



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – OBRAS HIDRÁULICAS

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL FLUJO AGUA-AIRE EN TÚNELES DE PRESAS
MEDIANTE EL USO DE TÉCNICAS INTRUSIVAS Y NO INTRUSIVAS

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
MARCOS EUGENIO ROJAS FLORES

TUTOR PRINCIPAL:
DR. ÓSCAR POZOS ESTRADA, INSTITUTO DE INGENIERÍA

CIUDAD DE MÉXICO, JUNIO 2017

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Oscar Arturo Fuentes Mariles
Secretario: Dr. Ramón Domínguez Mora
1er. Vocal: Dr. Oscar Pozos Estrada
2do. Vocal: M.I. Víctor Franco
3er. Vocal: Dr. Rafael Bernardo Carmona Paredes

Lugar donde se realizó la tesis: Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad de México.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Óscar Pozos Estrada

FIRMA

AGRADECIMIENTO

¡A Dios por darme la vida, a mis padres y hermanos por su apoyo incondicional, porque tuvieron fe en mí incluso más que yo mismo, a la UNAM por brindarme esta brillante oportunidad, a todos los profesores que fueron parte de mi formación en esta etapa de mi vida, especialmente a mi tutor, Oscar Pozos Estrada, a César Luna por su apoyo desinteresado y a mis compañeros de tesis, de corazón... gracias!

DEDICATORIA

*¡A mis padres y a mis hermanos que son todo lo que
un hijo y un hermano podrían desear!*

RESUMEN

La mayoría de las presas cuentan con desfogues de fondo, que consisten en túneles o conductos cerrados que atraviesan el cuerpo de la presa y que tienen válvulas o compuertas reguladoras de flujo. Estas compuertas se usan para regular el nivel de agua en la presa para condiciones normales o durante una situación de emergencia de operación.

Cuando las compuertas entran en funcionamiento, sobre todo cuando están parcialmente abiertas, presiones negativas pueden presentarse inmediatamente aguas abajo de las mismas dando lugar a posibles daños ya sea por cavitación o por vibración. Para evitar que las presiones estén por debajo de la presión atmosférica, generalmente se instalan venteos aguas abajo de las compuertas para permitir el ingreso de aire al conducto.

Las compuertas al funcionar parcialmente abiertas generan un salto hidráulico que se caracteriza por ser un flujo altamente turbulento y por presentar una estructura de flujo bifásico (agua-aire) en su desarrollo.

Precisamente el aire introducido tanto por el venteo como por el salto hidráulico es de interés en la presente tesis, que pretende evaluar el flujo agua-aire a través de la determinación de los perfiles de concentración de aire que se pueden obtener: utilizando una sonda de conductividad de doble punta (método intrusivo) y mediante la aplicación de una técnica de visualización que se vale de una cámara de alta velocidad (método no intrusivo).

El método no intrusivo es una nueva técnica que se basa en la suposición de que los perfiles de concentración de aire pueden ser estimados a partir de la intensidad de pixel registrado en cada fotografía y, además, ofrece la posibilidad de obtener tales perfiles en cualquier parte del salto o en cualquier parte dentro del campo visual de la fotografía. Esta técnica pretende ser un complemento para las mediciones tomadas con una sonda y tiene la ventaja de que no perturba el flujo durante los ensayos.

ABSTRACT

Most dams contain bottom outlets that consist of tunnels or closed conduits that pass through the body of the dam, these elements have flow regulating valves or gates. These gates are used to flush the reservoirs, regulate the water level in the dam in normal conditions or during an emergency situation.

When the floodgates are in operation, especially when they are partially opened, a high velocity flow occurs downstream of the gate resulting in sub-atmospheric or negative pressures that can cause possible damages either by cavitation or vibration. To prevent these negative pressures, vents are placed downstream of the gates to allow air entrainment into the conduit.

Partially opened gates, generate a hydraulic jump that is characterized by a highly turbulent roller region with a bubbly flow (air-water).

The air introduced by both the vent and the hydraulic jump is the main interest of this thesis, which intends to evaluate the air-water flow through the determination of the void fraction profiles that can be obtained: using a dual-tip conductivity probe (intrusive method) and by using a new visualization technique that uses a high speed camera (non-intrusive method).

The non-intrusive method is a new technique that is based on the assumption that void fraction profiles can be estimated from the pixel intensity recorded in each photograph and offers the possibility of obtaining the profiles at different locations along the hydraulic jump or anywhere within the visual field of the photography. This technique can be a powerful tool to complement intrusive probe measurements and has the advantage that it does not perturb the flow during the tests.

Contenido

1. CAPÍTULO I. Desfogues de fondo de presas	1-1
1.1 Definición	1-1
1.2 Funciones de los desfogues de fondo	1-2
1.3 Ubicación de los desfogues de fondo	1-2
1.3.1 Algunas configuraciones para la ubicación de un desfogue de fondo.....	1-4
1.4 Configuración hidráulica de los desfogues de fondo	1-5
1.5 Consideraciones y recomendaciones generales de diseño.....	1-6
1.6 Operación de los desfogues de fondo.....	1-6
2. CAPITULO II. Problemas que se presentan en los desfogues de fondo de presas	2-1
2.1 Problemas de sedimentación.....	2-1
2.2 Problemas por cavitación.....	2-2
2.2.1 ¿Qué es la cavitación?.....	2-2
2.2.2 Daños por cavitación en desfogues de fondo de presas.....	2-4
2.2.3 Prevención y corrección de daños por cavitación.....	2-6
3. CAPITULO III. Aireación – Demanda de aire (β)	3-1
3.1 Antecedentes	3-1
3.2 Parámetros característicos de la aireación	3-2
3.3 Aireación vs. Cavitación	3-3
3.4 Determinación de la demanda de aire (β)	3-4
3.4.1 Consideraciones generales.....	3-4
3.4.2 Tipos de flujo y mecanismo de aireación del flujo	3-5
3.4.3 Demanda y suministro de aire / Estado del arte.....	3-6
4. CAPITULO IV. Desarrollo de la Investigación.....	4-1
4.1 Introducción	4-1
4.2 Técnicas para la medición de los perfiles de concentración de aire.....	4-1
4.3 Algoritmo de tratamiento de imágenes – Perfiles de concentración de aire	4-3
4.3.1 Algoritmo Editor de Imágenes (EI)	4-3
4.3.2 Matriz de Intensidad de Píxeles (MIP)	4-7
4.4 Dispositivo Experimental.....	4-9
4.5 Registro y procesamiento de las mediciones.....	4-12
4.5.1 Mediciones con la cámara de alta velocidad (método no intrusivo).....	4-14

4.5.2 Registros con la sonda de conductividad de doble punta (método intrusivo)	4-15
4.5.3 Procesamiento de los datos obtenidos con la cámara de alta velocidad	4-16
4.5.4 Procesamiento de los datos obtenidos con la sonda.....	4-17
4.5.4.1 Coeficiente de Correlación, r	4-19
4.5.4.2 Coeficiente de determinación, R^2	4-20
4.6 Programa PIVLab – Perfiles de velocidad.....	4-20
5. CAPITULO V. Resultados.....	5-1
5.1 Resultados obtenidos con la sonda y con la cámara de alta velocidad	5-2
5.1.1 Análisis de los perfiles de concentración de aire	5-2
5.1.2 Análisis de los perfiles de velocidad.....	5-10
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	6-1
7. ANEXO A	7-1
8. BIBLIOGRAFIA	8-1

Índice de Figuras

Capítulo I. Desfogue de fondo de presas

Figura 1.1. Desfogue de fondo – Presa Poiana Rusca, Rumania, 2010	1-2
Figura 1.2. Desfogue de fondo con tiro vertical, túnel a presión galería vertical para compuertas deslizantes y conducto abierto (Torres Herrera, 1983)	1-3
Figura 1.3. Desfogue de fondo medio y desfogue de fondo	1-4
Figura 1.4. Izquierda - Túnel de desviación utilizado como desfogue de fondo (acceso por caída vertical). Derecha - Túnel de desviación utilizado como desfogue de fondo (acceso por la parte inferior)	1-4
Figura 1.5. Túnel de desviación utilizado como vertedor y desfogue de fondo	1-4
Figura 1.6. Desfogue de fondo de la Presa Green Mountain, Estados Unidos (Tanchev, 2005)	1-5
Figura 1.7. Configuración hidráulica de un desfogue de fondo	1-5

Capítulo II. Problemas que se presentan en los desfogues de fondo de presas

Figura 2.1. Desfogue de fondo con sedimento, Presa Cubillas (González de la Aleja)	2-2
Figura 2.2. Implosión de las burbujas de vapor (en el eje y en las paredes)	2-3
Figura 2.3. Daños por cavitación en el túnel de la presa Tarbela (Lewin, 2001)}	2-5
Figura 2.4. Daños por cavitación en el túnel de la presa Glen Canyon (Falvey, 1990)	2-5

Capítulo III. Aireación - Demanda de aire (β)

Figura 3.1. Aireación en desfogues de fondo de presas	3-5
Figura 3.2. Clasificación de los tipos de flujo en conductos cerrados (Pozo et al., 2014).....	3-6

Capítulo IV. Desarrollo de la investigación

Figura 4.1. Definición de las tres áreas en escala de grises de la imagen (Modificada de Leandro et al. 2012).....	4-4
Figura 4.2. Definición de los tres pasos del algoritmo editor de imágenes (Modificada de Leandro et al. 2012)	4-7
Figura 4.3. Definición de los tres pasos de algoritmo de la matriz de intensidad de píxeles (Modificada de Leandro et al. 2012)	4-9
Figura 4.4. Dispositivo variador de velocidad de giro de la bomba y válvula de mariposa de 20 cm (8 in)	4-10
Figura 4.5. Esquema general del dispositivo experimental (vista en planta)	4-11
Figura 4.6. Ubicación del venteo y de las perforaciones para la sonda (vista en planta)	4-11
Figura 4.7. Esquema de apertura de compuertas.....	4-12
Figura 4.8. Ubicación de los perfiles de concentración de aire	4-12
Figura 4.9. Izq. Anemómetro Modelo Testo 435. Der. Medidor de flujo, PrimeFlo-T	4-13
Figura 4.10. Tubería parcialmente llena hasta la descarga.....	4-13
Figura 4.11. Detalle del sitio donde se ubicará el salto hidráulico.....	4-14
Figura 4.12. Cámara FASTEC Modelo IL4-100	4-14
Figura 4.13. Configuración del espacio y toma de fotografías con la cámara FASTEC.....	4-15
Figura 4.14. Salto Hidráulico, compuertas del 10% y 40%.....	4-15

Figura 4.15. Sonde de conductividad de doble punta y su ubicación en el dispositivo	4-16
Figura 4.16. Espectro de frecuencias registrados por la sonda	4-16
Figura 4.17. Diagrama de bloque de Simulink	4-17
Figura 4.18. Línea Azul - Umbral Inferior (Mayor contenido de agua)	4-18
Figura 4.19. Línea Azul – Umbral Superior (Mayor contenido de aire).....	4-18
Figura 4.20. Umbrales Superior e Inferior (Similar contenido de aire y agua)	4-19
Figura 4.21. Pantalla de entrada del programa PIVLab.....	4-21
Figura 4.22. Pasos para análisis en PIVLab (Thielicke and Stambuis, 2014).....	4-22

Capítulo V. Resultados

Figura 5.1. Perfiles de concentración de aire (con sonda y cámara) – Compuerta 10% (1P1)	5-4
Figura 5.2. Perfiles de concentración de aire (con sonda y cámara) – Compuerta 20% (2.1P1)	5-5
Figura 5.3. Perfiles de concentración de aire (con sonda y cámara) – Compuerta 20% (2.2P1)	5-5
Figura 5.4. Perfiles de concentración de aire (con sonda y cámara) – Compuerta 30% (3.1P1)	5-6
Figura 5.5. Perfiles de concentración de aire (con sonda y cámara) – Compuerta 30% (3.2P1)	5-6
Figura 5.6. Perfiles de concentración de aire (con sonda y cámara) – Compuerta 40% (4P1)	5-7
Figura 5.7. Perfiles de concentración de aire (con sonda y cámara) – Compuerta 50% (5P1)	5-8
Figura 5.8. Perfiles de concentración de aire (con sonda y cámara) – Compuerta 50% (5P2)	5-8
Figura 5.9. Perfiles de concentración de aire (con sonda y cámara) – Compuerta 60% (6P1)	5-9
Figura 5.10. Perfiles de concentración de aire (con sonda y cámara) – Compuerta 70% (7P1)	5-10
Figura 5.11. Perfiles de velocidad en ‘u’ y ‘v’ – Compuerta 10% (1P1).....	5-11
Figura 5.12. Perfiles de velocidad en ‘u’ y ‘v’ – Compuerta 20% (2.1P1).....	5-11
Figura 5.13. Perfiles de velocidad en ‘u’ y ‘v’ – Compuerta 20% (2.2P1).....	5-12
Figura 5.14. Perfiles de velocidad en ‘u’ y ‘v’ – Compuerta 30% (3.1P1).....	5-12
Figura 5.15. Perfiles de velocidad en ‘u’ y ‘v’ – Compuerta 30% (3.2P1).....	5-12
Figura 5.16. Perfiles de velocidad en ‘u’ y ‘v’ – Compuerta 40% (4P1).....	5-13
Figura 5.17. Perfiles de velocidad en ‘u’ y ‘v’ – Compuerta 50% (5P1).....	5-13
Figura 5.18. Perfiles de velocidad en ‘u’ y ‘v’ – Compuerta 50% (5P2).....	5-13
Figura 5.19. Perfiles de velocidad en ‘u’ y ‘v’ – Compuerta 60% (6P1).....	5-14
Figura 5.20. Perfiles de velocidad en ‘u’ y ‘v’ – Compuerta 70% (7P1).....	5-14
Figura 5.21. Velocidades máximas positivas y negativas registradas para cada escenario.....	5-15

Índice de Tablas

Capítulo V. Resultados

Tabla 5.1. Escenarios para la toma de datos.....	5-1
Tabla 5.2. Parámetros de calibración de la sonda (límites superior e inferior)	5-2
Tabla 5.3. Parámetros de calibración del algoritmo para tratamiento de imágenes	5-2
Tabla 5.4. Coeficientes de correlación y determinación obtenidos para cada escenario	5-3
Tabla 5.5. Resumen de los valores máximos de las velocidades en 'u' y 'v'	5-15

Anexos

Tabla 7.1. Valores numéricos, escenario 1P1.....	7-1
Tabla 7.2. Valores numéricos, escenario 2.1P1	7-1
Tabla 7.3. Valores numéricos, escenario 2.2P1	7-2
Tabla 7.4. Valores numéricos, escenario 3.1P1	7-2
Tabla 7.5. Valores numéricos, escenario 3.2P1	7-3
Tabla 7.6. Valores numéricos, escenario 4P1.....	7-3
Tabla 7.7. Valores numéricos, escenario 5P1.....	7-4
Tabla 7.8. Valores numéricos, escenario 5P2.....	7-4
Tabla 7.9. Valores numéricos, escenario 6P1.....	7-5
Tabla 7.10. Valores numéricos, escenario 7P1.....	7-5

INTRODUCCIÓN

Las obras hidráulicas constituyen un conjunto de estructuras construidas con el objeto de manejar el agua, cualquiera que sea su origen, con fines de aprovechamiento o de defensa.

Hace algunos años las obras hidráulicas se construían con una finalidad aislada; sin embargo, desde el punto de vista económico, en la actualidad se estima como criterio conveniente el de considerar en cada caso la posibilidad de que las obras se orienten a satisfacer dos o más finalidades simultáneamente.

Uno de los elementos constitutivos de un aprovechamiento superficial es el **Almacenamiento**, formado por una **Presa**, en un sitio previamente escogido, que es en donde se cambia el régimen natural del escurrimiento al régimen artificial de la demanda, de acuerdo con el fin o los fines a que se destine. Aquí es conveniente recordar que una *presa* consta, en general, de las siguientes partes: vaso, cortina, obra de desvío, obra de toma, obra de excedencias **y túnel o tubería de desfogue de fondo**.

Una de las causas de fallo de las presas lo constituye precisamente el daño en los conductos de desfogue, por lo tanto, ante una posible razón de deterioro en ésta estructura, es conveniente prever una ventilación adecuada en aquellos sitios en que se puedan presentar presiones sub-atmosféricas. El mecanismo de funcionamiento de las tuberías de desfogue de fondo consiste en válvulas o compuertas diseñadas para ciertas condiciones de operación y operan a aberturas parciales o completamente abiertas.

En esta tesis se presentarán los perfiles de concentración de aire que se generan por la ocurrencia de un salto hidráulico al interior de un conducto circular de desfogue de fondo de una presa y que tiene lugar inmediatamente aguas abajo de las compuertas cuando éstas están parcialmente abiertas.

En el capítulo 1 se da una breve descripción de los desfogues de fondo de presas, sus funciones, su ubicación dentro de una obra hidráulica y algunas consideraciones generales de diseño.

En el capítulo 2 se detallan algunos problemas que suelen presentarse en este tipo de instalaciones y los daños que ocasionan a la estructura, así como una breve reseña de fallas acontecidas alrededor del mundo.

El capítulo 3 aborda el tema de la demanda de aire en conductos cerrados, la necesidad de instalación de venteos para evitar daños por cavitación, y, además, se presentan las diferentes fórmulas propuestas por varios investigadores para el cálculo de la cantidad de aire requerida por los desfogues de fondo de presas en función del caudal de agua que circula por el conducto.

El capítulo 4 presenta todos los parámetros considerados para el desarrollo de la presente tesis, se explica la configuración del dispositivo experimental, se exponen algunas técnicas utilizadas para la determinación de los perfiles de concentración de aire y se explican las técnicas aplicadas en la presente tesis, como son: el método intrusivo (sonda de conductividad) y método no intrusivo (cámara de alta velocidad). Adicionalmente, se explican los procedimientos para el procesamiento de datos y la posterior obtención de los perfiles de concentración de aire y velocidad para los dos paquetes de registros, es decir aquellos capturados con la sonda y aquellos obtenidos con la cámara de alta velocidad.

En el capítulo 5 se muestran los resultados obtenidos para todos los escenarios ensayados y se realiza un análisis de los mismos.

Finalmente, el capítulo 6 presenta las conclusiones y algunas recomendaciones basadas en la experiencia adquirida durante la realización de los ensayos de laboratorio y posterior procesamiento y análisis de resultados.

OBJETIVOS Y ALCANCES

- ✓ El objetivo principal de la presente tesis es estimar los perfiles de concentración de aire que genera un salto hidráulico aguas abajo de una compuerta de desfogue de fondo de presas, producido con diferentes aperturas de compuerta (válvulas de compuerta), así como los perfiles de velocidad del flujo agua-aire, que se generan en conductos circulares cerrados, a través del uso de técnicas intrusivas y no intrusivas que proporcionen una mejor comprensión de los procesos de entrada de aire y que además faciliten el diseño de sistemas de éste tipo.
- ✓ El uso de técnicas *intrusivas* (sonda de conductividad de doble punta) y el de *no intrusivas* (cámara de alta velocidad), que hasta la fecha no han sido desarrolladas para conductos cerrados, permitirán efectuar comparaciones entre sí, de tal manera que podamos asegurar si los resultados obtenidos con la cámara de alta velocidad son o no confiables, para así promocionar su uso como una herramienta complementaria en la determinación de los perfiles de concentración de aire.
- ✓ Además, se espera que este trabajo dé inicio a otros similares. Por ejemplo, en este caso se hará el análisis del flujo agua-aire ocurrido a diferentes gastos y aperturas de compuerta en un conducto circular horizontal de 20.32cm (8 pulgadas) de diámetro interno.

CAPÍTULO I:
DESFOGUES DE FONDO DE PRESAS

1. CAPÍTULO I. Desfogues de fondo de presas

1.1 Definición

Las presas disponen de un sistema de seguridad fundamental que son los desfogues de fondo, elementos imprescindibles para que, en casos de necesidad, se desfogue el agua de los embalses de manera controlada. Sin embargo, éstos, al no formar parte de la gestión o función ordinaria del embalse puede llevar a que el cuidado de los elementos que lo constituyen, especialmente las compuertas reguladoras y/o válvulas de compuertas, pasen a un segundo plano quedando así limitado su funcionamiento lo que ocasiona su fallo posterior debido a la falta de mantenimiento.

Los desfogues de fondo se construyen para asegurar el tránsito del agua del embalse hacia el río aguas abajo y para bajar el nivel del embalse. Son llamados desfogues de fondo de presas precisamente porque la entrada de la estructura se construye a un nivel muy bajo cerca de la cimentación de la presa. Los desfogues de fondo atraviesan toda la presa, generalmente son de forma circular y pueden ser túneles o tuberías que pueden trabajar a presión o como canales (flujo a superficie libre). Algunos pueden trabajar a presión desde la entrada hasta la estructura de compuertas y desde allí como canal abierto hasta el extremo aguas abajo, los conductos de desfogue de presas descargan directamente al río.

Una de las cuestiones más importantes en el diseño exitoso de los desfogues de fondo es la disposición y tipo de estructura y compuertas. En la mayoría de presas se incorporan siempre desfogues de fondo donde se han aplicado elementos metálicos de cierre y regulación. Normalmente se disponen dos líneas de desagüe. Su sección, una vez definido el número va a depender entre otros parámetros, de la capacidad del embalse, quedando limitado el caudal máximo normal a aquel que pueda admitir el cauce aguas abajo sin que se produzcan daños irreparables en el curso del mismo.

