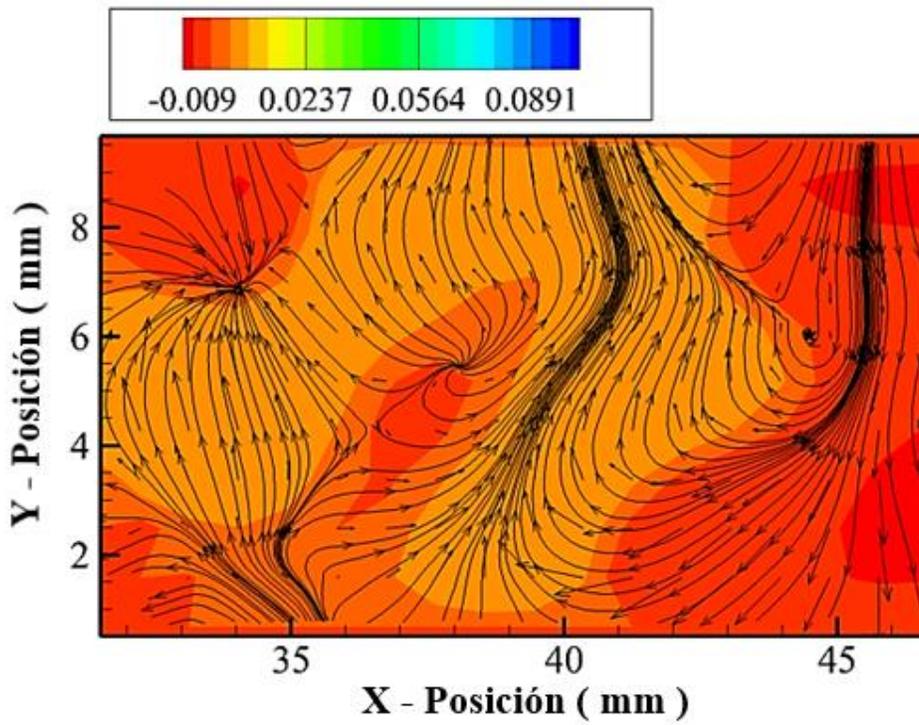


Figura 9: Columna 3 cm de diámetro.

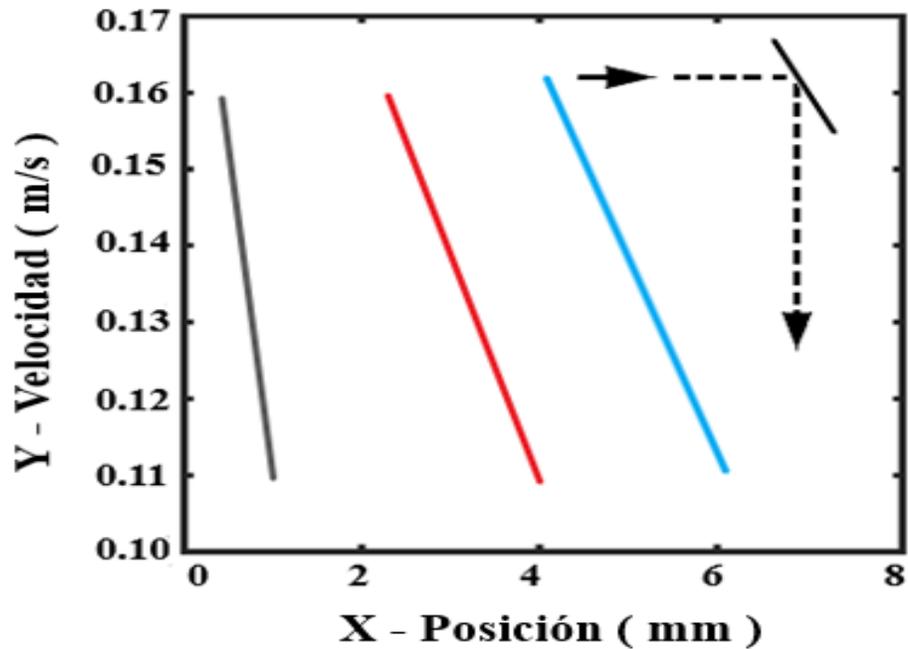


Figura 10. Nomograma, distancia/vorticidad a la columna.