Los desfogues de fondo son los fusibles de las presas, y deben estar preparados en todo momento para descargar agua de manera controlada en caso de producirse problemas de seguridad en el sistema: daños en el muro de la presa ocasionados por movimientos sísmicos u otras causas, así como en el caso de previsión de avenidas con embalses en sus niveles máximos. En la figura 1.1 se muestra el desfogue de fondo de una presa.

Cuando se produce la descarga a través de los desfogues de fondo, presiones negativas pueden desarrollarse inmediatamente aguas abajo de las compuertas, generando problemas de cavitación y vibración que serán expuestos más adelante.



Figura 1.1. Desfogue de fondo – Presa Poiana Rusca, Rumania, 2010

1.2 Funciones de los desfogues de fondo

Los desfogues de fondo son una de las estructuras más importantes de las presas, que cumplen un rol muy significativo tanto para dar seguridad a la presa como para regular el nivel de agua en el embalse. Las finalidades con las que se construyen estos elementos son las siguientes:

1. Para seguridad de la presa y zonas aguas abajo de la misma.
2. Para controlar el nivel de agua en la presa y para garantizar una reserva de regulación frente a avenidas o en su defecto para evacuación de las mismas.
3. Para la evacuación de fangos y depósitos de arrastre manteniendo la capacidad del embalse.
4. Para poder dejar terreno en seco con el fin de realizar obras, reconocimientos, impermeabilizaciones y, en caso de eventos extraordinarios, realizar un vaciado completo del embalse.
5. Para cierre o desvío del río en la fase de construcción.
6. Para proporcionar la demanda de agua requerida aguas abajo de la presa durante el primer llenado del embalse.
7. En el caso de pequeñas presas y reservorios, para riego con el objetivo de poder utilizar la capacidad total del vaso.

1.3 Ubicación de los desfogues de fondo

De acuerdo con su posición en relación a la presa, los desfogues de fondo se clasifican en dos grupos:

1. Desfogues de fondo que pasan a través del cuerpo de la presa.
2. Desfogues de fondo ubicados en las orillas fuera del cuerpo de la presa (más habituales en presas de materiales sueltos).

Las estructuras de desfogue en el caso de esquemas hidráulicos con presas de concreto, regularmente están dentro del primer grupo. Al igual que los conductos de las obras de toma, los conductos de desfogue se localizan a través de las cortinas de concreto, dentro de trincheras sobre roca sólida y en cimentaciones de cortinas de tierra o tierra y enrocamiento.

En presas a gravedad, las embocaduras de los desfogues de fondo están en el muro de la presa. Dichas embocaduras están protegidas por rejas que evitan la entrada de elementos gruesos a los conductos, disponiendo a su vez de compuertas de paramento de cierre de los mismos. Estos atraviesan el cuerpo de la presa y en algunos casos, incorporan al final válvulas de regulación que vierten directamente al río.

En presas de materiales sueltos la toma de los desfogues de fondo se realiza:

- En obras de concreto ejecutadas en el vaso del embalse próximo al talud aguas arriba de la presa, con embocaduras protegidas por rejas y de donde parten los conductos de desfogue hasta la zona de compuertas. Estas pueden estar situadas en el interior del cuerpo de la presa, continuando aguas abajo de las mismas en túnel o lámina libre hacia el exterior hasta conectar con el cauce del río.
- Mediante construcción de una torre en el vaso del embalse (figura 1.2) próxima al talud aguas arriba de la presa que emerge sobre el nivel máximo de la misma. Este tipo de estructura se usa principalmente para obras de toma para riego llamadas obras de toma en torre. Esta torre dispone de diferentes tomas a distintas cotas para los caudales de abastecimiento; en su base se sitúan las embocaduras de los desfogues de fondo con sus rejas de protección y compuertas de paramento, continuando con disposiciones iguales a las descritas anteriormente.

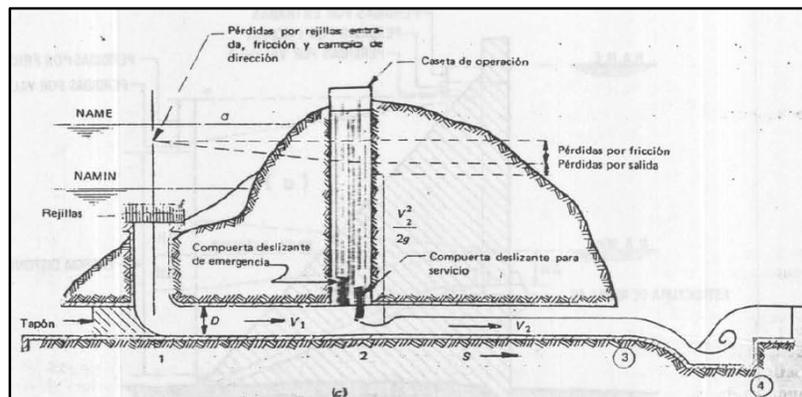


Figura 1.2. Desfogue de fondo con tiro vertical, túnel a presión galería vertical para compuertas deslizantes y conducto abierto (Torres Herrera, 1983)

Por último, en presas muy altas pueden disponerse desfogues de medio fondo como puede verse en la figura 1.3 (desagüe intermedio).

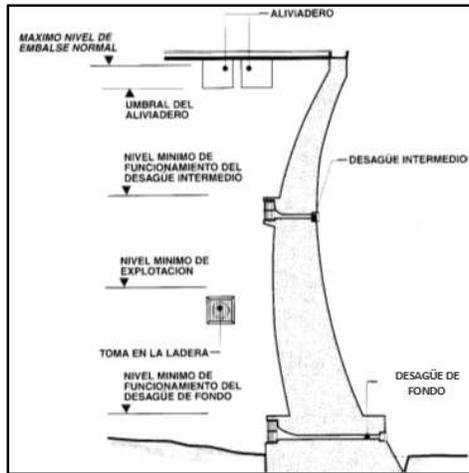


Figura 1.3. Desfogue de fondo medio y desfogue de fondo

1.3.1 Algunas configuraciones para la ubicación de un desfogue de fondo

En las figuras 1.4 a 1.6, se presentan algunos esquemas adicionales, a aparte del indicado en la figura 1.3, de ubicación de los desfogues de fondo de presas.

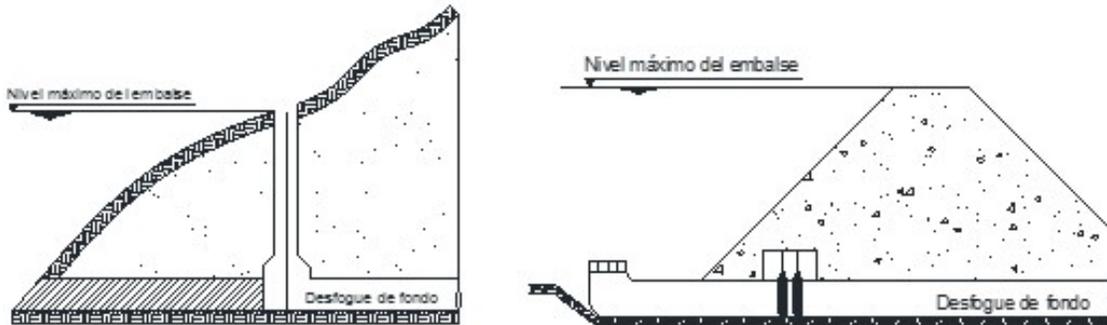


Figura 1.4. Izquierda - Túnel de desviación utilizado como desfogue de fondo (acceso por caída vertical). Derecha - Túnel de desviación utilizado como desfogue de fondo (acceso por la parte inferior)

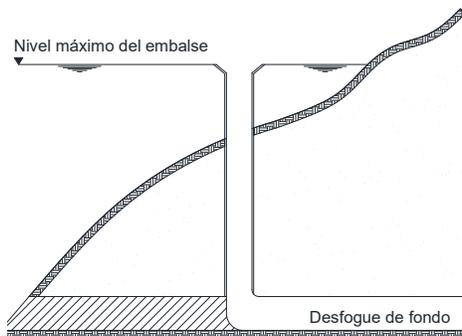


Figura 1.5. Túnel de desviación utilizado como vertedor y desfogue de fondo

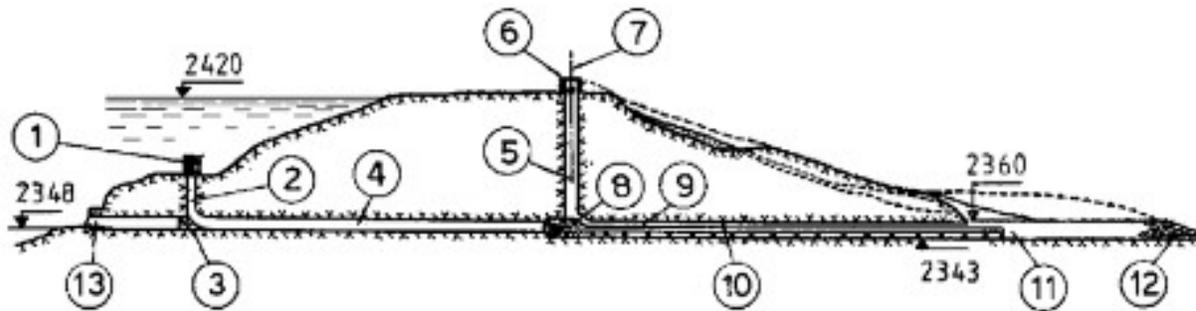


Figura 1.6. Desfogue de fondo de la Presa Green Mountain, Estados Unidos (Tanchev, 2005)

En la figura 1.6, (1) Rejilla para basura a la entrada del túnel; (2) Eje de admisión del desfogue de fondo; (3) Tapón de concreto del túnel de desvío; (4) Túnel; (5) Eje de control del desfogue de fondo; (6) Mecanismo para apertura de compuertas; (7) Eje de la presa; (8) Cámara de compuertas; (9) Tuberías de acero instaladas en el túnel; (10) Túnel con una sección de herradura; (11) Canal; (12) Escollera inclinada; (13) Entrada al túnel de desviación

1.4 Configuración hidráulica de los desfogues de fondo

Los desfogues de fondo no son estructuras de uso permanente sino más bien suelen trabajar periódicamente debido a que se ven afectadas por fenómenos de cavitación, fuerzas hidrodinámicas, desgaste y vibraciones. En casos muy raros, por ejemplo, cuando sirven como provisión para mantener el caudal ecológico del río aguas abajo de la presa estas estructuras si pueden trabajar permanentemente.

Para que los desfogues de fondo de presas tengan un funcionamiento eficaz y duradero, que evite el deterioro por las causas antes indicadas, la correcta configuración de tal estructura debe ser como se muestra en la figura 1.7:

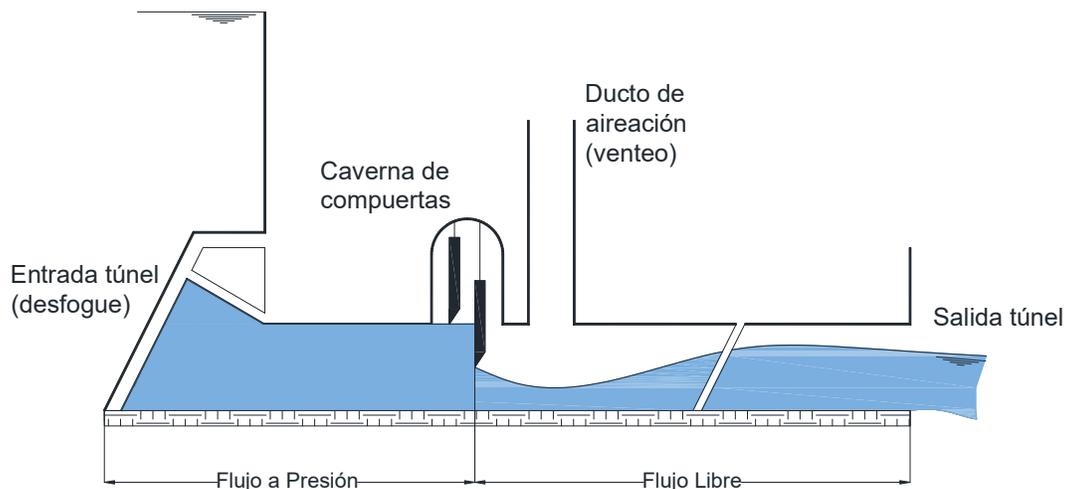


Figura 1.7. Configuración hidráulica de un desfogue de fondo

1.5 Consideraciones y recomendaciones generales de diseño

Los desfogues de fondo son estructuras que trabajan a una carga de presión variable, por lo tanto, deben estar diseñadas para facilitar el vaciado del embalse durante un cierto periodo de tiempo. De acuerdo a esto, cálculos hidráulicos apropiados son llevados a cabo de tal manera que las siguientes interrogantes queden resueltas:

- *Determinar la capacidad de descarga del desfogue de fondo:* el número de vanos del desfogue de fondo debe ser mínimo igual a dos. Todos los desfogues profundos se proyectarán para poder funcionar correctamente, con la carga total del embalse, tanto en su apertura como en su cierre.
- *Prevenir la cavitación:* se debe elegir cuidadosamente el tipo de compuertas a utilizar ya que tienen especial importancia debido a fenómenos de vibración y cavitación. La condición de diseño recomendada es que la zona aguas abajo de las compuertas tenga un flujo a superficie libre.
- *La forma de los elementos:* debe ser tal que ofrezcan menor resistencia hidráulica posible y menores fuerzas hidrodinámicas.
- *Anticipar y dimensionar los dispositivos para entrada de aire:* este tipo de obras, fundamentalmente en la zona de compuertas, están sometidas a velocidades muy altas (20m/s a 40m/s) y por lo tanto a riesgos importantes de **cavitación**, por este motivo, la **aireación** del sistema es relevante para reducir dichos riesgos.
- *Definir el régimen de flujo para diferentes volúmenes de descarga, diferentes niveles de carga de agua y diferentes aperturas de compuertas.*

Una importante interrogante durante el diseño de los desfogues de fondo es el arreglo y tipo de válvulas y compuertas. Todos los desfogues de fondo estarán provistos de doble cierre, dos compuertas o válvulas, una para servicio y otra para revisión, y deberán poderse accionar a mano y automáticamente, con energía procedente de dos fuentes distintas.

La práctica ha demostrado lo poco que se puede esperar de los desfogues de fondo para la evacuación y arrastre de sedimentos a los efectos de conservar la capacidad del vaso, por lo que este propósito por sí solo, no justifica una construcción tan costosa.

Es totalmente recomendable estudiar el diseño definitivo del desfogue de fondo mediante el uso de modelos hidráulicos a una escala adecuada, 1:20 a 1:30, que son las escalas normalmente utilizadas para modelar los fenómenos de aireación.

1.6 Operación de los desfogues de fondo

Es de gran importancia tener una apropiada operación de los desfogues de fondo de presas y mantenerlos bajo condiciones favorables, que aseguren su

correcto funcionamiento incrementando de esta manera su vida útil y reduciendo costos por mantenimiento y operación.

Inspecciones continuas para detectar problemas que adopten las implicaciones necesarias para resolverlos están entre las actividades operacionales más importantes.

La inspección de los desfogues de fondo y sus componentes deben ser llevadas a cabo con cierta regularidad. La observación e informe de los defectos y de cualquier comportamiento inusual de la estructura debe ser reportado sobre todo después de eventos especiales y emergencias tales como sismos e inundaciones, con la finalidad de evitar problemas y daños irreparables a estos elementos.

CAPÍTULO II:
PROBLEMAS QUE SE PRESENTAN EN LOS
DESFOGUES DE FONDO DE PRESAS

2. CAPITULO II. Problemas que se presentan en los desfogues de fondo de presas

Como se estableció anteriormente, la finalidad principal de los desfogues de fondo es la *seguridad de la presa y zonas aguas abajo de la misma*, por lo que, su existencia se hace imprescindible.

Los elementos que conforman un desfogue de fondo de presa (compuertas, túnel, tuberías) exigen una conservación apropiada y continua atención, mientras que siendo su uso algo extraordinario, que puede no precisarse en largos años, da lugar a que con el tiempo queden olvidados, llegando en algunos casos a su deterioro por falta de mantenimiento y manejo, o por una pérdida de operatividad de sus diferentes elementos por haber superado ampliamente la época tecnológica en la que se fabricaron.

Debido a que los desfogues de fondo experimentan flujo a altas velocidades comparados con las compuertas de vertedores, los problemas hidrodinámicos son más frecuentes. Uno de los problemas a los que están expuestas estas estructuras es a la destrucción del material de la pared del conducto, que en determinados casos puede llevar a la falla total de los mismos. La falla puede ser causada por diversos factores, siendo un ejemplo de ellos la erosión por el arrastre y *acumulación de sedimentos* en la embocadura. Sin embargo, la de mayor importancia por su impacto y la velocidad con la que actúa es la causada por la *cavitación*.

Ante esta evidencia, los desfogues de fondo existentes deben someterse a un profundo análisis de su estado para fijar las necesarias revisiones y/o actualizaciones técnicas a fin de que sus diferentes elementos queden operativos de forma segura y eficaz. De igual manera, incluso en la etapa de diseño, es preciso establecer unos criterios de mantenimiento y maniobras a ejecutar, de acuerdo con las condiciones particulares de cada embalse, que deben seguirse de manera rigurosa tanto en la forma como en los periodos establecidos.

2.1 Problemas de sedimentación

Los desfogues de fondo se sitúan en la zona de la presa donde el lecho del embalse alcanza la mayor profundidad, por este motivo han fallado durante su apertura debido al sedimento existente. A lo largo del tiempo los arrastres producidos por el funcionamiento normal del embalse y con una intensidad mucho mayor en avenidas, se detienen en el muro de la presa produciéndose sedimentación. Cuando el nivel de sedimentos alcanza la cota del umbral del desfogue, éstos se introducen en los conductos que, con el tiempo, si no se realizan barridos con caudales adecuados, se sedimentan inevitablemente.

Como ejemplo de este caso se pueden citar los desfogues de fondo de presas de Iznájar y Cubillas (González de la Aleja), en los cuales los conductos, desde su

embocadura hasta las compuertas de guarda y regulación se encontraron con un nivel de sedimentos que alcanzaba el plano diametral como se aprecia en la figura 2.1.



Figura 2.1. Desfogue de fondo con sedimento, Presa Cubillas (González de la Aleja)

Otro ejemplo lo constituye la presa de Barasona en España, en este caso el sedimento se extendía hasta una profundidad de 20 m adyacentes a la presa y había bloqueado completamente el desfogue de fondo.

Las acumulaciones de sedimentos en los desfogues de fondo en ningún caso deberían producirse, incluso con un nivel de sedimentos en el vaso superando la cota del umbral de su embocadura. Un programa de barridos más o menos intensos, dependiendo de las características del embalse, no eliminan del vaso los sedimentos acumulados para conservar su capacidad, pero si son suficientes para mantener limpios los conductos y la zona de su embocadura.

2.2 Problemas por cavitación

2.2.1 ¿Qué es la cavitación?

Se puede definir a la cavitación como un fenómeno físico, que se presenta en líquidos, estáticos o en movimiento, y que se debe principalmente al descenso de la presión en el interior del líquido más allá de la presión de vaporización del mismo, lo que permite la formación y crecimiento de burbujas de vapor que más tarde se colapsarán, liberando ondas de presión de gran magnitud; este descenso de la presión en determinadas zonas de los sistemas se debe a combinaciones especiales de sus condiciones, como pueden ser la presión del sistema, la velocidad del flujo, la temperatura del líquido, etc.

Por cavitación se entiende la formación de bolsas localizadas de vapor dentro del líquido, pero casi siempre en las proximidades de las superficies sólidas que limitan el líquido. En contraste con la ebullición, la cual puede ser causada por la introducción de calor o por una reducción de la presión estática ambiente del

líquido, la *cavitación* es una vaporización local del líquido inducida por una reducción hidrodinámica de la presión.

La cavitación es un fenómeno que se produce, por ejemplo, cuando el agua o cualquier otro fluido pasa a una gran velocidad por una arista, produciendo la descompresión del fluido. Es decir, al aumentar la velocidad del fluido la presión tenderá a caer bruscamente. Para entender mejor esto se hablará de la ecuación de Bernoulli, definida por la siguiente expresión:

$$z + \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} = c$$

Esta expresión es la que cumple el principio de Bernoulli para un flujo laminar ideal, y quiere decir que la suma de los tres términos de energía que lleva el agua, o sea, la energía total del agua, es constante entre dos puntos. El término z representa la cota o altura de presión (altura respecto al nivel del mar) a la que está el fluido, la cual va a ser constante dentro de un sistema. Sin embargo, los otros dos términos de la expresión, proporcionales a la velocidad y presión, podrán variar al cambiar éstas dos últimas. Vemos que para un aumento de la velocidad (ya que el valor de la energía total tiene que ser constante) la presión tenderá a reducirse. Por tanto, esta premisa básica es la que define el fundamento de la cavitación.

Las burbujas de vapor al estar a menor presión que su entorno, se desplazan a su alrededor, donde las moléculas siguen en estado líquido, es decir, a mayor presión, por lo que al entrar en contacto unas con otras se producen implosiones, las burbujas se colapsan súbitamente, cuya consecuencia inmediata es la formación de un microchorro, que golpea las paredes de lo que está en su entorno, erosionando así los materiales.

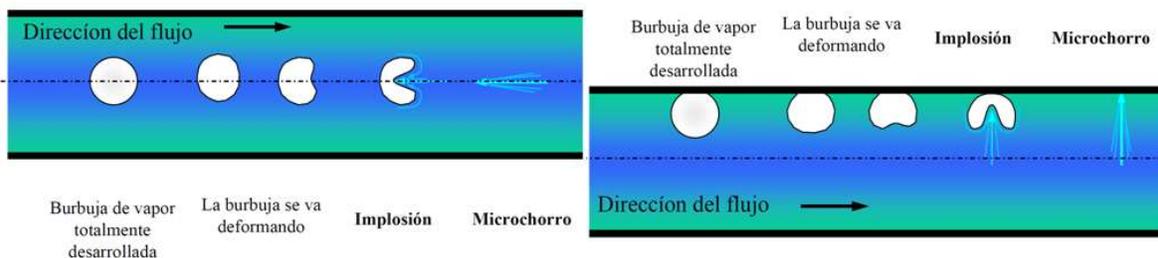


Figura 2.2. Implosión de las burbujas de vapor (en el eje y en las paredes)

Este fenómeno suele afectar a bombas hidráulicas, válvulas, tuberías y conductos en general. En las dos primeras suele provocar ruidos, golpes como si hubiera piedras por dentro chocando y vibraciones. En las tuberías y demás conductos el fenómeno más común es la erosión interna de las paredes, que debilita la estructura de la conducción pudiendo incluso convertirla en un vehículo inseguro para el transporte de cualquier tipo de fluidos. Es decir, que puede atacar las capas protectoras del conducto, inhabilitándolas, así como provocar el fallo de

la tubería. Los fallos en tuberías y conductos son bastante peligrosos y se pueden manifestar de diferentes maneras como pérdidas de agua, daños en instalaciones, etc.

2.2.2 Daños por cavitación en desfogues de fondo de presas

De todos los problemas que pueden ocurrir en los desfogues de fondo, la cavitación y erosión, asociados a un flujo a alta velocidad, han sido los más severos y los más frecuentes. La convergencia y la curvatura que presenta el flujo al entrar al túnel o desfogue de fondo pueden producir presiones sub-atmosféricas que, junto con los efectos de turbulencia y fluctuaciones, pueden ser lo suficientemente bajas para causar cavitación.

Alrededor de las compuertas con una gran carga de agua, como la velocidad es demasiado alta, cada objeto no uniforme, como una ranura o la misma compuerta al estar parcialmente abierta, hace que el flujo sea muy turbulento. Los soportes y mecanismos de elevación de compuertas verticales están normalmente colocados en el lado aguas abajo de la compuerta y están alojados en ranuras rebajadas en las paredes laterales para protegerlos del flujo a alta velocidad. El flujo de agua a través de las ranuras y por debajo de la compuerta provoca la separación del flujo dando lugar a la formación de pequeños vórtices, así, bajo condiciones de flujo a alta velocidad, la cavitación puede ocurrir en las proximidades de las ranuras de las compuertas, además, las fluctuaciones de presión pueden generar impactos en toda la estructura. Debido a las altas velocidades, las burbujas son arrastradas aguas abajo, a zonas de presión más alta, donde se colapsarán, generando las ondas de presión causantes del daño en las superficies.

Infortunadamente, debido a la dinámica del fenómeno es sumamente difícil predecir el sitio exacto donde se presentará el daño. Lo único que es seguro es que, una vez iniciado, bastarán pequeñas vibraciones en las condiciones del flujo para que se intensifique. Además, una vez comenzada la erosión de la superficie, ésta se debilitará, volviéndose más fácil el desprendimiento del material, sumándose a esto el efecto de las sub-presiones en los poros del mismo. Todo este proceso puede ser tan rápido y contundente que en poco tiempo se puede alcanzar el colapso total de la estructura, con todas las consecuencias negativas que ello puede ocasionar.

En todo el mundo, las principales causas de daños en los desfogues de fondo son: cavitación, erosión y vibración. A continuación, se citan algunos ejemplos:

- *Estructuras afectadas por cavitación:* en 1974, el túnel de desviación de la presa Tarbela en el río Indus en Pakistán colapsó durante la fase de construcción debido a daños por cavitación. La cavitación se produjo por un flujo altamente turbulento, en el cual, la fluctuación instantánea de la presión llegó a ser tan fuerte que originó momentánea e intermitentemente

presiones inferiores a la de vapor. En la figura 2.3 se puede observar la magnitud del daño ocasionado.



Figura 2.3. Daños por cavitación en el túnel de la presa Tarbela (Lewin, 2001)}

En junio de 1983, el túnel izquierdo de la presa Glen Canyon quedó destruido durante las maniobras de liberación de agua de la presa, que se realizaron para evitar que ésta se desbordara, puesto que, el deshielo de la nieve de las montañas Rocallosas produjo una crecida de los ríos y se estimó que hacia el embalse de la presa fluían alrededor de $3398.02 \text{ m}^3/\text{s}$. A través de los túneles de desfogue, cuya capacidad máxima era de $792.87 \text{ m}^3/\text{s}$, se debió liberar agua de la presa a razón de $2605.14 \text{ m}^3/\text{s}$, lo cual generó un incremento en la velocidad del flujo que junto a las irregularidades propias de la estructura ocasionaron daños por cavitación. Los daños generados se pueden apreciar en la figura 2.4.

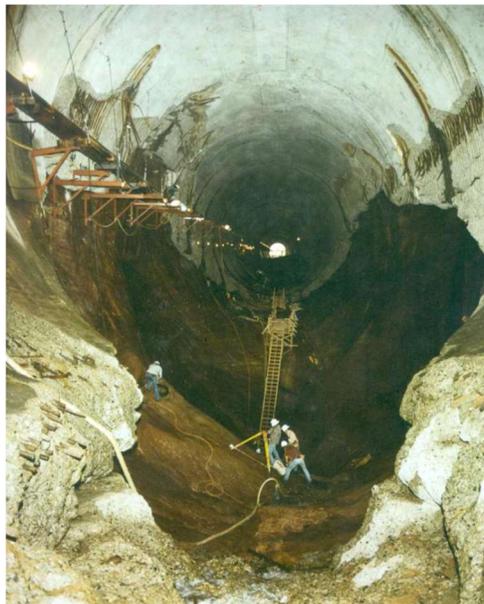


Figura 2.4. Daños por cavitación en el túnel de la presa Glen Canyon (Falvey, 1990)

- Erosión del conducto que descargaba flujo con sedimentos: desfogue de fondo de la presa Mud Mountain en Estados Unidos, en este caso, el flujo con sedimento consistió en rocas de 60 cm de diámetro y una velocidad del flujo de 9m/s a 12m/s causando severos daños al túnel de salida.

Finalmente, es importante recalcar que **la presente tesis** se enfoca en la cavitación que puede ocurrir a diferentes aperturas de las compuertas de los desfogues de fondo. En efecto, “cuando una compuerta está parcialmente abierta, el flujo que pasa por debajo de la misma y por las ranuras se vuelve tri-dimensional, y es influenciado por la forma y proximidad de la compuerta. La posibilidad de cavitación es mayor si la compuerta, aguas abajo, está sumergida que cuando la descarga es libre. Sobre el borde inferior de la compuerta, el mecanismo de elevación de la misma debe, en lo posible, ocupar totalmente las ranuras, caso contrario, aumenta el riesgo de cavitación en las paredes cerca del piso del conducto” (May, 1987).

2.2.3 Prevención y corrección de daños por cavitación

Entre las medidas que, por separado o conjuntamente, se adoptan para atenuar o evitar los daños ocasionados por la cavitación, se citan las siguientes:

- Evitar irregularidades en zonas de velocidades elevadas y si han de disponerse airearlos o blindarlos.
- Emplear revestimientos más resistentes que el concreto convencional.
- El borde inferior de las compuertas debería diseñarse para producir una separación libre del flujo sin acoplamiento posterior. Un borde con un perfil suave aguas arriba de la compuerta reduce la intensidad de separación bajo condiciones sumergidas y disminuye el riesgo de formación de cavidades en la línea horizontal de corte entre el chorro a alta velocidad y el agua arriba de éste. La cavitación en tales líneas de corte puede causar serios daños a lo largo de las paredes aguas abajo de una compuerta parcialmente abierta.

En ciertas situaciones cuando existen riesgos de cavitación o de depresiones, la solución de **airear artificialmente** el flujo, cuando de forma natural no se alcanzan las concentraciones de aire necesarias, es cada vez más utilizada. Su aplicación es fácil y de reducido costo si se adopta en el proyecto, complicándose si ha de utilizarse en obras dañadas o que de sus diseños se deduzcan riesgos de tal suceso.

CAPÍTULO III:
AIREACIÓN – DEMANDA DE AIRE (β)

3. CAPITULO III. Aireación – Demanda de aire (β)

3.1 Antecedentes

Las altas velocidades que se generan en gran parte de las estructuras hidráulicas de las presas originan, una fuerte interacción entre el agua y el aire, de manera que éste se introduce en el agua en forma de burbujas, mientras que en otras situaciones una insuficiente dotación de aire puede dar lugar a problemas de cavitación. Todas estas circunstancias, englobadas bajo la denominación de “**aireación**”, deben ser consideradas para el correcto diseño y funcionamiento de dichas estructuras.

Algunos elementos de las presas en los que se produce el fenómeno de la aireación son: canales de descarga (rápidas), vertedores en embudo o escalonados, tanques amortiguadores y **desfogues de fondo** en lámina libre o en carga, así como, en compuertas y válvulas.

De acuerdo con los casos mencionados, el flujo de agua-aire en las estructuras hidráulicas de las presas puede analizarse según la siguiente clasificación:

1. Flujo en vertedores con rápida
2. Flujo en conducciones cerradas (caso de la presente tesis)
3. Flujo en caída libre.

En el primer y tercer casos el fenómeno de aireación suele conocerse como “*arrastré de aire*” ya que es transportado por la corriente, y en el segundo caso se emplea el concepto de “*demanda de aire*”, aludiendo así a las necesidades que de este elemento tiene la conducción.

En conductos cerrados, como los desfogues de fondo de presas, cuando la compuerta del conducto está parcialmente abierta, un flujo a alta velocidad ocurre aguas abajo de la misma, dando como resultado presiones por debajo de la atmosférica. Esta caída de presión que depende de la velocidad del flujo, del porcentaje de apertura de la compuerta y de la geometría de la instalación, teóricamente, puede alcanzar valores tan bajos como los de presión de vapor y generar inconvenientes durante la operación de la compuerta, como vibraciones y cavitación.

La demanda de aire en los conductos cerrados, si su funcionamiento es en lámina libre, puede producirse de forma *natural* a partir del aire existente en la zona no ocupada por el agua el cual penetra en el conducto desde su extremo de aguas abajo. Sin embargo, si las necesidades de aireación son superiores o no se quiere confiar sólo en el aire que puede suministrar el proceso natural, como ocurre en la mayoría de los casos, ha de recurrirse a conductos y a dispositivos de aireación *artificial*.

Para evitar las presiones por debajo de la atmosférica, los conductos (túneles) se conectan a la atmósfera a través de un venteo (aireador) localizado aguas abajo de la compuerta, el propósito del venteo es introducir aire y así mantener las presiones aguas abajo de la compuerta a un nivel seguro.

La dificultad de determinar la demanda de aire requerida para este tipo de instalaciones ha sido tratada por varios investigadores. Las ecuaciones propuestas correlacionan el flujo de aire con el flujo de agua y con el número de Froude al inicio o al pie de un salto hidráulico.

Un salto hidráulico dentro de un conducto cerrado introduce aire en el flujo debido a su alto nivel de turbulencia en la interfaz agua-aire. Conocer la cantidad de aire introducido por un salto hidráulico es importante para un adecuado diseño de los conductos, de las compuertas de desfogue de fondo y de los venteos. El salto hidráulico es caracterizado por su turbulencia a gran escala, por sus ondas superficiales, porque es un buen disipador de energía y porque introduce aire al flujo.

Hay que destacar la complejidad del fenómeno de la aireación, cuyo análisis además de requerir un cierto bagaje matemático entraña complicaciones aún no resueltas por completo sobre las que se deben proseguir las investigaciones. Ello, en gran número de casos obliga a recurrir a *ensayos en modelos*, con las dificultades que los mismos presentan para reproducir fidedignamente la aireación.

3.2 Parámetros característicos de la aireación

En el estudio de la aireación se emplean, con carácter general, varios parámetros para cuantificar el arrastre o la demanda de aire. Los de mayor interés son:

- ✓ **Concentración de aire (C).**- Es la relación entre el volumen de aire existente en la mezcla agua-aire y el volumen total de ésta.

$$C = \frac{V_a}{V_a + V_w} = \frac{Q_a}{Q_a + Q_w} \quad (3.1)$$

Donde:

V_a , volumen de aire (m^3)

V_w , volumen de agua (m^3)

Q_a , caudal de aire (m^3/s)

Q_w , caudal de agua (m^3/s)

Precisamente éste parámetro es el interés de la presente tesis, ya que se determinarán los *perfiles de concentración de aire* que se generan en un flujo agua-aire ocurrido aguas abajo de una compuerta de desfogue de fondo de una presa.

- ✓ **Concentración de agua (ω).**- Es la relación entre el volumen de agua y el volumen de la mezcla.

$$\omega = \frac{V_w}{V_a + V_w} = \frac{Q_w}{Q_a + Q_w} \quad (3.2)$$

- ✓ **Concentración de aireación o demanda de aire (β).**- Es la relación entre el caudal de aire y el de agua existentes en la mezcla.

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w} \quad (3.3)$$

3.3 Aireación vs. Cavitación

La cavitación en un líquido se produce cuando, a temperatura constante, la presión disminuye hasta alcanzar su tensión de vapor. En este momento el fluido pierde su homogeneidad al aparecer a su alrededor cavidades de vapor, de forma que el fluido se convierte en bifásico. Si la presión aumenta de nuevo las cavidades se hacen inestables y colapsan recuperándose rápidamente el estado líquido y liberándose localmente cantidades importantes de energía que provocan daños en los materiales de los conductos (“erosión por cavitación”).

El efecto protector de la **aireación** frente a la cavitación se fundamenta principalmente en los siguientes aspectos: se evitan presiones bajas, las cavidades formadas son mayores y las presiones de colapso menores, y se amortigua parte de la energía liberada en el colapso al transformarse el agua en un **fluido bifásico (agua-aire)** menos denso y más elástico.

En relación con los daños por cavitación, diferentes autores han propuesto algunos índices que permiten predecir si en una determinada situación existen riesgos de tales daños. Estos índices se calculan en función de las condiciones del flujo y se comparan con “valores críticos”, obtenidos en modelo o en prototipo, por debajo de los cuales pueden producirse daños. En las estructuras hidráulicas de las presas el más utilizado es el índice de cavitación (σ). Sus valores críticos (σ_{CR}) para los acabados superficiales usuales, son del orden de 0.2 – 0.25. (Falvey 1980, 1990)

$$\sigma = \frac{P_0 - P_v}{\rho \frac{V_0^2}{2}} \quad (3.4)$$

Donde:

σ , índice de cavitación

P_v , presión de vapor de agua (N/m²)

P_0 , presión absoluta (N/m²)

V_0 , velocidad absoluta (m/s)

ρ , densidad del agua (Kg/m³)

3.4 Determinación de la demanda de aire (β)

3.4.1 Consideraciones generales

Las altas velocidades bajo las que normalmente deben funcionar los desfuegos de fondo son propicias para la aparición de cavitación, vibraciones y depresiones, con los consiguientes daños que de estos fenómenos se derivan. Por todo ello, y además de dotar a estas estructuras de los adecuados diseños que eviten estos problemas – perfiles hidrodinámicos de los contornos de las compuertas y de sus ranuras, blindajes, acabados cuidadosos de los paramentos, etc. – han de estar suficientemente aireadas.

Los sistemas de aireación, dependiendo del tipo de funcionamiento del desfogue de fondo, lámina libre o en carga, irán encaminados a suministrar el aire requerido por las compuertas o válvulas, y por el propio conducto.

La aireación de las estructuras antes mencionadas puede realizarse mediante el aire que penetra desde la salida del desfogue, y a través de venteos (conductos de aireación), como los indicados anteriormente.

Dichos conductos desembocan en la parte superior del desfogue inmediatamente aguas abajo de la compuerta, adicionalmente, conviene disponer en la solera, de aireadores que, conectados también a los conductos de aireación, introduzcan cantidades suplementarias de aire en la corriente con el fin de airear intensamente todos los contornos del flujo, especialmente en los casos de velocidades elevadas o desfuegos prolongados (ver figura 3.1).

En determinadas ocasiones los conductos de aireación pueden sustituirse por válvulas de admisión y expulsión de aire (ventosas) colocadas en la cámara de compuertas. Esto puede ser válido para las compuertas o válvulas de seguridad o emergencia, pero no para las de regulación como procedimiento general. Cuando se empleen ventosas, estos dispositivos han de situarse teniendo en cuenta que pueden producir eventuales proyecciones de agua. En todos los casos los sistemas de aducción de aire, conductos y ventosas, deberán proyectarse de forma que no produzcan vibraciones y de tal manera que, la distribución del aire sea homogénea en las zonas de presiones reducidas.

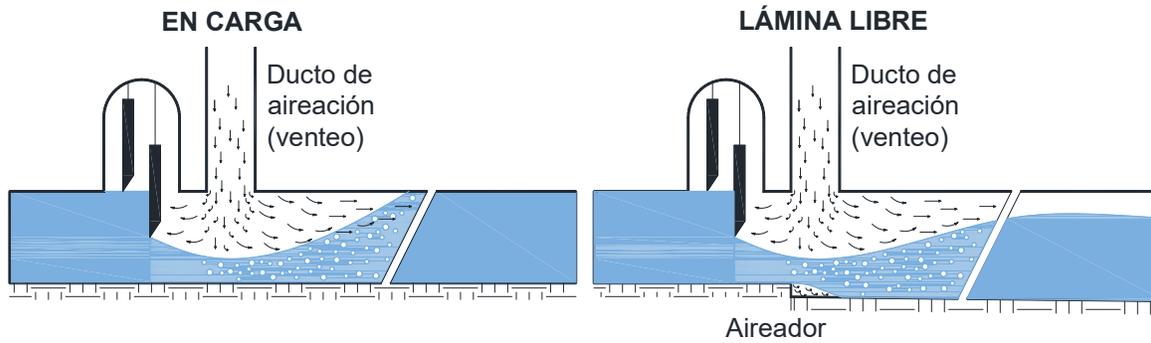


Figura 3.1. Aireación en desfogues de fondo de presas

3.4.2 Tipos de flujo y mecanismo de aireación del flujo

La mayoría de las presas tienen descargas de fondo que consisten en conductos cerrados que atraviesan la presa, con compuertas deslizantes o válvulas reguladoras de flujo. Estas válvulas son usadas principalmente para desfogar el embalse y controlar la altura de agua en el mismo.

Para encontrar una solución racional al problema de la demanda de aire (concentración de aire) en conductos cerrados de desfogue de presas, estudios detallados fueron llevados a cabo por Sharma (1976) en la Universidad Técnica de Noruega. Los tipos de flujo en conductos cerrados se clasificaron dentro de las categorías que se detallan a continuación:

a) *Flujo de aire sin agua.* Ocurre cuando la compuerta está totalmente cerrada, no hay flujo de agua, pero debido a la diferencia de temperatura, el flujo de aire puede tomar lugar en dirección inversa.

✓ **Flujo sin salto:**

b) *Flujo spray o pulverizado.* Ocurre a pequeñas aperturas de compuerta, usualmente menores que el 10%, el chorro que sale debajo de la compuerta rocía gotas de agua muy pequeñas y permite el ingreso de una gran cantidad de aire.

c) *Flujo en lámina libre.* Depende de la relación del flujo de aire al flujo de agua, éste puede ocurrir en la forma de un flujo ondulado o flujo estratificado.

d) *Flujo espumoso o emulsionado.* El conducto se llena casi uniformemente con la mezcla aire-agua, pero todavía el flujo no es a presión.

✓ **Flujo con salto:**

e) *Salto hidráulico-1 o flujo con salto en lámina libre.* Salto hidráulico seguido por un flujo a superficie libre, en el pie del salto se produce una entrada importante de aire.

- f) *Salto hidráulico-2 o flujo con salto en carga.* Salto hidráulico seguido por flujo a tubo lleno. Se forma un salto no sumergido y el flujo se mantiene a presión a lo largo de todo el desfogue. En el pie del salto se produce una entrada importante de aire.
- g) *Flujo de agua sin aire (Salto sumergido).* Se forma un salto sumergido y el flujo se mantiene a presión a lo largo de todo el desfogue. No se produce arrastre de aire.

En la figura 3.2, se presenta un esquema de los tipos de flujo antes mencionados, donde Q_a es el caudal de aire y Q_w es el caudal de agua.