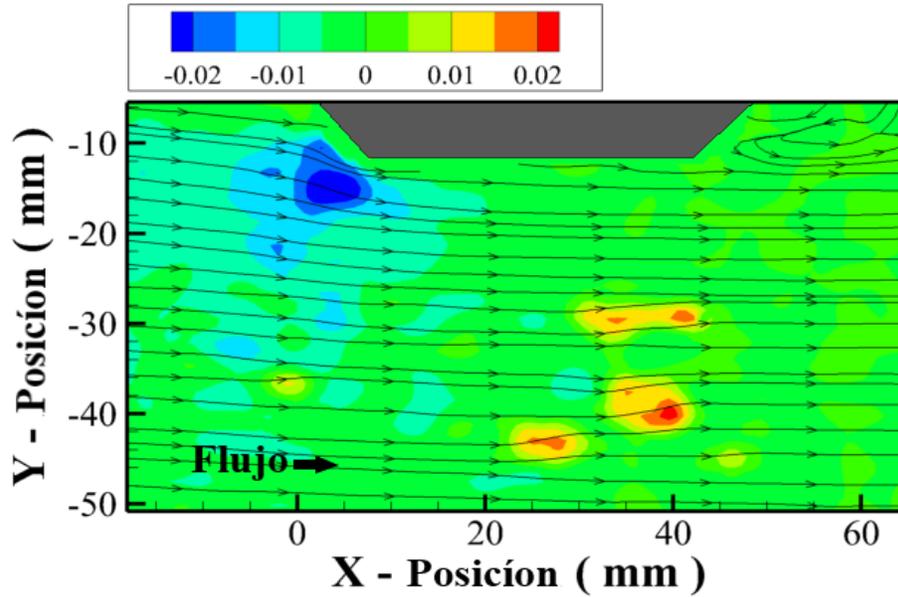
Conclusiones

Los videos por medio de la utilización del software LaVision DaVis8 y el post-procesamiento con el software Tecplot 360, fue posible obtener imágenes de las áreas de estudio en dos dimensiones (perfiles de flujo), En el área de estudio ubicada aguas arriba, el flujo a través de la columna más esbelta, mostro un comportamiento de tendencia lineal generando vorticidad moderada, en cuanto a las dos columnas restantes, el flujo tendió a golpear el fondo incrementándose su vorticidad. En el área de estudio aguas abajo, el flujo se tornó cada vez más abrupto conforme aumento el diámetro de la columna, observado por la cantidad de vórtices y vectores. Es evidente que la relación es directamente proporcional, a mayor diámetro mayor turbulencia, y por tanto una mayor socavación.

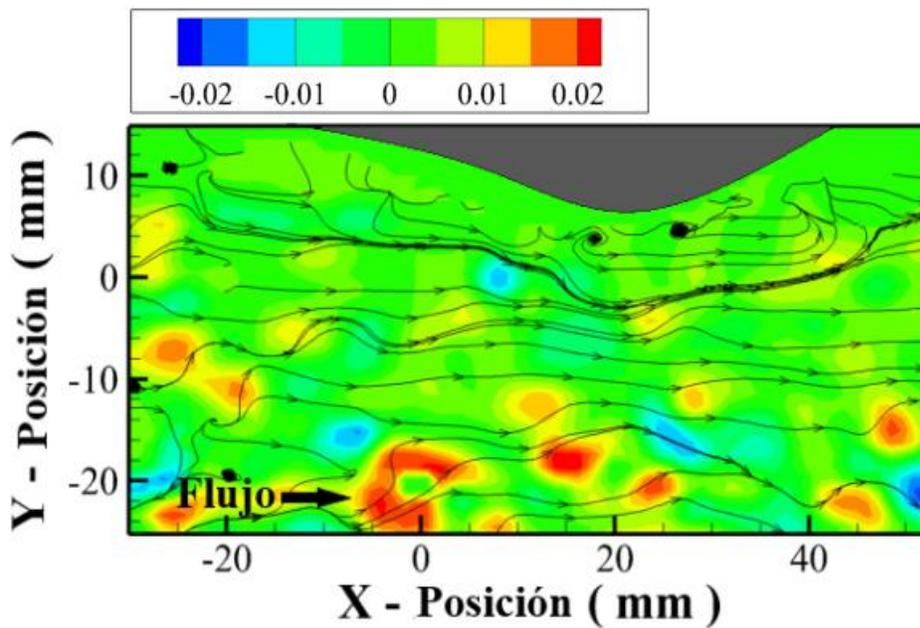


Anexo 2. Comportamiento del flujo del agua en estribos de un puente

Estribo de pared de ala.