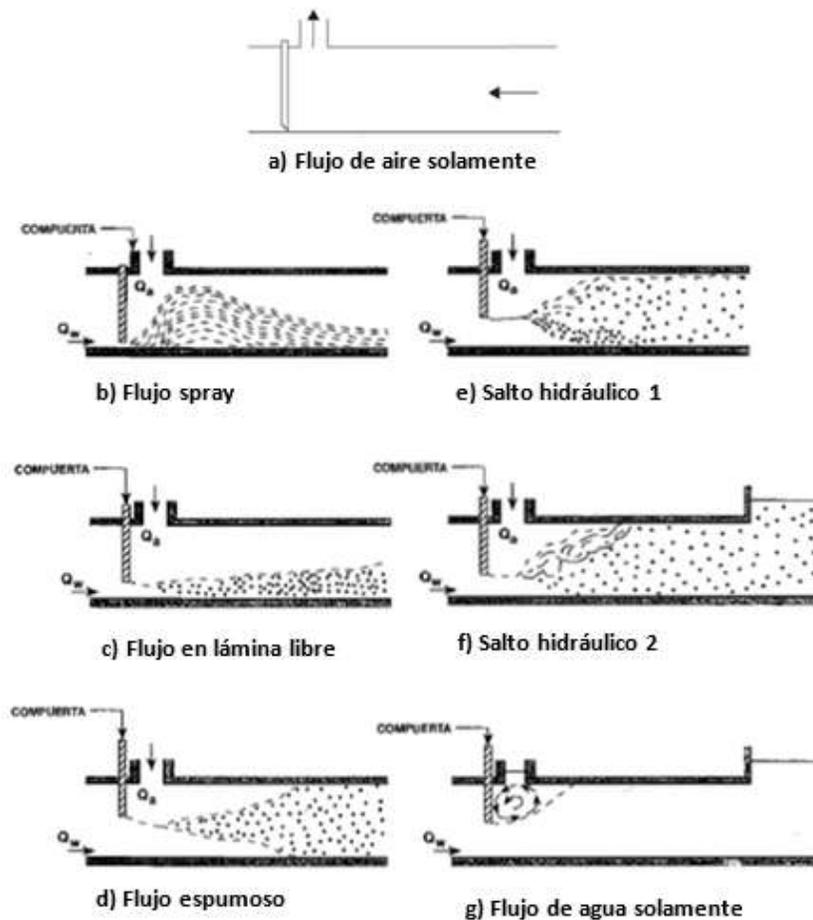


Figura 3.2. Clasificación de los tipos de flujo en conductos cerrados (Pozo et al., 2014)

3.4.3 Demanda y suministro de aire / Estado del arte

La demanda de aire depende principalmente del tipo de flujo que se establezca en el desfogue, del modelo de compuerta o válvula con los que se controlen las descargas y de sus grados de apertura. Su cuantificación ha sido objeto de múltiples formulaciones, a continuación, se presentan algunas de ellas:

Kalinske y Robertson (1943) llevaron a cabo los primeros experimentos relacionados a la entrada de aire y sus propiedades a través de mediciones del flujo de aire en un salto hidráulico presente en una tubería circular cerrada con diferentes pendientes. Los resultados indicaron que la demanda de aire, β , depende únicamente del número de Froude inmediatamente aguas arriba del salto y no de la inclinación de la tubería. Con los datos obtenidos, desarrolló la siguiente expresión empírica para determinar la demanda de aire:

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w} = 0.0066(F_1 - 1)^{1.4} \quad (3.5)$$

En donde, F_1 , es el número de Froude en el punto donde inicia el salto.

Asumiendo que el flujo más allá del salto es capaz de transportar todo el aire introducido por el salto, β debería depender únicamente de la capacidad del salto para ingresar aire y puede ser caracterizado por el número de Froude aguas arriba del mismo. Sin embargo, si el salto se forma a una distancia considerable de la compuerta, el flujo supercrítico que precede al salto se aireará dando como resultado un salto hidráulico pre-aireado. Para estos casos la ecuación propuesta por Kalinske y Robertson no es aplicable.

Por su parte, el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (1964) recomienda la siguiente ecuación:

$$\beta = 0.03(F_1 - 1)^{1.06} \quad (3.6)$$

Dettmers (1953) propuso una solución al problema de la demanda de aire, con mediciones realizadas en la presa Lumiei – Italia, que tiene compuertas deslizantes en tres niveles. Este estudio condujo a la conclusión que, β depende principalmente de la forma de la cámara de compuertas y que es independiente de la carga hidráulica.

Wisner (1965) observó que la demanda de aire es función del número de Froude y de la relación entre el área transversal del venteo, A_a , y el área del conducto, A_t . Para valores de $A_a/A_t > 1/40$, β depende únicamente del número de Froude, y para $A_a/A_t < 1/50$, β es función de A_a/A_t únicamente. Para determinar en prototipo la demanda de aire se sugirieron las siguientes expresiones:

$$\beta = 0.014(F_1 - 1)^{1.4} \quad \text{para } F_1 > 8 \quad (3.7)$$

$$\beta = 0.04(F_1 - 1)^{0.85} \quad \text{para } F_1 < 8 \quad (3.8)$$

$$\beta = 0.033(F_1 - 1)^{1.40} \quad \text{para flujo spray} \quad (3.9)$$

$$\beta = 0.024(F_1 - 1)^{1.4} \quad \text{para flujo libre} \quad (3.10)$$

Estudios anteriores indican que la cantidad de aire introducido por el salto hacia los conductos cerrados depende de muchos factores, incluyendo el número de Froude (Kalinske y Robertson 1943), las condiciones del flujo y la localización del salto (Sharma 1976).

A continuación, se presentan las expresiones propuestas por Sharma (1976), por ser aplicables a todos los flujos agua-aire que ocurren en los túneles de fondo de las presas. Por coincidir con la fórmula de Kalinske y Robertson en los flujos con salto, Sharma adopta la misma fórmula (3.5).

$$\beta = 0.2 F_1 \quad \text{para flujo spray} \quad (3.11)$$

$$\beta = 0.09 F_1 \quad \text{para flujo en lámina libre} \quad (3.12)$$

La variación de la demanda de aire es función del porcentaje de apertura de la compuerta, de acuerdo con los ensayos del U.S Army (1970), presenta un primer máximo para aperturas del 5 al 10% (flujo spray), alcanzando otro máximo hacia el 80%. Por lo general este grado de apertura del 80% es el que produce el máximo absoluto, por lo que se suele adoptar para el dimensionamiento del venteo; no obstante, es conveniente realizar también el cálculo del caudal de aire para aperturas del 50%, incluso en los casos de desfogues en galerías con ensanchamiento brusco aguas debajo de las compuertas, es recomendable analizar la situación de apertura total.

Escarameia (2007) midió la entrada de aire en saltos hidráulicos en una tubería circular y comparó sus resultados con los de Kalinske y Robertson (1943), Wisner et al. (1975), Rajaratnam (1967) y Robben et al. (1983) indicando que existen diferencias significativas entre los diversos experimentos. Escarameia sugirió que tales diferencias pueden deberse a las características de los conductos utilizados en los estudios previos mientras que, sus estudios se llevaron a cabo en tuberías de sección circular de 150 mm de diámetro interior. Además, los estudios previos se refieren a que el salto hidráulico es seguido por un flujo a superficie libre mientras que en su experimento al salto hidráulico le sigue un flujo a tubo lleno. Con base en sus ensayos propuso la siguiente ecuación:

$$\beta = 0.0025 (F_1 - 1)^{1.8} \quad (3.13)$$

Mccorquodale y Khalifa (1983) y Carvalho et al. (2008) argumentaron que la mezcla del flujo agua-aire altamente variable en saltos hidráulicos tanto en el espacio como en el tiempo crea dificultades para las mediciones del flujo dentro de saltos que tengan un número de Froude mayor que 5.

Por su parte, Mortensen et al. (2011) estudiaron los efectos de escala en la entrada de aire en cuatro tuberías de diferentes diámetros. Las mediciones del flujo

de aire en saltos hidráulicos fueron realizadas bajo el mismo rango del número de Froude. Estos estudios resultan importantes porque las diferencias en el tamaño de los conductos son usualmente significativas entre el modelo y el prototipo. Los ensayos llevados a cabo por los investigadores indicaron que para los cuatro conductos estudiados el tamaño de la tubería tiene un pequeño efecto de escala en la demanda de aire. Basados en los registros obtenidos, propusieron la siguiente ecuación:

$$\beta = 2.340 F_1 - 5.248 \quad (3.14)$$

Es importante resaltar que frecuentemente las formulaciones propuestas por diferentes autores para el estudio de un mismo fenómeno no son coincidentes. En estas situaciones es recomendable analizar conjuntamente los resultados de las distintas fórmulas, teniendo en cuenta sus rangos de aplicación.

CAPÍTULO IV:
DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

4. CAPITULO IV. Desarrollo de la Investigación

Como se ha venido explicando en los capítulos anteriores, el fin de esta tesis es determinar los perfiles de concentración de aire, que ocurren aguas abajo de una compuerta de desfogue de fondo cuando ésta está parcialmente abierta. La forma de tales perfiles dependerá tanto del aire introducido por el salto hidráulico que se forma, como por el venteo instalado inmediatamente aguas abajo de la compuerta.

4.1 Introducción

El salto hidráulico es una transición rápida de flujo supercrítico a flujo subcrítico. Es una estructura de flujo en dos fases, se caracteriza por la formación de una superficie oscilante asociada con la entrada de aire, alta turbulencia y disipación de energía.

La determinación de los perfiles de concentración en un flujo agua-aire constituye un desafío interesante. Por lo tanto, existe la necesidad de explorar nuevas técnicas experimentales que nos permitan obtener una mejor comprensión de los fenómenos asociados con la dinámica de un flujo bifásico.

4.2 Técnicas para la medición de los perfiles de concentración de aire

A pesar de la extensa literatura referente a las características macroscópicas de un salto hidráulico, muchas características de su flujo interno permanecen sin respuesta (Carvalho et al. 2008, Mccorquodale y Khalifa 1983). Resch y Leutheusser (1972) reportaron satisfactoriamente medidas instantáneas de la velocidad del flujo usando técnicas con anemómetros de hilo caliente.

Los perfiles de concentración de aire son un parámetro importante en el flujo agua-aire. Se ha constituido en un desafío medir la fracción de volumen de las fases, debido a la naturaleza no simétrica del flujo bifásico, por ejemplo, las burbujas pueden juntarse, romperse o interactuar con la pared del conducto, lo cual hace al flujo extremadamente inestable.

El sensor capacitivo, un método inductivo y conductivo, trabaja a través de la medición de las propiedades eléctricas de diferentes fases con una resolución espacial aproximada del 5%. Este método es rápido, de bajo costo y adecuado para una instalación ya sea en experimentos a pequeña o gran escala (Reineeke et al. 1998).

Los perfiles de concentración de aire en flujos con burbujas fueron indagados por numerosos investigadores utilizando *sondas ópticas*. Incluso se

implementó un método con *fibra óptica* para determinar los perfiles de concentración de aire, así como la velocidad y el tamaño de cada burbuja (Cartellier 1990 y Serdula 1998). Este método es aplicable también para un fluido no conductivo. Sin embargo, no se recomendó el uso de sondas de fibra óptica para medir fracciones de aire muy pequeñas debido a los grandes errores que se observaron.

Una de las técnicas más recientes son los *sensores de flujo de microondas* (Everson y Foster-Miller, 2005). Sin embargo, la sonda no puede medir mezclas con un contenido de agua significativo.

Los patrones de flujo de una mezcla agua-aire concurrente en conductos horizontales redondos y rectangulares fueron determinados por Coleman y Garimella (1999) mediante análisis de *videos de alta velocidad* para desarrollar mapas de régimen de flujo y las transiciones entre estos regímenes de flujo.

La concentración de aire y los campos de velocidad han sido mayormente medidos a través de **métodos intrusivos** con el uso de sondas de conductividad de doble punta (Chanson y Brattberg 2000, Chanson 2007, Murzyn et al. 2005, Murzyn y Chanson 2008, Chanson y Felder 2010, Bung 2011a). Las primeras mediciones de este tipo fueron obtenidas por Rajaratnam (1962) usando sondas de resistencia eléctrica y Resch et al. (1974) usando anemómetros de hilo caliente con sondas cónicas para registrar la concentración y el tamaño de las burbujas en el salto hidráulico.

Trabajos recientes relacionados en estimar la concentración de aire basados en técnicas de visualización, **métodos no intrusivos**, fueron calibrados mediante un promedio global de mediciones efectuadas (Mossa y Tolve 1998, Kimmoun y Branger 2007) y, últimamente Leandro et al. (2012) calibró tal técnica para perfiles verticales de concentración de aire. Zadeh (1965) fue el primero en introducir la aplicación de la lógica difusa al procesamiento de imágenes.

Mossa y Tolve (1998) fueron los primeros en desarrollar y aplicar la hipótesis de que la fracción de volúmenes de concentración de aire en un flujo se podría obtener indirectamente mediante el análisis de la intensidad de los píxeles de las imágenes obtenidas. Realizaron pruebas y obtuvieron un promedio vertical de valores de concentración de aire a lo largo del salto hidráulico y compararon sus resultados con una ley empírica basada en los datos experimentales de Rajaratnam (1962).

En esta tesis, se propone una nueva técnica de visualización que obtiene los valores de los perfiles de concentración en una matriz vertical en 2D cubriendo así el área completa del salto hidráulico. La imagen al ser visualizada con los píxeles que la conforman se aprecia en forma de una matriz 2D (i,j), que a su vez dependerá de la resolución en píxeles de la cámara.

4.3 Algoritmo de tratamiento de imágenes – Perfiles de concentración de aire

El procesamiento de imágenes es una herramienta desarrollada para obtener la concentración de aire a partir de las fotografías, esta herramienta se basa en la hipótesis de que los perfiles de concentración pueden ser estimados a partir de la intensidad de píxeles de cada imagen.

El procesamiento consta de dos algoritmos implementados en Matlab con base en los propuestos por Leandro et al. (2012). El primero (EI) consiste en la edición de imágenes y el segundo (MIP) en un algoritmo de matriz de intensidad de píxeles. Los dos algoritmos deben ser aplicados a todas las imágenes. El primer algoritmo permite la calibración del procedimiento para el procesamiento de imágenes. El segundo algoritmo calcula la matriz de promedio de intensidad de píxeles necesaria para obtener los perfiles de concentración de aire.

Las fotografías fueron obtenidas con una cámara de alta velocidad, FASTEC IL4-100, para las diferentes aperturas de compuerta. Las imágenes muestran dos áreas distintas divididas por la superficie del agua: el área arriba de la superficie del agua donde los píxeles negros representan una concentración de aire del 100% y el área debajo de la superficie del agua donde los píxeles grises representan una concentración de aire menor que el 100%. Debido a la naturaleza inestable de la superficie del agua no es posible definir un límite claro entre estas dos áreas.

Además, dado que un pixel negro tiene una intensidad de pixel, $p_i = 0$, y un pixel blanco tiene $p_i = 255$, el algoritmo editor de imágenes (EI) tiene que distinguir entre un pixel negro arriba de la superficie del agua (100% de aire) y un pixel negro debajo de la superficie del agua (0% de aire). Cada imagen está definida por una matriz bi-dimensional de intensidad de píxeles, $PI_{i,j}$, con valores que van desde 0 a 255, (dimensión $m \times n$) y filas y columnas definidas por los índices i, j respectivamente (ver Figura 4.1).

4.3.1 Algoritmo Editor de Imágenes (EI)

El algoritmo EI permite editar la imagen original $PI_{i,j}$ para obtener la imagen final $PI_{i,j}^f$ dividida en tres diferentes áreas (ver Figura 4.1). Este algoritmo está definido por la siguiente ecuación:

$$PI_{i,j}^f = \begin{cases} I_{T3}(PI_{i,j}) \times PI_{i,j}^3 + I_{T2}(PI_{i,j}) \times PI_{i,j}^2 & i < \text{lim}S \\ I_{T3}(PI_{i,j}) \times I_{T1}(PI_{i,j}) \times PI_{i,j}^1 + I_{T1}(PI_{i,j}) \times I_{T2}(PI_{i,j}) \times PI_{i,j}^4 & \text{lim}S \leq i < \text{lim}St \\ I_{T1}(PI_{i,j}) \times PI_{i,j}^1 & i \geq \text{lim}St \end{cases} \quad (4.1)$$

La ecuación 4.1 es la función principal usada para editar la imagen sobre (ecuación superior) y debajo de la superficie del agua (ecuación inferior) así como

el área de transición (ecuación central). Aquí, $PI_{i,j}^n$ es la n -ésima edición de $PI_{i,j}$, I_{Tn} es la n -ésima función umbral usada para la edición de la calibración.

Una de las dificultades durante el procesamiento de imágenes fue ajustar la localización de la superficie del agua definida por un límite superior ($limS$) e inferior ($limSt$) ya que tratamos con una superficie oscilante de agua.

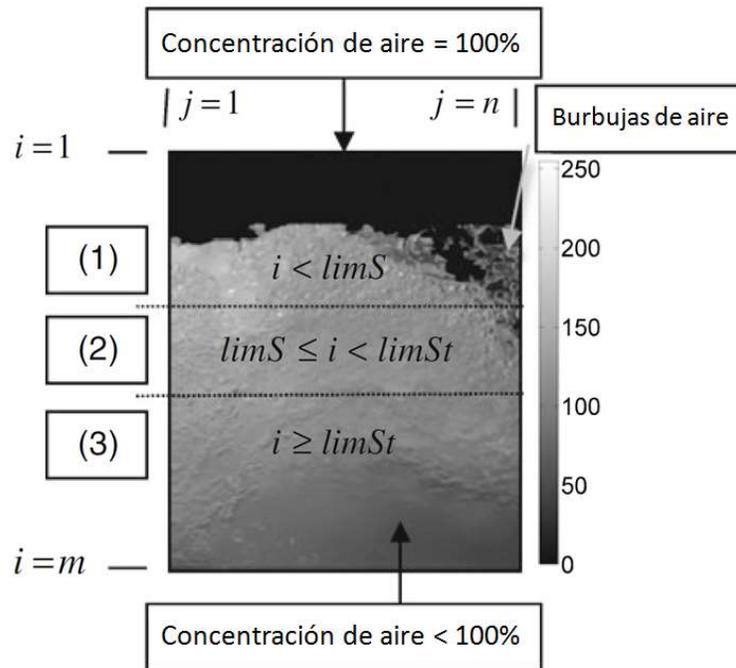


Figura 4.1. Definición de las tres áreas en escala de grises de la imagen (Modificada de Leandro et al. 2012)

Con los límites fijados, $limS$ y $limSt$, las tres áreas definidas en la Figura 4.1 claramente se pueden identificar como: (1) el área sobre la superficie del agua denominada $i < limS$, (2) el área de transición identificada como $limS \leq i < limSt$ y (3) el área debajo de la superficie del agua identificada como $i \geq limSt$.

A continuación, se explican las sub-funciones que tratan el área debajo de la superficie del agua (EI-paso 1), seguida por la sub-función definida para el área sobre la superficie del agua (EI-paso 2) y finalmente se presenta la sub-función para el área de transición (EI-paso 3).

EI-paso 1:

En la Figura 4.1, las áreas grises oscuras debajo de la superficie del agua deben tener una concentración de aire cercana a cero, mientras que las áreas más claras deben tener valores mayores que cero. El objetivo principal de la sub-función definida para el área debajo de la superficie del agua es oscurecer las áreas con

una baja intensidad de pixel manteniendo las áreas más claras sin variaciones. Esto se logra con la función *Smf* (*S-shaped membership function*) que se presenta en seguida:

$$Smf(x, [a, b]) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ 2 \left(\frac{x-a}{b-a} \right)^2 & a < x \leq \frac{a+b}{2} \\ 1 - 2 \left(\frac{x-b}{b-a} \right)^2 & \frac{a+b}{2} < x \leq b \\ 1 & x > b \end{cases} \quad (4.2)$$

En la ecuación 4.2, $(a+b)/2$ es llamado el punto de cruce, que significa que valores de x arriba del punto de cruce son mayores que 0.5 y valores por debajo de éste son menores que 0.5. $x = PI_{i,j}$ y el punto de cruce es igual al punto medio de la escala de grises. Así, los límites máximo y mínimo son: $a = 0$ y $b = 255$ respetivamente. La función *Smf* varía entre 0 y 1. Para obtener la primera imagen editada $PI_{i,j}^1$, se debe multiplicar la función *Smf* por la imagen original.

$$PI_{i,j}^1 = PI_{i,j} \times Smf(PI_{i,j}, [a, b]) \quad (4.3)$$

En virtud de que EI-paso 1 especifica límites de la función *Smf*, una función de segmentación-vía-umbral debe aplicarse a la imagen $PI_{i,j}^1$ con el fin de proporcionar un parámetro de calibración al algoritmo EI. La función umbral está definida por:

$$I_{T1}(x) = \begin{cases} 1 & x \geq Ptr \\ 0 & x < Ptr \end{cases} \quad (4.4)$$

Donde *Ptr* representa el valor del primer umbral. La ecuación 4.5 define la sub-función final usada para el área debajo de la superficie del agua.

$$PI_{i,j}^f = I_{T1}(PI_{i,j}) \times PI_{i,j}^1 \quad (\text{Oscurecer } PI_{i,j}) \quad (4.5)$$

EI-paso 2:

El área sobre la superficie del agua muestra en su parte superior un área negra con el 100% de concentración de aire, así como burbujas de aire pegadas a las paredes del conducto con una intensidad de píxeles muy bajas (pi cercana a 0). En este caso, el algoritmo EI necesita en primer lugar alterar la intensidad de píxeles del área superior negra para volverla blanca y, en segundo lugar, para eliminar las burbujas más oscuras que permanecen pegadas a la pared del conducto para evitar alguna imprecisión de la concentración de aire. Esto se logra aplicando una función lineal de lógica difusa en la cual los límites han sido adoptados por facilidad de implementación. Dicha función se define como *lmf* (*lower membership function*) y se presenta a continuación:

$$lmf(x, [a, b, y_1, y_2]) = \begin{cases} y_2 & x \leq a \\ \frac{y_2 - y_1}{a - b}x + \frac{y_1 a - y_2 b}{a - b} & a \leq x \leq b \\ y_1 & x \geq b \end{cases} \quad (4.6)$$

Aquí, y_2 es fijado como el valor máximo de la escala de grises, es decir 255 (completamente blanco) y y_1 se define como un valor fijo siempre mayor que la intensidad de píxeles de las burbujas de aire más oscuras. De este modo, la imagen editada puede obtenerse directamente con la siguiente ecuación:

$$PI_{i,j}^2 = lmf(PI_{i,j}, [Ptr, b, y_1, y_2]) \quad (4.7)$$

Para mantener una transición suave entre la imagen original y la imagen transformada obtenida en el EI-paso 1, $PI_{i,j}^1$, es necesaria una tercera transformación de imagen. La ecuación 4.8 define la tercera transformación. Así, a diferencia de la ecuación 4.7, la imagen es ahora transformada como una función de la coordenada vertical (i), fijando los valores de a y b como 1 y $limS$ respectivamente.

$$PI_{i,j}^3 = lmf(i, [1, limS, PI_{i,j}^1, PI_{i,j}]) \quad (4.8)$$

Finalmente, dos funciones de segmentación-vía-umbral son aplicadas a las imágenes resultantes con el fin de proporcionar un segundo parámetro de calibración al algoritmo EI. Las ecuaciones 4.9 y 4.10 definen las dos funciones de umbral adicionales:

$$I_{T2}(x) = \begin{cases} 1 & x \leq Ptr2 \\ 0 & x > Ptr2 \end{cases} \quad (4.9)$$

$$I_{T3}(x) = \begin{cases} 1 & x > Ptr2 \\ 0 & x \leq Ptr2 \end{cases} \quad (4.10)$$

Donde, $Ptr2$ representa el valor del segundo umbral. La ecuación 4.11 define la sub-función final usada para el área sobre la superficie del agua:

$$PI_{i,j}^f = \underbrace{I_{T3}(PI_{i,j}) \times PI_{i,j}^3}_{\text{Transición lineal}} + \underbrace{I_{T2}(PI_{i,j}) \times PI_{i,j}^2}_{\text{Iluminar } PI_{i,j}} \quad (4.11)$$

Transición lineal
 $PI_{i,j} - PI_{i,j}^1$

Iluminar $PI_{i,j}$

Para $i < limS$

El-paso 3:

El área de transición es necesaria para proporcionar una transición gradual entre las imágenes editadas sobre y debajo de la superficie del agua mientras se mantiene el propósito del El-paso 1, que es oscurecer las áreas con baja intensidad de píxeles manteniendo las áreas iluminadas sin cambiarlas. La ecuación 4.12 define la cuarta transformación de la imagen y la ecuación 4.13 define la sub-función utilizada para el área de transición:

$$PI_{i,j}^4 = lmf(i, [limS, limSt, PI_{i,j}^2, PI_{i,j}^1]) \tag{4.12}$$

$$PI_{i,j}^f = \underbrace{I_{T3}(PI_{i,j}) \times I_{T1}(PI_{i,j}) \times PI_{i,j}^1}_{\text{Oscurecer } PI_{i,j}} + \underbrace{I_{T1}(PI_{i,j}) \times I_{T2}(PI_{i,j}) \times PI_{i,j}^4}_{\text{Transición lineal } PI_{i,j}^1 - PI_{i,j}^2} \tag{4.13}$$

Oscurecer $PI_{i,j}$

Transición lineal
 $PI_{i,j}^1 - PI_{i,j}^2$

Para $limS \leq i \leq limSt$

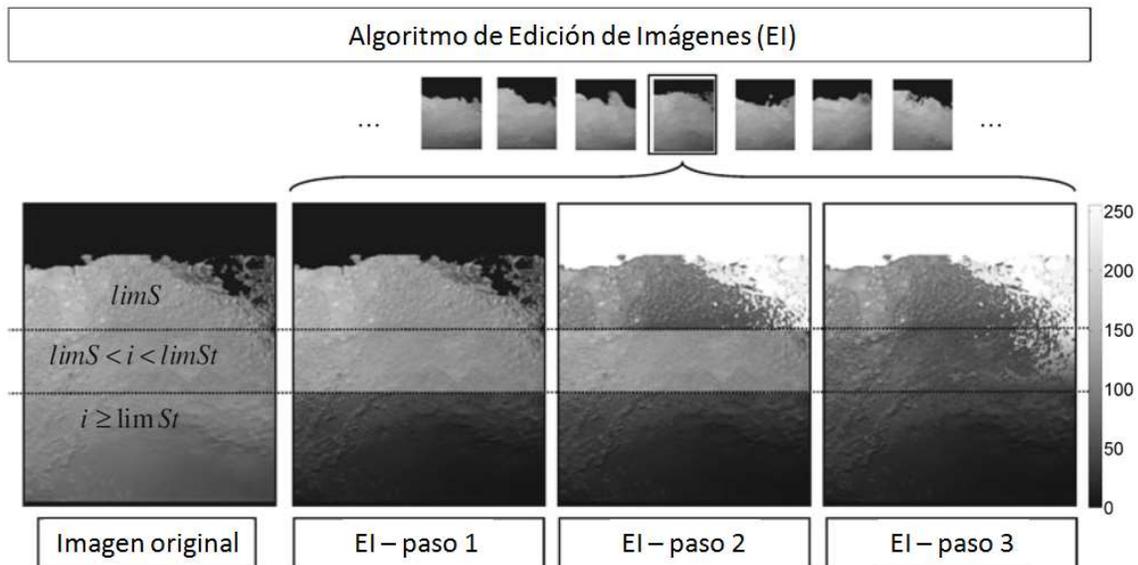


Figura 4.2. Definición de los tres pasos del algoritmo editor de imágenes (Modificada de Leandro et al. 2012)

4.3.2 Matriz de Intensidad de Píxeles (MIP)

El objetivo de la matriz de intensidad de pixel (MIP) es calcular el promedio de intensidad de píxeles a través del tiempo, utilizada para predecir la concentración de aire en cualquier punto dentro de la imagen $PI_{i,j}^f$. Para mayor simplicidad, de aquí en adelante estas imágenes serán referidas únicamente como PI. El algoritmo MIP está definido por tres pasos: MIP-paso 1 divide la imagen en matrices pequeñas, MIP-paso 2 calcula la matriz de intensidad promedio de píxeles

para cada imagen y MIP-paso 3 calcula la matriz de intensidad de píxeles promedio en el tiempo.

MIP-paso 1:

En este paso, la imagen transformada obtenida con el algoritmo previo, es decir, la matriz PIa ($m \times n$), se divide m/p veces en n/q matrices más pequeñas, donde p y q son números enteros y a su vez factores de m y n . Así, se forma una nueva matriz RPI compuesta por estas pequeñas matrices con dimensiones $(p \times q)_{(m/p \times n/q)}$, tal que $RPI(:, :)_{i,j}$ es la $(i,j)n$ sub-matriz de RPI.

MIP-paso 2:

De cada matriz $RPI(:, :)_{i,j}$, se obtiene un histograma de intensidad de pixel y la ocurrencia media (promedio) es guardada en una matriz de promedio AvPI. La matriz AvPI es una matriz de $(p \times q)$ tal que $AvPI(i,j)$ se calcula como el promedio de intensidad de píxeles de la $(i,j)n$ sub-matriz de RPI. Este procedimiento sigue muy de cerca el trabajo realizado por Mossa y Tolve (1998). Sin embargo, mientras que Mossa y Tolve promediaron la intensidad de pixel sobre un perfil vertical, con el algoritmo propuesto en esta tesis se puede obtener un promedio tanto en un perfil vertical como en uno horizontal.

MIP-paso 3:

Este último paso calcula la matriz promedio de tiempo AvPIt. Esta matriz es una matriz de $(p \times q)$ calculada como la matriz de intensidad de píxeles promedio en el tiempo de todas las matrices AvPI obtenidas en el paso anterior. Cada intensidad de píxel se representa en escala de grises, indicada a través de una barra de color a la derecha de la imagen, con valores numéricos que van de 0 a 255. De aquí, varios perfiles verticales de intensidad de píxeles pueden ser obtenidos a partir de cada columna de la matriz AvPIt.

En la Figura 4.3, se puede observar lo detallado en cada uno de los pasos MIP del 1 al 3.

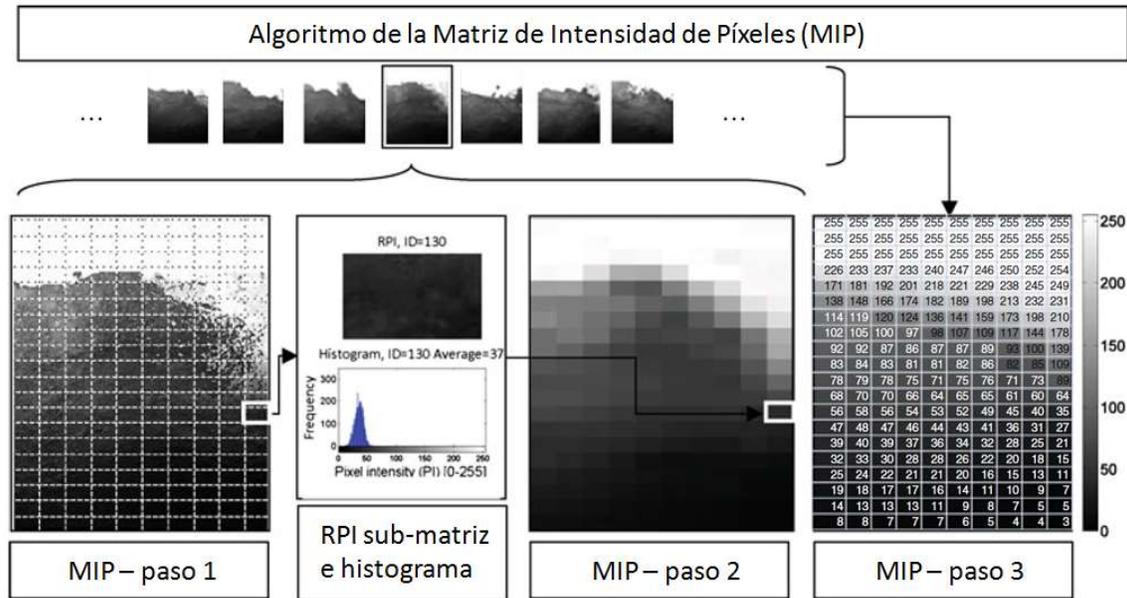


Figura 4.3. Definición de los tres pasos de algoritmo de la matriz de intensidad de píxeles (Modificada de Leandro et al. 2012)

La función Smf de la ecuación 4.5 es la responsable de oscurecer la imagen, mientras que la ecuación 4.7 elimina las burbujas que están pegadas en las paredes del conducto. Las ecuaciones 4.8 y 4.12 brindan una transición suave entre las áreas que están arriba y debajo de la superficie del agua. Como se indicó anteriormente, la localización de la superficie del agua no es un asunto sencillo, por lo tanto, dicha área de transición se establece variando los límites ($limSt$ y $limS$).

Es importante mencionar que los resultados de concentración obtenidos con el algoritmo antes mencionado, son comparados con los registros de concentración de aire adquiridos con una sonda de conductividad de doble punta (método intrusivo).

4.4 Dispositivo Experimental

Para estudiar los efectos específicos de la entrada de aire y las características del flujo agua-aire en un salto hidráulico que ocurre en un conducto cerrado, estudios en un dispositivo experimental fueron llevados a cabo en el Laboratorio de Hidráulica del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

La concentración de aire en el salto hidráulico fue medida en un mismo punto del conducto, cuyo diámetro interno es de 20.32 cm (8 in), para diferentes aperturas de compuertas que variaron desde el 10% hasta el 70%.

El dispositivo experimental cuyo esquema se presenta en la Figura 4.5, está dispuesto de la siguiente manera: consta de un tanque de carga constante desde el cual la bomba succiona agua para enviarla hacia la tubería, en primera instancia el agua es conducida a través de una tubería de PVC de 15.24 cm (6 in) de diámetro

y 11.27 m de longitud, al final de la cual se encuentra instalada una válvula de mariposa de 15.24 cm (6 in) de diámetro que sirve para regular el caudal. A continuación, se conecta una tubería flexible de 20.32 cm (8 in) de diámetro y 1.48 m de longitud, seguida por un tramo de tubería PVC de 20.32 cm (8 in) y $L = 0.83$ m, que se conecta nuevamente a una tubería flexible, $L = 0.25$ m, (que serviría para variar la pendiente del conducto). Al final de este tramo de tubo flexible se tiene una tubería de PVC ($D = 20.32$ cm y $L = 1.40$ m) en la cual, al final, se instalan las diferentes compuertas (elaboradas en acrílico según el porcentaje de apertura que se desee estudiar). Inmediatamente después de las compuertas se encuentra instalado el venteo (tubería PVC de $\phi = 2.54$ cm o 1 in). Para realizar el análisis tanto del contenido de aire, como de los perfiles de velocidad del flujo agua-aire a través de fotografías tomadas con una cámara de alta velocidad, la tubería que está a continuación de las compuertas es de PVC transparente de 20.32 cm (8 in) de diámetro interior, la cual en una longitud de 1.20 m está “rodeada” por una pecera construida en acrílico (dentro de ésta longitud, se trató de ubicar siempre al salto hidráulico). La función de la pecera es disminuir la reflexión de la luz y el efecto de curvatura de la tubería al momento de tomar las fotografías. Después de la pecera, continúa un tramo de tubería PVC transparente cuya longitud es 4.18 m hasta llegar a una válvula de mariposa de 20.32 cm de diámetro que también ayuda a controlar el gasto. Después de la válvula sigue un tramo de tubería PVC de $L = 0.40$ m que se conecta a un tramo de 1.48 m de tubería flexible que descarga libremente en el tanque de carga constante.

Para obtener los registros con la sonda de doble punta se hicieron dos perforaciones u orificios en la parte superior de la tubería PVC transparente, para así poder comparar los resultados obtenidos con la sonda y aquellos obtenidos a través de las fotografías. En la Figura 4.6 se indica la ubicación de dichas perforaciones.

Para poner en funcionamiento la bomba se cuenta con un variador de la velocidad de giro, a través del cual, y con la ayuda de las válvulas de mariposa antes mencionadas, se puede regular el caudal que circulará por la tubería. En la Figura 4.4 se aprecia una fotografía de éstos dispositivos.



Figura 4.4. Dispositivo variador de velocidad de giro de la bomba y válvula de mariposa de 20 cm (8 in)

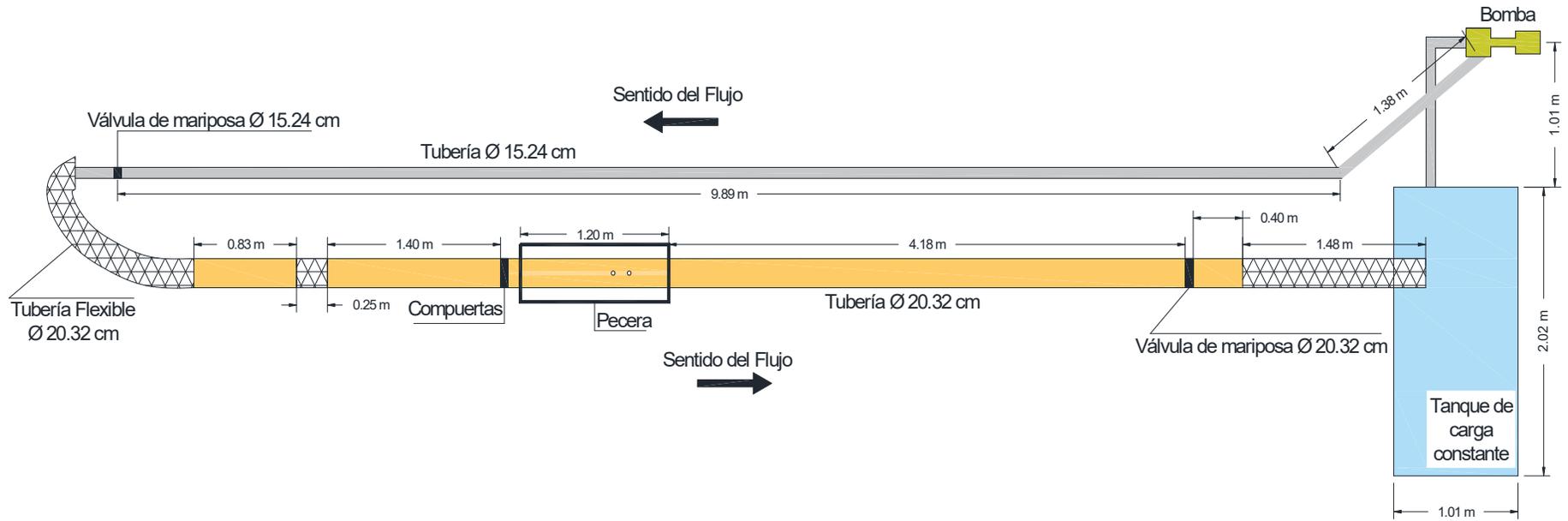


Figura 4.5. Esquema general del dispositivo experimental (vista en planta)

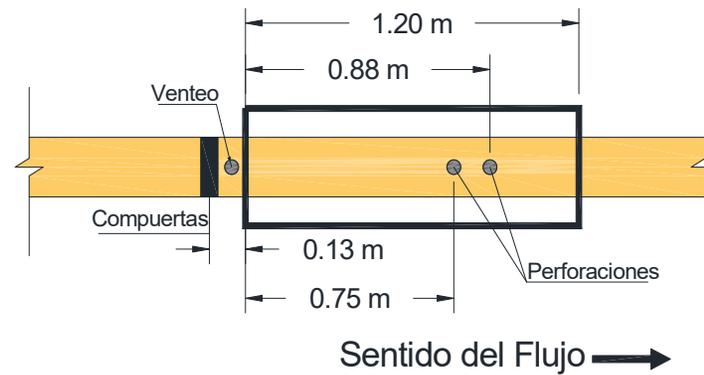


Figura 4.6. Ubicación del venteo y de las perforaciones para la sonda (vista en planta)

4.5 Registro y procesamiento de las mediciones

La obtención de la concentración de aire que se produce en un salto hidráulico aguas abajo de una compuerta de desfogue de fondo se realizó para diferentes aperturas de compuerta. Se intentó simular la apertura de una **válvula de compuerta** mediante compuertas construidas en acrílico (Figura 4.7), iniciando con una apertura del 10% y terminando con una apertura del 70%. Para cada uno de estos escenarios se registraron: la cantidad de aire que ingresa por el venteo, el caudal de agua que fluye por el sistema y la concentración de aire en el salto hidráulico.

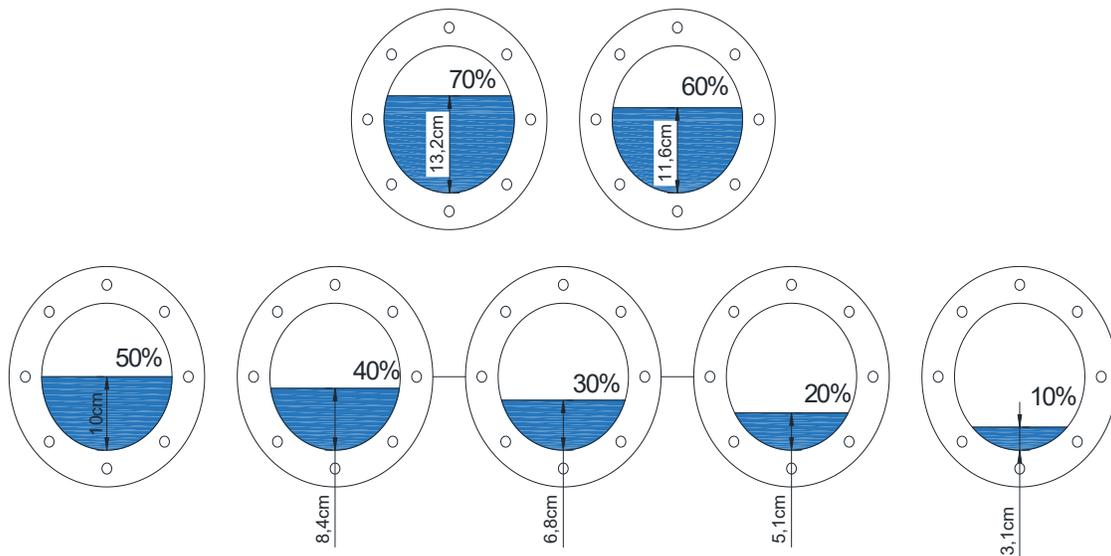


Figura 4.7. Esquema de apertura de compuertas

Los perfiles de concentración de aire y los perfiles de velocidad, se midieron en una misma línea vertical tanto con la sonda como con las fotografías, de hecho, con las fotografías se pueden obtener los perfiles de concentración en cualquier ubicación, sin embargo, y para efectos comparativos, que es el objeto de esta tesis, los perfiles se analizaron desde el fondo del tubo hasta la clave del mismo en las distancias X_1 y X_2 medidas desde la compuerta, tal como se indica en la Figura 4.8.