Modificación de estribo.





Conclusiones

La técnica óptica PIV fue útil para avanzar en este trabajo en una situación controlada por laboratorio. Mediante el software de procesamiento de video LaVision DaVis8 y el software de procesamiento posterior Tecplot 360, fue posible lograr imágenes desde la vista superior del estudio y observar el desplazamiento del flujo de agua, observando la forma en que esto podría elevar teóricamente el suelo y socavar el fondo en un equipo de canal abierto a escala o un río, debido a una obstrucción como un estribo de pared de ala. Por lo tanto, desde el área de turbulencia crítica, también se fue capaz de proponer una modificación de la geometría del modelo, logrando reducirla con éxito. Comprender el comportamiento del flujo turbulento, que causa la socavación, nos permitirá estimar la dinámica en las fuerzas de arrastre de los sedimentos ante una obstrucción, lo que nos permitirá generar estructuras que contrarresten el flujo turbulento.



Anexo 3. Ejemplo de correlación cruzada PIV usando Matlab

Programa 1

```
close all

clear all

clc

a = imread('imagen1.png');
b = imread('imagen2.png');

Ia = rgb2gray(a);
Ib = rgb2gray(b);

Ia =Ia(1:334,:);

I = Ia + Ib;

imagesc(I), axis equal, colormap gray

%break

imagesc(Ia(170:220,:)), axis equal, colormap gray

imagesc(Ia(140:330,:)), axis equal, colormap gray

imagesc(Ia(170:220,240:300)), axis equal, colormap gray

imagesc(Ia(170:202,240:272)), axis equal, colormap gray

a1 = Ia(170:202,240:272);

b1 = Ib(170:202,240:272);

c = Ia+Ib;
```



```
imagesc(c), axis equal, colormap gray

c = a1+b1;

imagesc(c), axis equal, colormap gray

sd = abs(fft2(c)).^2;

R = fftshift(iff2(sd));

figure,imagesc(R), axis equal, colormap gray

f = zeros(32);

f(2:6,2:6) =1;

f(10:14,5:9) =1;

f(20:24,15:19) =1;

imagesc(f), axis equal, colormap gray

sd = abs(fft2(f)).^2;

R = fftshift(iff2(sd));

figure,imagesc(R), axis equal, colormap gray

f(12:16,2:6) =1;

f(20:24,5:9) =1;

f(30:34,15:19) =1;

imagesc(f), axis equal, colormap gray

sd = abs(fft2(f)).^2;

R = fftshift(iff2(sd));

figure,imagesc(R), axis equal, %colormap gray

colormap jet

surf(R), shading interp,
```

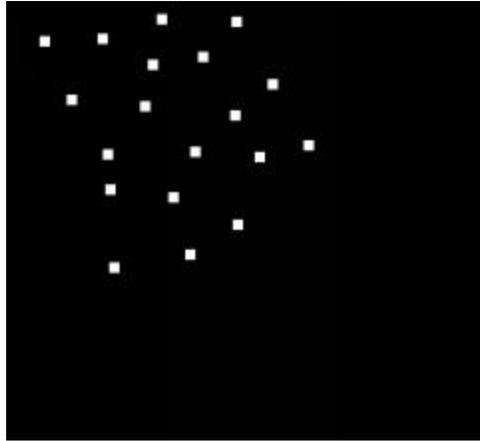


Imagen 1png.

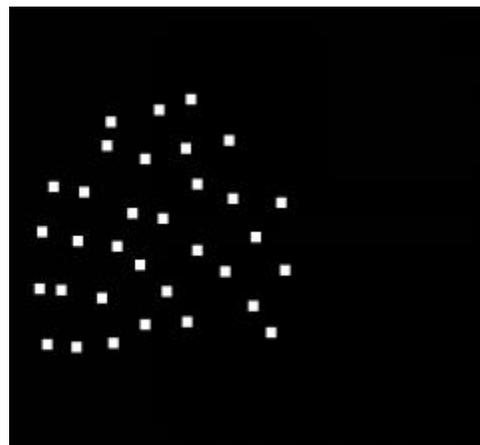
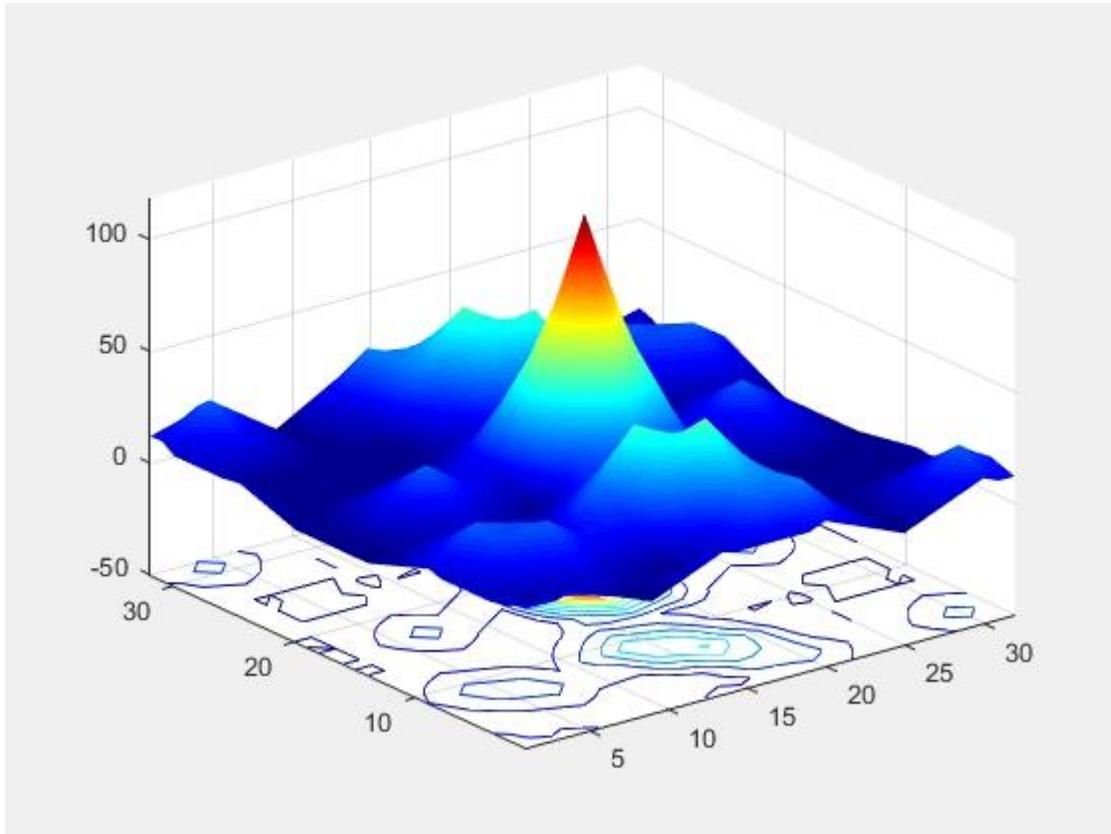


Imagen 2 png.



Correlación cruzada de la imagen 1png y la imagen 2 png.