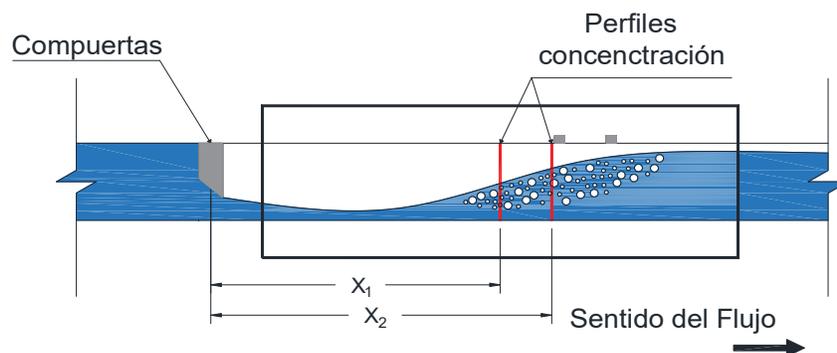


Figura 4.8. Ubicación de los perfiles de concentración de aire

El flujo de aire que ingresó a la tubería a través del venteo fue medido con un anemómetro (modelo Testo 435) que mide la velocidad del aire a través de la tubería de 2.54 cm (1 in) de diámetro, localizada inmediatamente aguas abajo de la compuerta. El caudal de agua fue medido utilizando un medidor ultrasónico de flujo (PrimeFlo-T) que se instaló en la tubería PVC de 15.24 cm (6 in) de diámetro.



Figura 4.9. Izq. Anemómetro Modelo Testo 435. Der. Medidor de flujo, PrimeFlo-T

Es importante mencionar, que para las siete compuertas el salto hidráulico nunca selló el conducto, es decir, la tubería trabajó parcialmente llena hasta la descarga (ver Figura 4.10). Para todo el rango de gastos ensayados, el salto hidráulico se forzó para que siempre ocurriera en el tramo de tubería que se ubica dentro de la pecera, esto se logró variando la apertura de la válvula de mariposa de 15.24 cm de diámetro, así como, ajustando la velocidad con el variador de la bomba. En la Figura 4.11 se observa con detalle el sitio donde se ubicaron los saltos hidráulicos y en donde se registraron las mediciones.



Figura 4.10. Tubería parcialmente llena hasta la descarga

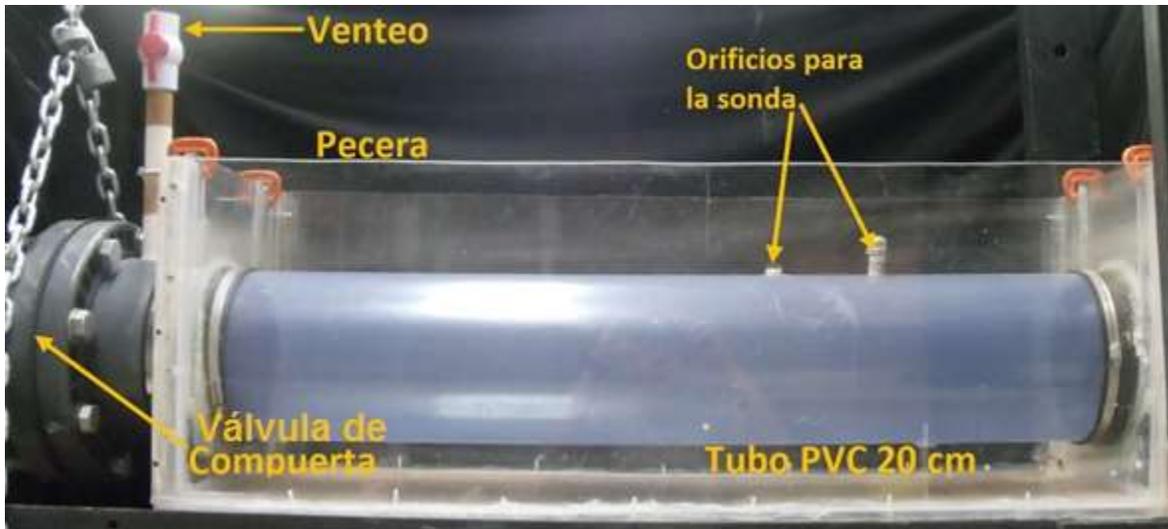


Figura 4.11. Detalle del sitio donde se ubicará el salto hidráulico

4.5.1 Mediciones con la cámara de alta velocidad (método no intrusivo)

Una cámara de alta velocidad modelo FASTEC IL4-100 (Figura 4.12) fue utilizada para tomar las fotografías en alta definición para cada apertura de compuerta. Las fotografías del salto hidráulico que se produce dentro de la tubería fueron tomadas con una frecuencia de 500 fps (fotogramas por segundo). La resolución de la cámara fue de 900 x 600 píxeles. En función de lo que se quiere examinar, el ancho del campo de visualización fue de alrededor de 40 cm. La cámara fue colocada a una distancia de 1.80 m, medida desde la pared derecha de la tubería. El espacio a ser filmado por la cámara se iluminó con una lámpara de luz halógena que tiene una potencia de 1000 W. Además, el espacio total de filmación se cerró de tal manera que ingrese la menor cantidad posible de luz natural. La cámara se mantuvo en modo manual de tal manera que se mantenga la misma luminosidad durante toda la captura de fotografías.



Figura 4.12. Cámara FASTEC Modelo IL4-100

El uso de luz artificial (lámpara) aseguró que la intensidad de la luz permanezca constante en todas las imágenes, independientemente de la hora del día en la que cada medición tuvo lugar.



Figura 4.13. Configuración del espacio y toma de fotografías con la cámara FASTEC

Parte de las fotografías obtenidas con la cámara de alta velocidad se muestran en la Figura 4.14.

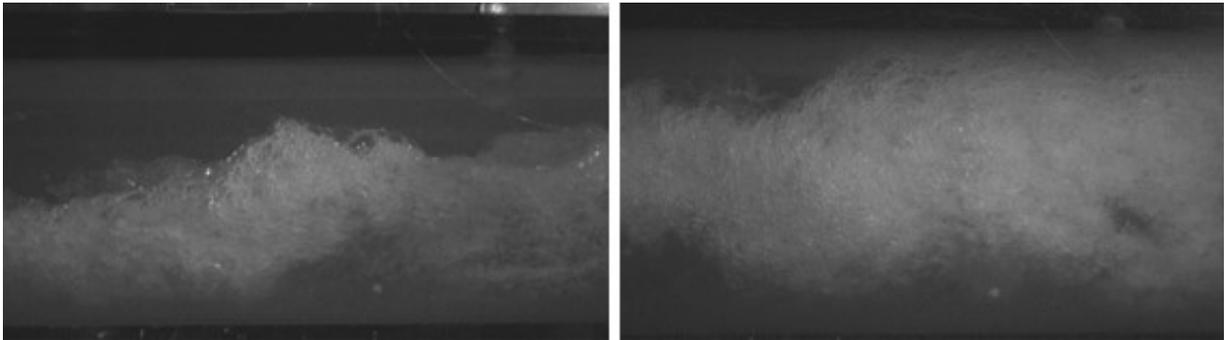


Figura 4.14. Salto Hidráulico, compuertas del 10% y 40%

4.5.2 Registros con la sonda de conductividad de doble punta (método intrusivo)

La concentración de aire en el flujo agua-aire generado en el salto hidráulico es medida con una sonda de doble punta que registra la conductividad del agua y del aire. La sonda se introduce en la tubería a través de los puntos indicados en las figuras 4.6 y 4.11 (perforaciones), para así alcanzar el sitio (figura 4.8) en el cual nos interesa obtener los perfiles de concentración de aire y de la velocidad del flujo. Se tomaron datos en sentido vertical desde la altura $h=0$ cm (fondo de la tubería) hasta la altura $h=19$ cm (clave de la tubería) para cada apertura de compuerta. Es importante mencionar que, tal como se indica en Leandro et al. (2012), la sonda no puede colocarse cerca de las paredes de la tubería para evitar errores durante la medición, debido a las salpicaduras de agua en las paredes (Kucukali y Chanson 2008) y a una posible mejora de la interfaz agua-aire con los efectos de pared.

La sonda - construida en el Instituto de Ingeniería de la UNAM - está conformada por dos puntas de aguja, las cuales están dispuestas una al lado de la otra y se colocan en sentido opuesto a la dirección del flujo, pero alineadas con éste

con el fin de obtener resultados confiables. Independientemente del medio que la rodea, agua, aire o la mezcla de los dos, las puntas registran niveles de voltaje los cuales son digitalizados mediante una tarjeta de adquisición de datos, de tal manera que, los resultados que se obtienen (y que se asemejan a una señal de diente de sierra), sean apropiados.



Figura 4.15. Sonda de conductividad de doble punta y su ubicación en el dispositivo

Los datos para cada altura (de 0 cm a 19 cm) son tomados a una frecuencia de 10000 Hz durante un tiempo no menor a 20 segundos. Un ejemplo del espectro de frecuencias que registra el aparato se puede observar en la Figura 4.16, en ésta existen dos señales una blanca y una roja que corresponden a cada una de las puntas de la sonda.

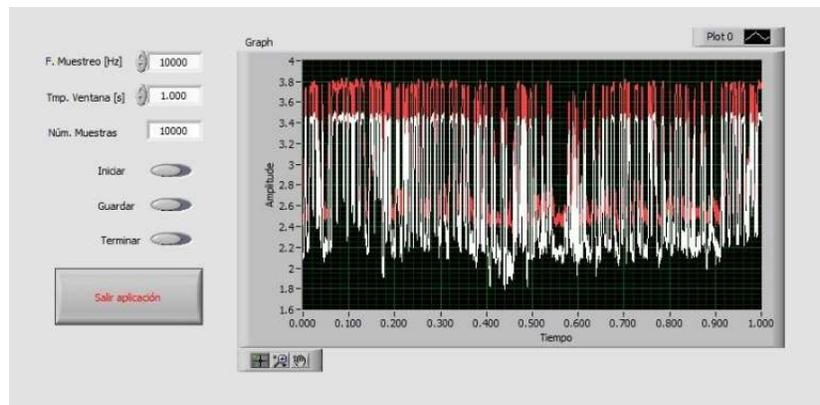


Figura 4.16. Espectro de frecuencias registrados por la sonda

4.5.3 Procesamiento de los datos obtenidos con la cámara de alta velocidad

Para cada escenario (diferentes aperturas de compuertas) se registraron 1000 fotografías en escala de grises, que por defecto se guardan en formato imagen (.tif), esta cantidad de fotografías se consideró suficiente para caracterizar el promedio de valores presentados en los perfiles de concentración de aire y de velocidad. El total de fotografías de cada escenario es analizado por el *algoritmo de tratamiento de imágenes* para el cálculo del porcentaje de concentración de aire en

función de la intensidad de los píxeles (sección 4.3) y por el programa *PIVLab*, para obtención de los perfiles de velocidad.

4.5.4 Procesamiento de los datos obtenidos con la sonda

Los datos del espectro de frecuencia, para cada una de las diferentes aperturas de compuerta y alturas, registrados por la sonda, son guardados en un archivo de texto (.txt). Los datos guardados se procesan utilizando un código escrito en MATLAB, que a su vez hace uso de la herramienta SIMULINK de dicho programa.

SIMULINK es una aplicación que permite construir y simular modelos de sistemas físicos y sistemas de control mediante diagramas de bloques. El comportamiento de dichos sistemas se define mediante funciones de transferencia, operaciones matemáticas, elementos de Matlab y señales pre-definidas de todo tipo. *Simulink* dispone de una serie de utilidades que facilitan la visualización, análisis y guardado de los resultados de simulación. Además, se emplea profusamente en ingeniería de control.

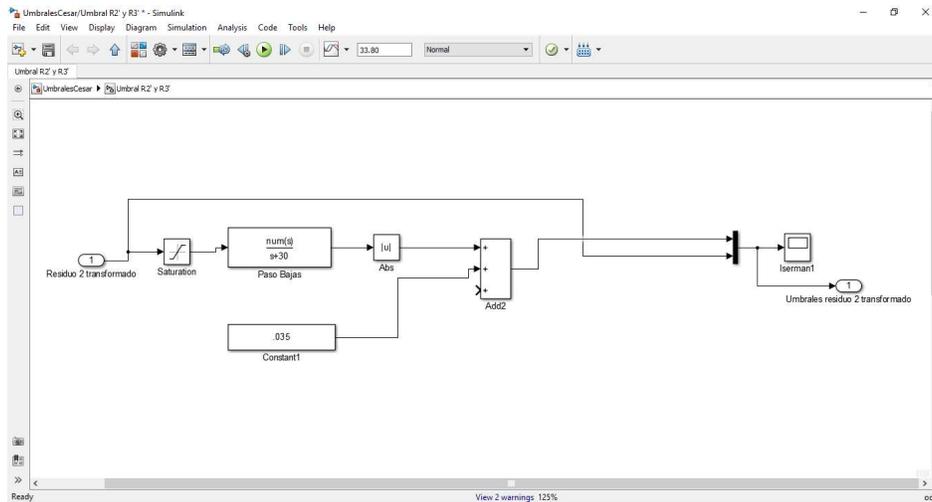


Figura 4.17. Diagrama de bloque de Simulink

Esta herramienta lo que hace básicamente es transformar el valor de voltaje registrado por la sonda, en uno correspondiente a contenido de aire en porcentaje, para lo cual, se deben fijar un umbral inferior y un umbral superior.

Ahora bien, aquellos valores que estén por debajo del umbral inferior y del umbral superior corresponderán a lecturas de agua y los que estén por arriba de dichos umbrales serán lecturas de aire. Es importante tener en cuenta la particularidad de que el agua contiene un 2% de aire disuelto. Los umbrales inferior y superior se *calibran* para cada escenario en función de la visualización física durante el experimento, es decir, se conoce físicamente cuales lecturas corresponden a mayor contenido de agua y cuales a mayor contenido de aire. En las figuras 4.18, 4.19 y 4.20 se aprecia lo antes indicado:

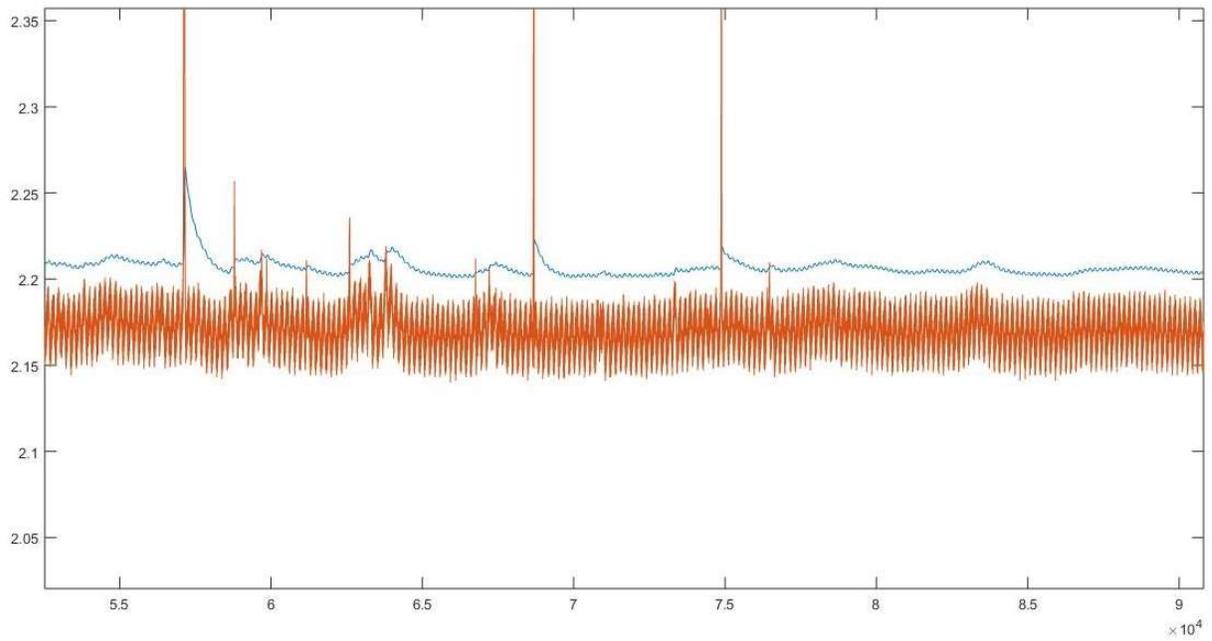


Figura 4.18. Línea Azul - Umbral Inferior (Mayor contenido de agua)

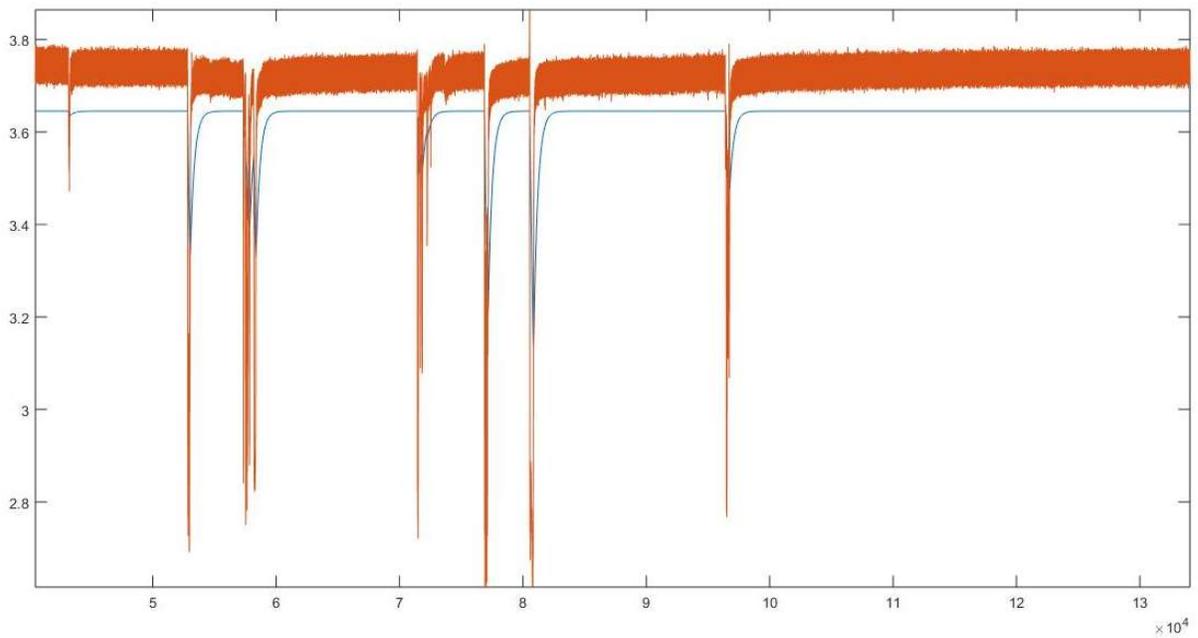


Figura 4.19. Línea Azul – Umbral Superior (Mayor contenido de aire)

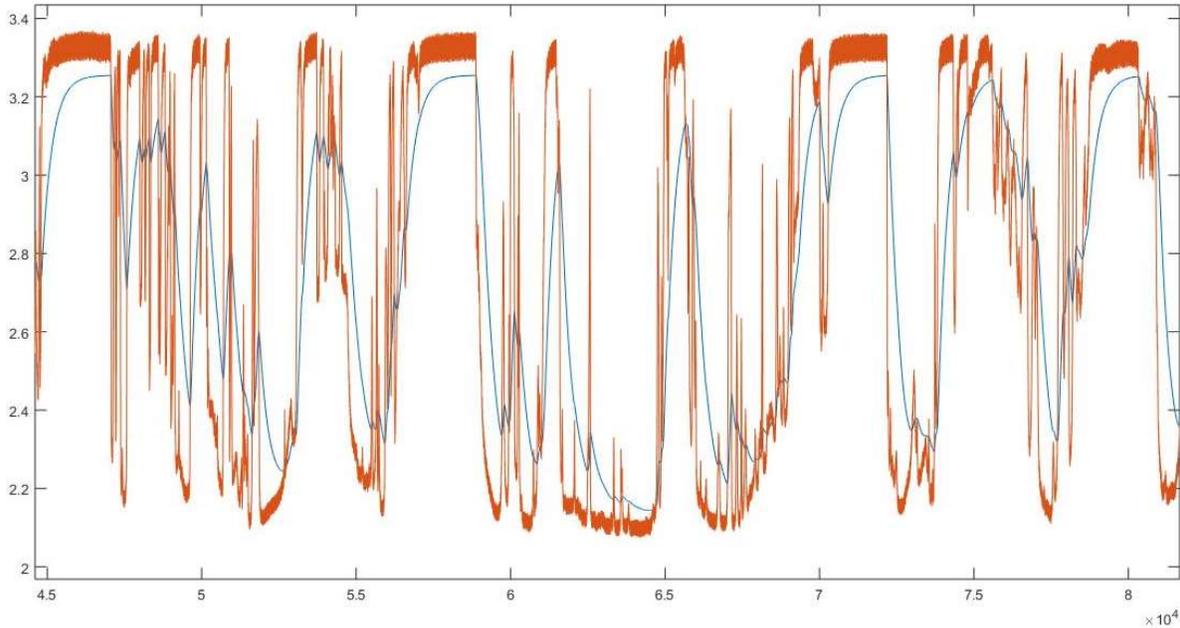


Figura 4.20. Umbrales Superior e Inferior (Similar contenido de aire y agua)

En los resultados obtenidos con los algoritmos (EI y MIP), la concentración de aire está indicada en función de la intensidad de píxeles, cuyos valores también pueden expresarse en forma de porcentaje de concentración considerando que, 255 px equivale a 100% de concentración de aire, tal como se indicó en el capítulo anterior. Con estos valores se calculó el *coeficiente de correlación 'r'* y el *coeficiente de determinación 'R²'*, existentes entre los valores obtenidos de la sonda y aquellos obtenidos con las fotografías.