Programa 2

```
clear all;

clc;

close all:

%Taking in the images and playing with them. Putting the origing on the
%bottom left corner.

imagea = imread('image1.tiff');
imageb = imread('image2.tiff');

[xmax,ymax]= size(imagea);

%Windows sizes.

wsize =[64,64];

w_width = wsize(1);
w_height = wsize(2);

%Center points grid.
```



```
xmin = w_width/2;

ymin = w_height/2;

xgrid = 200:w_width/2:864;

ygrid = 200:w_height/2: 1696;

%Number of windows in total.

w_xcount = length(xgrid);

w_ycount = length(ygrid);

%The correspond to the ranges for "search" windows in image b.

x_disp_max = w_width/2;

y_disp_max = w_height/2;

% For every window, first we have to "create" the test matrix. In image
a,

% then in image b, we have to correlate this test window around it's

% original position in image a, the range is pre-determined. The point of

% max. correlation corresponds to the final avg. displacement of that

% window.

test_ima(w_width,w_height) =0;

test_imb(w_width + 2*x_disp_max, w_height+2*y_disp_max) =0;
```



```
dpx(w_xcount,w_ycount) =0;
```

```
dpy(w_xcount,w_ycount) =0;
```

```
xpeak1=0;
```

```
ypeak1=0;
```

```
%i,j are for the wondows test i and test j are for the test windows to be  
%extracted from image a.
```

```
for i=1:(w_xcount)
```

```
    for j=1:(w_ycount)
```

```
        max_correlation=0;
```

```
        test_xmin=xgrid(i)-w_width/2;
```

```
        test_xmax=xgrid(i)+w_width/2;
```

```
        test_ymin=ygrid(j)-w_height/2;
```

```
        test_ymax=ygrid(j)+w_height/2;
```

```
        xdisp=0;
```

```
        ydisp=0;
```

```
        test_ima=imagea(test_xmin:test_xmax,test_ymin:test_ymax);
```

```
        test_imb=imageb((test_xmin-xdisp_max):(test_xmax+x_disp_max),...
```

```
            (test_ymin-y_disp_max):(test_ymax+y_disp_max));
```



```
correlation= normxcorr2(test_ima,test_imb);

[xpeak,ypeak]=find(correlation==max(correlation(:)));

%Re - scaling.

xpeak1=test_xmin+xpeak-wsize(1)/2-x_disp_max;
ypeak1=test_ymin+ypeak-wsize(2)/2-y_disp_max;

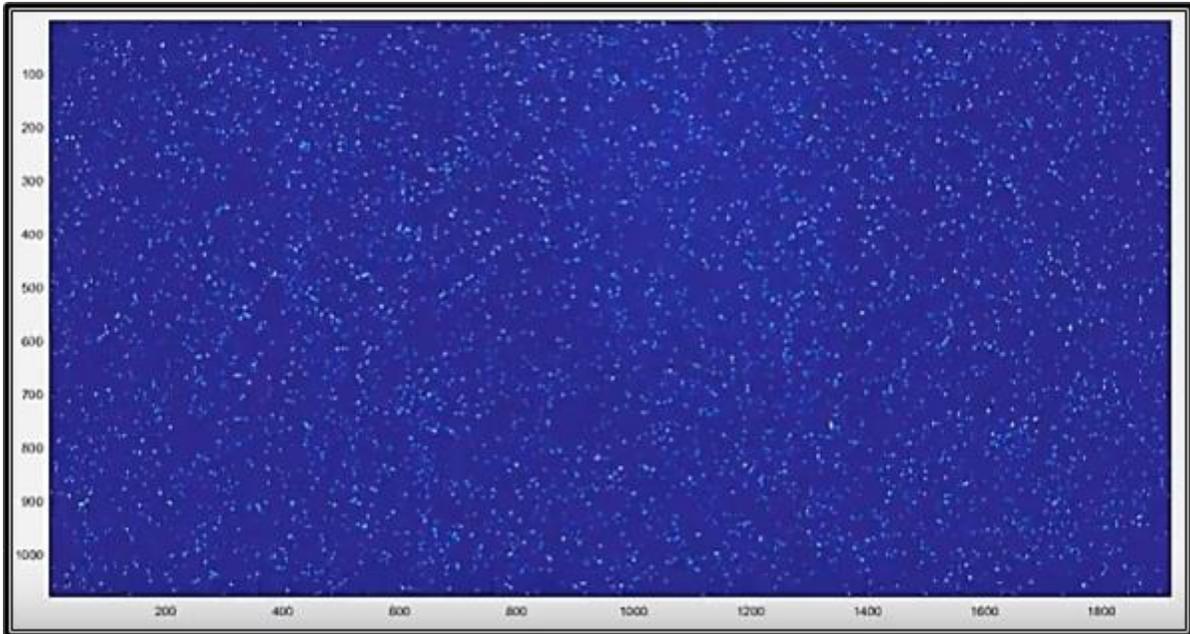
dpx(i,j)=xpeak1-xgrid(i);
dpy(i,j)=ypeak1-ygrid(j);

end

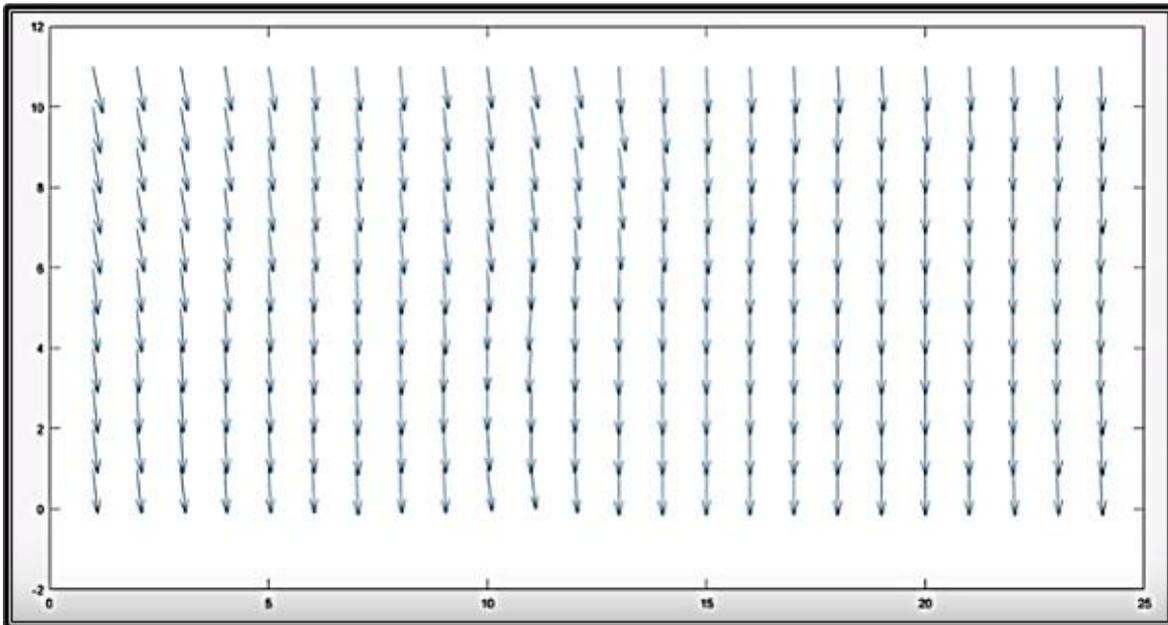
end

%Vector display.

quiver(dpy,-dpy)
```



Flujo de partículas de la prueba.



Resultado final del ejemplo de la correlación cruzada usando Matlab, correspondiente al flujo de partículas de la prueba mostrada.



Currículum Vitae

APTITUDES

Disciplina, trabajo y perseverancia.

EXPERIENCIA

Grupo Cubiertas Industriales de México (CUBIMSA)

Puesto: Residente de Obras

Lugar: Chihuahua Chih.

Tiempo: Del 2007 al 2014.

Impermeabilización y laminados industriales en proyectos llevados a cabo en diversas partes del país en donde me desempeñe como supervisor, manejo de personal, estimaciones y atención al cliente.

Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH)

Puesto: Catedrático

Lugar: Chihuahua Chih.

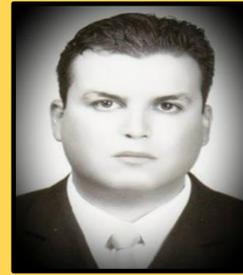
Tiempo: Del 2012 a la fecha

Maestro catedrático en la impartición de materias relacionadas a las vías terrestres en la ingeniería civil, tanto en licenciatura como en posgrado.

EDUCACIÓN

Ingeniero civil. Maestría en vías terrestres.

FOTO



DIRECCIÓN

Investigación.

Elaboración de tesis.

Trabajo de laboratorio.

Publicación de artículos.