4.5.4.1 Coeficiente de Correlación, *r*

El coeficiente de correlación indica que hay una tendencia de una variable a seguir a la otra, aunque las fluctuaciones provocadas por otros factores impidan la observación de una correspondencia única, uno a uno. El estudio matemático de tal correlación se llama “análisis de regresión”, que proporciona una medida numérica del grado de correlación entre las dos variables, y podemos evaluar, para un conjunto particular de observaciones, un “coeficiente de correlación”. El valor de esta cantidad dependerá del grado de dispersión de las observaciones, y varía desde 1, si todas las observaciones coinciden exactamente sobre una línea recta, a 0, si no existe relación alguna entre las variables.

Encontramos el concepto de correlación en dos casos significativos: a) si de dos variables medidas, una puede considerarse como causa de la otra, pero el efecto está prácticamente encubierto por las fluctuaciones al azar, y b) si dos variables pueden considerarse como consecuencia simultánea de una causa común cuyo efecto, como antes, está parcialmente oculto por fluctuaciones al azar. En cualquier caso, podríamos afirmar que puede observarse un cierto grado de correlación entre una variable y la otra.

La expresión para calcular el coeficiente de correlación 'r' es:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (4.14)$$

Donde:

X_i, Y_i son las variables medidas, con la sonda en porcentaje y con los algoritmos en píxeles respectivamente.

\bar{X}, \bar{Y} representan la media de las mediciones realizadas para cada grupo.

4.5.4.2 Coeficiente de determinación, R^2

El coeficiente de determinación, R^2 , se utiliza para analizar cómo las diferencias en una variable pueden ser explicadas por una diferencia en una segunda variable. Si R^2 es cercano a uno entonces las mediciones utilizando fotografías reflejan un resultado válido o verdadero, por el contrario, si R^2 es bajo, las mediciones utilizando fotografías no reflejan un resultado verdadero o sólo lo refleja libremente una "nube de puntos" que esperemos esté orientada en la dirección correcta. R^2 es simplemente el cuadrado del coeficiente de correlación:

$$R^2 = r^2 \quad (4.15)$$

4.6 Programa PIVLab – Perfiles de velocidad

En la actualidad hay pocas formas de medición que permitan estimar las velocidades en flujos turbulentos, esto se debe a la gran cantidad de aire en el flujo, lo que provoca errores en la medición. Es sabido, que la presencia de burbujas en el flujo afecta a técnicas no intrusivas como son: el uso de equipos Anemómetros Láser Doppler (LDA o LDV) o la técnica de Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV por sus siglas en inglés) (Petti y Longo, 2001).

En esta tesis se utiliza un método no intrusivo de medición de velocidad conocido como BIV (Bubble Image Velocimetry). La técnica BIV es similar a PIV excepto que en el primero se correlaciona directamente las imágenes de burbujas y no requiere de una lámina de luz láser para la iluminación (Ryu et al., 2005). Debido a que la zona de estudio contiene una alta densidad de turbulencia causada por la presencia de un salto hidráulico, es conveniente la aplicación de una técnica como el BIV para la obtención de los perfiles de velocidades.

Para realizar el análisis con la técnica BIV se utilizó un software de acceso libre llamado PIVLab, de código abierto programado en Matlab, que no sólo calcula la distribución de velocidad dentro de los pares de imágenes, sino que también se

puede utilizar para derivar, mostrar y exportar múltiples parámetros del patrón de flujo. Una interfaz gráfica de usuario (GUI) para análisis en Matlab, hace que el procesamiento y el post-procesamiento de datos sean rápidos y eficientes.



Figura 4.21. Pantalla de entrada del programa PIVLab

Digital Particle Image Velocimetry (DPIV) es una técnica de análisis no intrusiva muy popular para mapear flujos cuantitativa y cualitativamente. El movimiento de un fluido (líquido o gaseoso) se visualiza iluminando una fina lámina de fluido que contiene partículas trazadoras reflectantes y neutralmente flotantes. Un sensor de imagen digital se coloca paralelo a la lámina iluminada, capturando el movimiento de las partículas. En la mayoría de los análisis DPIV, dos imágenes (A y B) en el plano iluminado se capturan en los tiempos t_0 y $t_0 + \Delta t$.

En DPIV, el desplazamiento de partículas se calcula para grupos de partículas mediante la evaluación de la correlación cruzada de muchas sub-imágenes pequeñas. Un análisis DPIV típicamente consiste de tres pasos principales: pre-procesamiento de imagen, evaluación de la imagen y post-procesamiento, ver Figura 4.22.

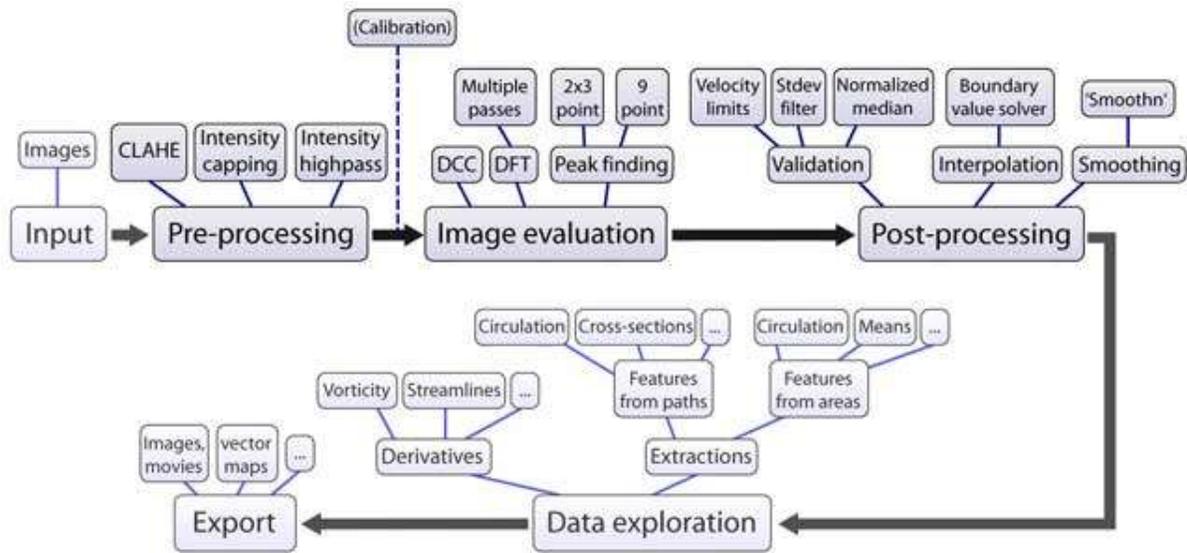


Figura 4.22. Pasos para análisis en PIVLab (Thielicke and Stamhuis, 2014)

Una vez corrido el programa para cada escenario y con todos los parámetros debidamente calibrados para cada uno de ellos, se obtendrán los perfiles verticales de velocidad en el mismo sitio donde se vayan a calcular los perfiles de concentración de aire. Cabe señalar que tales perfiles se pueden obtener en cualquier lugar dentro de la imagen analizada.

CAPÍTULO V:
RESULTADOS

5. CAPITULO V. Resultados

Los escenarios para los cuales se llevaron a cabo las mediciones tanto para análisis con la sonda como con la cámara de alta velocidad, se resumen en la tabla 5.1. Las mediciones fueron realizadas en los puntos P1 y P2 que se ubican a una distancia $X_1 = 0.73$ m y $X_2 = 0.86$ m respectivamente, medidas desde la válvula de compuerta.

Escenario	Apertura Compuerta	ω_{BOMBA} (Hz)	Q_{agua} (l/s)	V_{agua} (m/s)	h_1 (m)	F_1	V_{aire} (m/s)	Q_{aire} (l/s)
1 P1	10%	22.5	5.99	1.638	0.0345	2.815	2.869	1.448
2.1 P1	20%	23.5	11.24	2.836	0.0365	4.737	2.644	1.350
2.2 P1		24	11.49	2.163	0.0448	3.262	2.598	1.317
3.1 P1	30%	24.5	18.06	3.180	0.0470	4.684	2.777	1.415
3.2 P1		24.1	17.96	3.291	0.0457	4.915	3.242	1.646
4 P1	40%	24.1	30.34	3.558	0.0628	4.534	5.484	2.765
5 (P1 y P2)	50%	29	31.33	3.358	0.0670	4.141	3.053	1.547
6 P1	60%	28	39.00	2.835	0.0895	3.026	3.779	1.909
7 P1	70%	33	49.44	2.777	0.1094	2.680	3.975	2.008

Tabla 5.1. Escenarios para la toma de datos

Es importante mencionar que el porcentaje de apertura de las compuertas se refiere al porcentaje del área por donde pasa el agua y no a una altura de apertura en sentido vertical. Además, se recalca que se trabajó únicamente hasta un porcentaje de apertura del 70%, porque en el dispositivo experimental, para aperturas mayores ya no se pudo estabilizar el salto en el tramo de tubería que se ubica dentro de la pecera. Los ensayos fueron llevados a cabo para todos los escenarios indicados, es decir, para diferentes caudales y aperturas de compuerta.

El número de Froude, F_1 , se determinó a partir del tirante h_1 y la velocidad en el punto donde inicia el salto hidráulico. Debido a la dificultad para obtener con precisión el tirante dentro de la tubería, el perímetro mojado al inicio del salto fue medido para, a partir de éste, calcular dicho tirante (h_1).

Una vez que el salto hidráulico se estabilizó en la posición deseada, la entrada de aire a través del venteo se cuantificó mediante la medida de la velocidad de ingreso de aire para luego calcular el caudal de aire, Q_{aire} , que ingresó por tal venteo. Asimismo, se registró el caudal de agua, Q_{agua} , que circuló por el sistema.

5.1 Resultados obtenidos con la sonda y con la cámara de alta velocidad

5.1.1 Análisis de los perfiles de concentración de aire

Con el salto estabilizado se procedió a registrar los datos con la sonda y a tomar fotografías con la cámara. Las fotografías se analizaron para obtener los perfiles de concentración de aire (Algoritmos EI y MIP) y los perfiles de velocidad (PIVLab). Una vez que se han procesado los datos, con los más adecuados parámetros de calibración de la sonda (*simulink*) y de la cámara (*algoritmos*), se calcula la concentración de aire para cada escenario. En la tabla 5.2, las letras CAA y CAN identifican a cada una de las terminales de la sonda nombradas como: canal azul y canal naranja respectivamente.

Escenario	Apertura Compuerta	Límite Superior		Límite Inferior	
		CAA	CAN	CAA	CAN
1 P1	10%	3.59	3.36	2.1	2.1
2.1 P1	20%	3.45	3.22	2	2.1
2.2 P1		3.36	3.16	2.1	2.2
3.1 P1	30%	3.28	3	2	2.1
3.2 P1		3.21	2.95	2	2.1
4 P1	40%	3.09	2.89	2	2.1
5 P1	50%	2.78	2.7	1.98	2.08
5 P2		2.78	2.7	1.98	2.08
6 P1	60%	1.57	1.54	0.98	0.95
7 P1	70%	1.82	1.72	0.98	0.95

Tabla 5.2. Parámetros de calibración de la sonda (límites superior e inferior)

Por otra parte, la tabla 5.3 muestra los parámetros de calibración utilizados en el algoritmo editor de imágenes para cada escenario estudiado.

Escenario	Apertura Compuerta	EI1 - Función <i>S_{mf}</i>		Ptr	EI2 – Función <i>Imf</i>					EI3 – Función <i>Imf</i>
		<i>a</i>	<i>b</i>		<i>b</i>	<i>y₁</i>	<i>y₂</i>	<i>LimS</i>	<i>Ptr2</i>	<i>LimSt</i>
1 P1	10%	0	255	10	180	180	255	160	140	300
2.1 P1	20%	0	255	10	180	180	255	90	110	160
2.2 P1		0	255	10	205	205	255	180	120	270
3.1 P1	30%	0	255	10	180	180	255	152	105	230
3.2 P1		0	255	10	180	180	255	150	140	200
4 P1	40%	0	255	10	180	180	255	160	145	320
5 P1	50%	0	255	10	180	180	255	80	160	200
5 P2		0	255	10	180	180	255	80	155	175
6 P1	60%	0	255	10	180	180	255	20	120	280
7 P1	70%	0	255	10	180	180	255	20	90	280

Tabla 5.3. Parámetros de calibración del algoritmo para tratamiento de imágenes

El algoritmo para tratamiento de imágenes fue calibrado seleccionando previamente un perfil vertical (X_1 o X_2), en este caso se seleccionó, para cada escenario, aquel que coincidiera en ubicación con el perfil obtenido con la sonda. Al igual que con la sonda, los *parámetros* a , b , Ptr , y_1 , y_2 , $LimS$, $Ptr2$ y $LimSt$ se *calibraron*, en función de la visualización física durante el experimento, es decir, se conocía físicamente cuales lecturas corresponden a mayor contenido de agua y cuales a mayor contenido de aire. Todos los parámetros, especialmente $LimS$ y $LimSt$, se fijaron tomando en cuenta las 1000 fotografías capturadas, puesto que, al tratarse de un fenómeno altamente turbulento, la ubicación de tales límites era diferente en cada fotografía y lo que se buscó, al calibrar usando todas las fotografías, fue un valor representativo de las diferentes posiciones que toman la superficie del agua y la zona de transición, para esto se realizaron varias corridas en el programa. Los valores indicados en la tabla 5.3 corresponden a los parámetros óptimos de calibración alcanzados.

En las figuras 5.1 a 5.10, se muestran los resultados alcanzados para todos los escenarios. Los valores numéricos de cada una de las gráficas se pueden ver con detalle en el anexo A.

En las figuras 5.1 a 5.10, se aprecian los perfiles de concentración de aire expresados en porcentaje y en intensidad de píxeles, en términos generales, los coeficientes de correlación obtenidos muestran una buena concordancia entre los valores obtenidos a través de las fotografías con aquellos resultantes de la sonda de conductividad. En la tabla 5.4 se presenta un resumen de los coeficientes de correlación y de determinación obtenidos para cada escenario.

Escenario	Apertura de compuerta	Caudal agua (l/s)	Coefficiente correlación r	Coefficiente determinación R^2
1 P1	10%	5.99	0.9909	0.9818
2.1 P1	20%	11.24	0.9811	0.9625
2.2 P1		11.49	0.9914	0.9828
3.1 P1	30%	18.06	0.9904	0.9809
3.2 P1		17.96	0.9860	0.9721
4 P1	40%	30.34	0.9904	0.9809
5 P1	50%	31.33	0.9763	0.9531
5 P2		31.33	0.9877	0.9755
6 P1	60%	39.00	0.9892	0.9786
7 P1	70%	49.44	0.9697	0.9404

Tabla 5.4. Coeficientes de correlación y de determinación obtenidos para cada escenario

En la figura 5.1 se aprecian los perfiles verticales de concentración de aire tanto en porcentaje como en intensidad de píxeles graficados desde una altura $h = 0$ cm hasta una altura $h = 16$ cm, para el escenario 1P1. Los resultados graficados muestran una excelente aproximación entre los obtenidos con la sonda y los obtenidos con las fotografías.

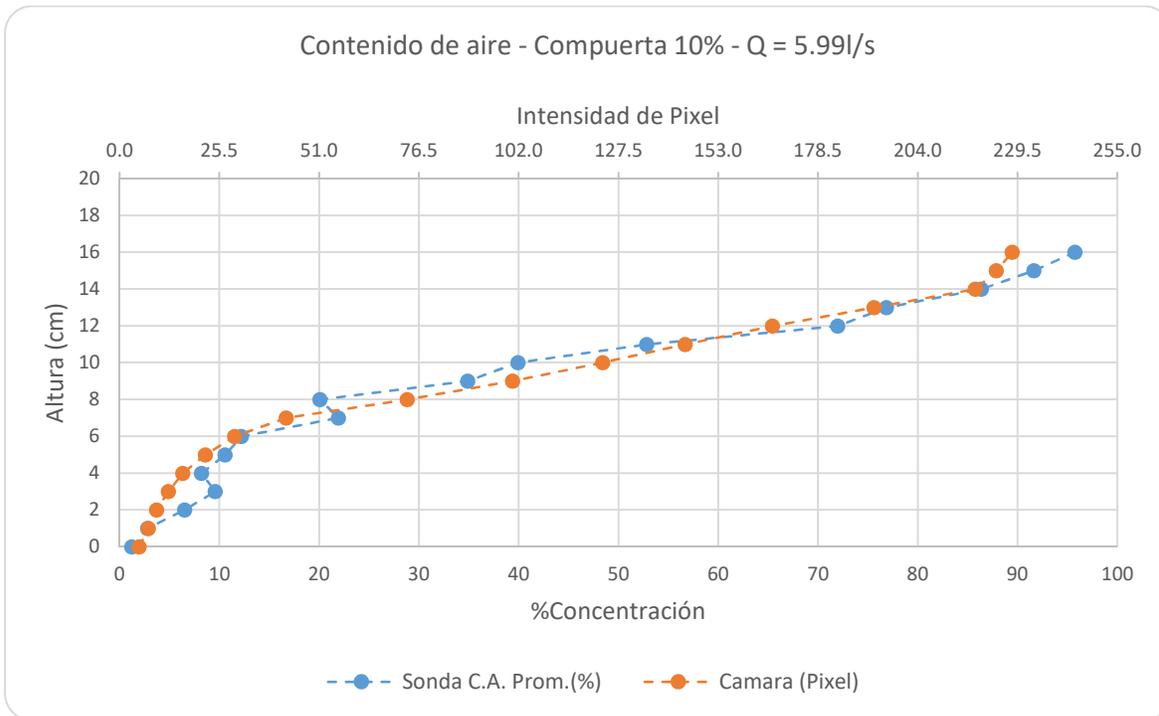


Figura 5.1. Perfiles de concentración de aire (con sonda y cámara) – Compuerta 10% (1P1)

En los escenarios 2.1P1 (figura 5.2) y 2.2P1 (figura 5.3), a pesar de que el gasto de agua no difiere considerablemente uno de otro, los perfiles de concentración de aire si son diferentes en cuanto a su forma. Esto se puede deber a que el fenómeno es altamente turbulento y caótico. En el primer caso, la interfaz agua-aire generada por el salto hidráulico casi ocupó la totalidad de la tubería, mientras que, en el otro caso, luego del salto el flujo fue a superficie libre. Lo que hay que recalcar es que, para los parámetros de calibración seleccionados, existe una mejor correlación para el escenario 2.2P1.

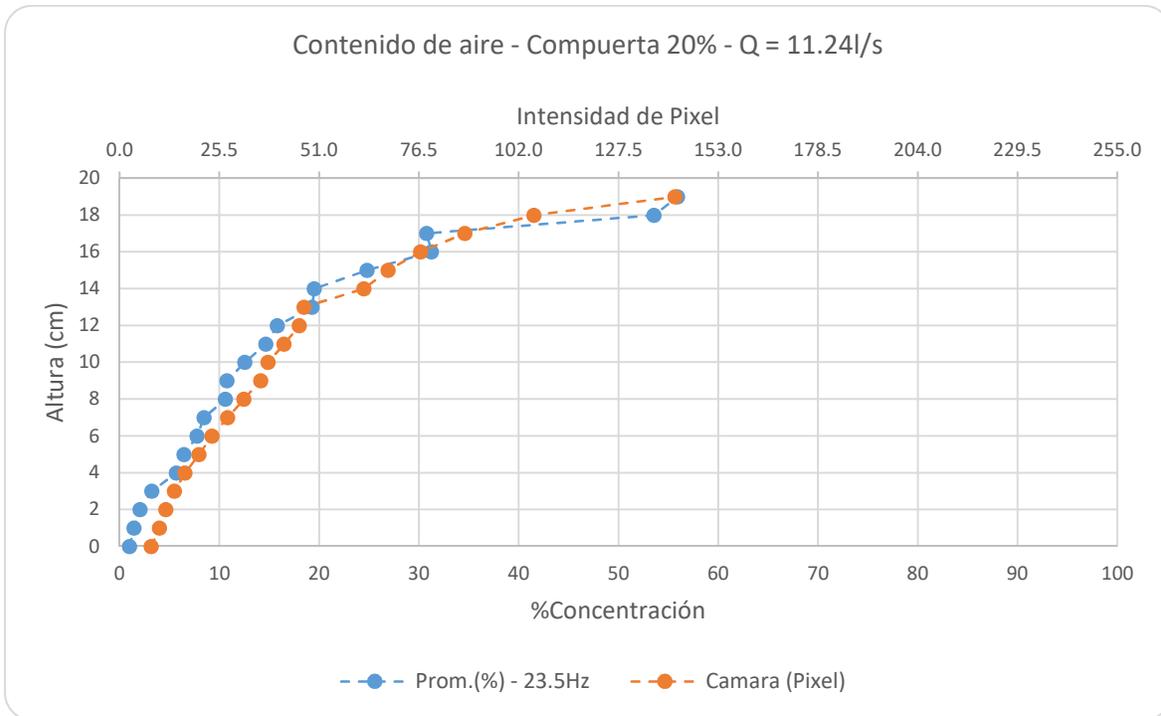


Figura 5.2. Perfiles de concentración de aire (con sonda y cámara) – Compuerta 20% (2.1P1)

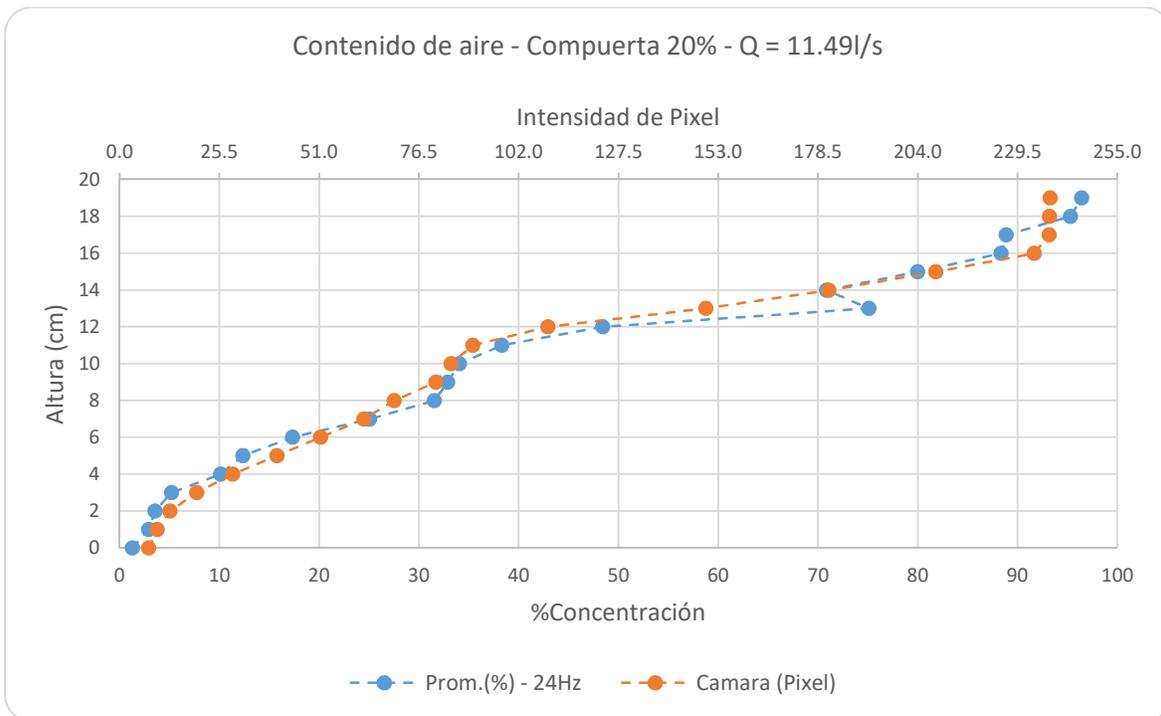


Figura 5.3. Perfiles de concentración de aire (con sonda y cámara) – Compuerta 20% (2.2P1)

En los escenarios 3.1P1 y 3.2P1 presentados en las figuras 5.4 y 5.5 respectivamente, los perfiles de concentración de aire son bastante similares en los dos casos, existiendo una mejor correlación para el escenario 3.1P1.

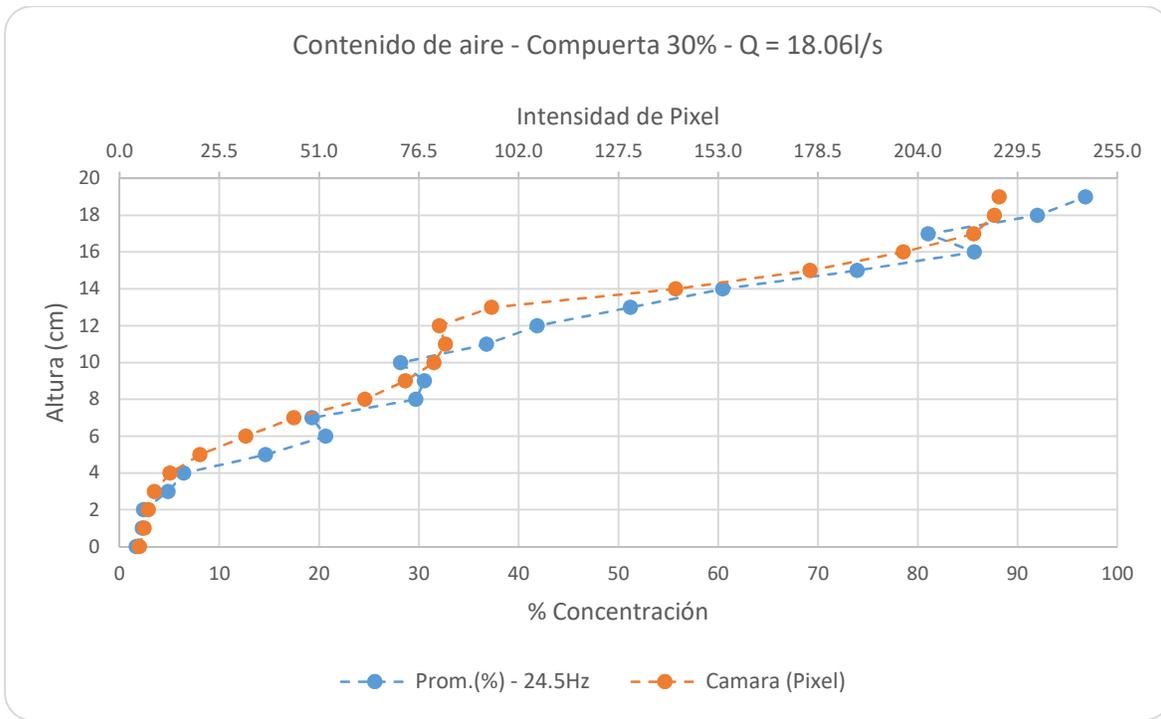


Figura 5.4. Perfiles de concentración de aire (con sonda y cámara) – Compuerta 30% (3.1P1)

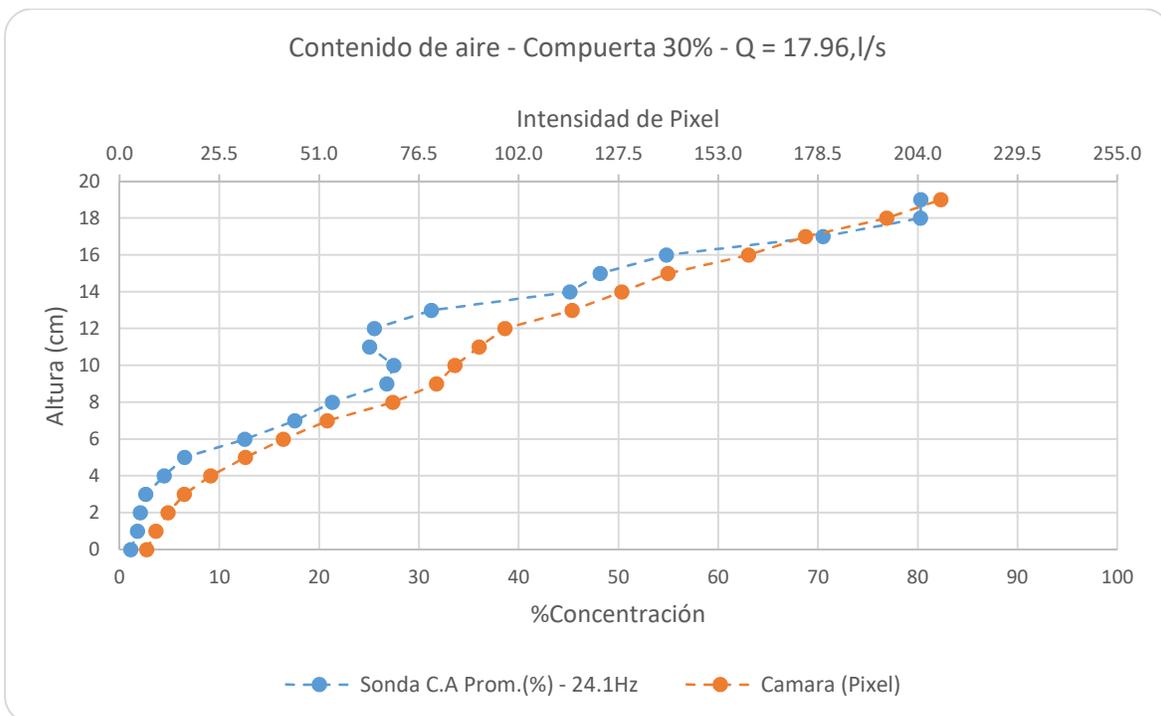


Figura 5.5. Perfiles de concentración de aire (con sonda y cámara) – Compuerta 30% (3.2P1)

En la figura 5.6 se aprecian los perfiles verticales de concentración de aire tanto en porcentaje como en intensidad de píxeles graficados desde una altura $h = 0$ cm hasta una altura $h = 19$ cm, para el escenario 4P1. Los resultados graficados muestran una buena aproximación entre los obtenidos con la sonda y los obtenidos con las fotografías.

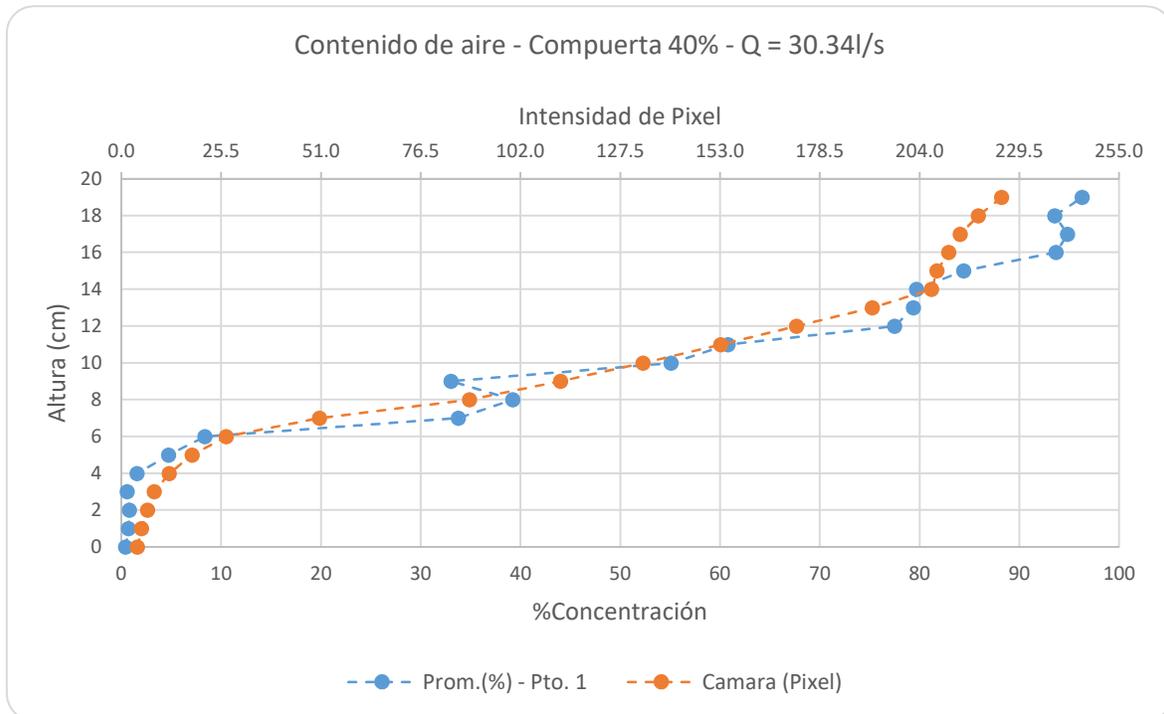


Figura 5.6. Perfiles de concentración de aire (con sonda y cámara) – Compuerta 40% (4P1)

En los escenarios 5P1 y 5P2 (figuras 5.7 y 5.8), en los cuales se determinaron los perfiles de concentración de aire tanto en X_1 como en X_2 para un mismo gasto de agua, se puede observar la diferencia que existe entre los perfiles, lo cual demuestra la naturaleza oscilante de la superficie del agua y de la interfaz agua-aire en un fenómeno como lo es el salto hidráulico. Sin embargo, los resultados obtenidos a partir de las fotografías concuerdan aceptablemente con los respectivos de la sonda, existiendo un mejor coeficiente de correlación para el escenario 5P2.

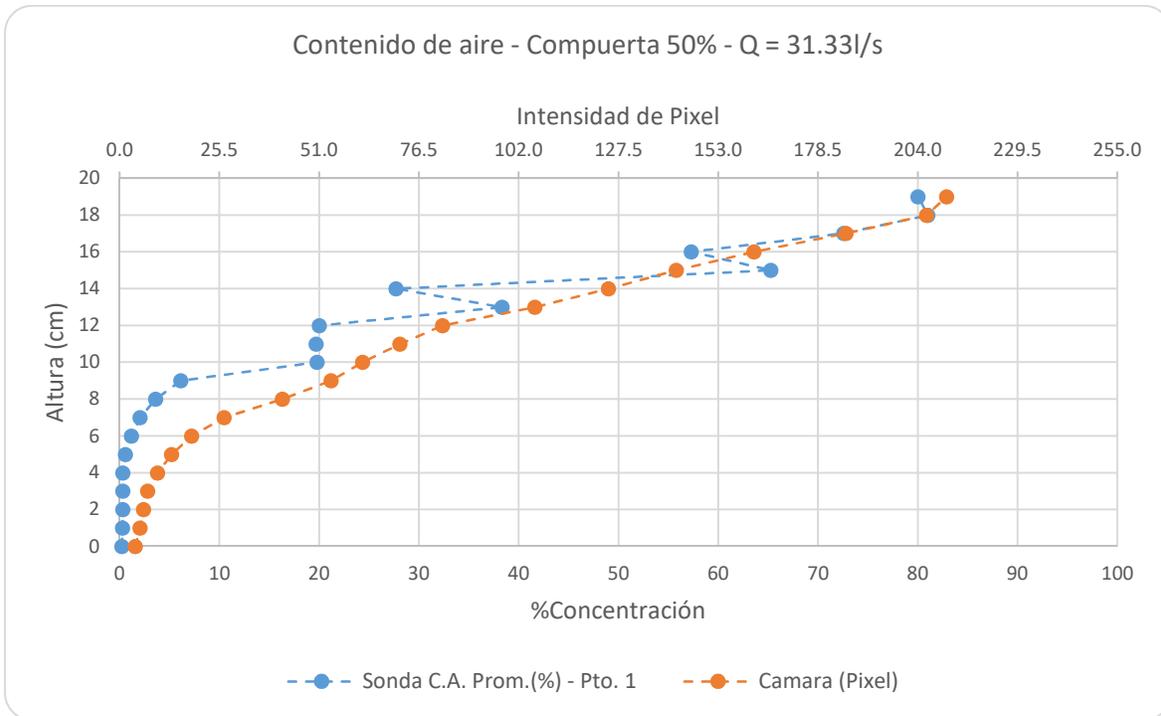


Figura 5.7. Perfiles de concentración de aire (con sonda y cámara) – Compuerta 50% (5P1)

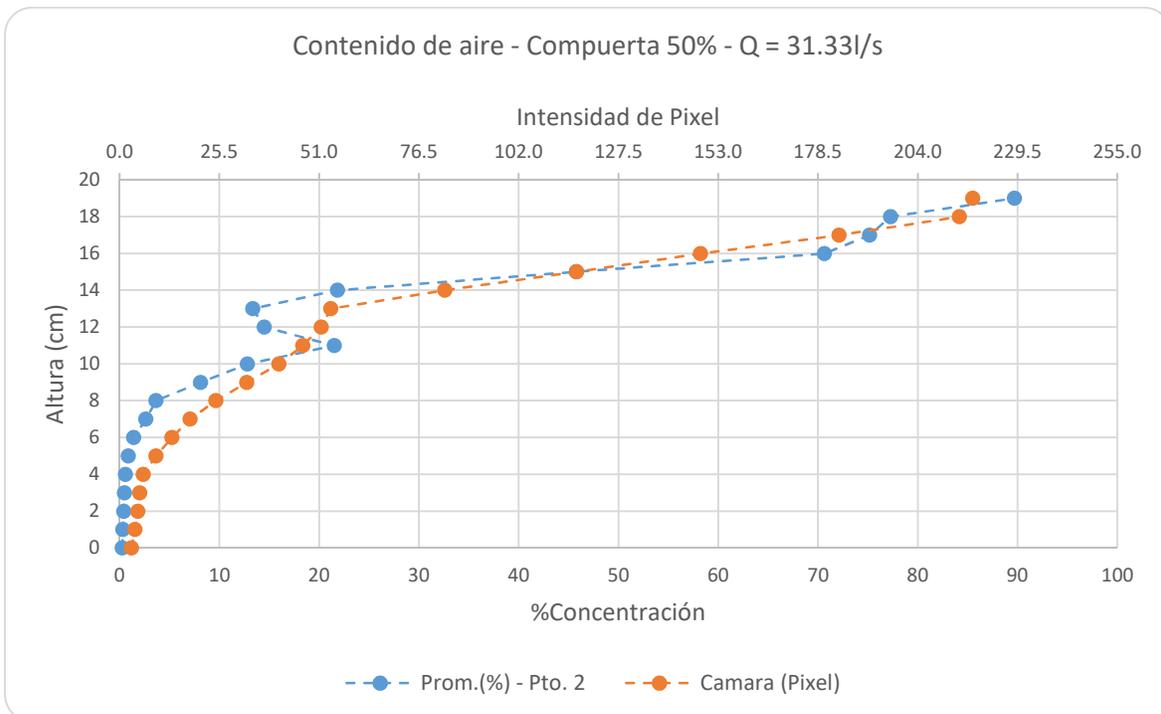


Figura 5.8. Perfiles de concentración de aire (con sonda y cámara) – Compuerta 50% (5P2)

Para los escenarios 6P1 (figura 5.9) y 7P1 (figura 5.10) las concentraciones de aire a la altura de 18 cm no sobrepasan el 60% debido a que, la interfaz agua-aire ocupa la mayor parte del diámetro de la tubería y no existe un flujo netamente de aire, esto ocurre porque el gasto de agua, en comparación con los otros escenarios, es mayor. Para cada uno de estos casos, existe una mejor correlación en la parte inferior de los perfiles desde $h = 0$ cm hasta $h = 9$ cm, sin embargo, desde $h = 10$ cm hasta $h = 18$ cm, los perfiles de concentración de aire obtenidos a partir del algoritmo de tratamiento de imágenes difieren de los perfiles obtenidos con la sonda, esta diferencia puede deberse al hecho de que, al ser el gasto de agua mayor que en los otros escenarios, el salto hidráulico no se mantuvo estático, sino más bien se desplazaba (hacia arriba o hacia abajo) durante la toma de datos especialmente con la sonda, ya que su registro al demandar más tiempo hacía que el desplazamiento fuera visible y éste pudo haber afectado el registro de mediciones, a diferencia de los datos tomados con la cámara pues, la captura de las fotografías se hizo en un tiempo de 2 segundos en los cuales el salto prácticamente no se movía.

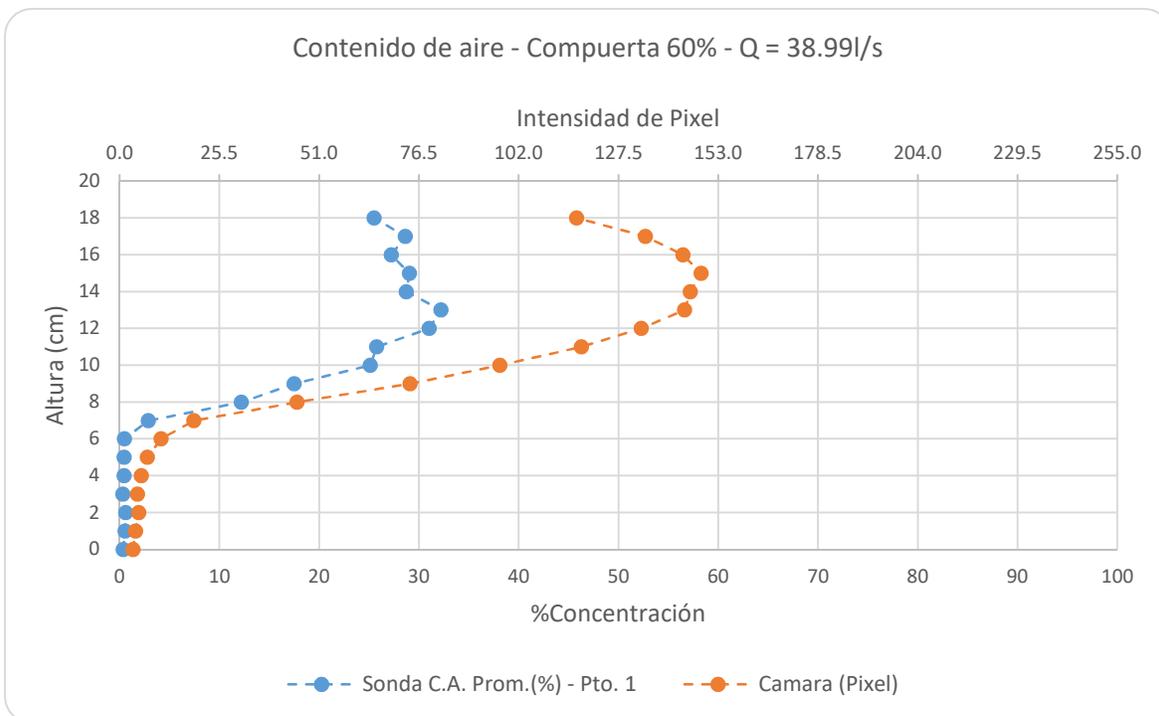


Figura 5.9. Perfiles de concentración de aire (con sonda y cámara) – Compuerta 60% (6P1)

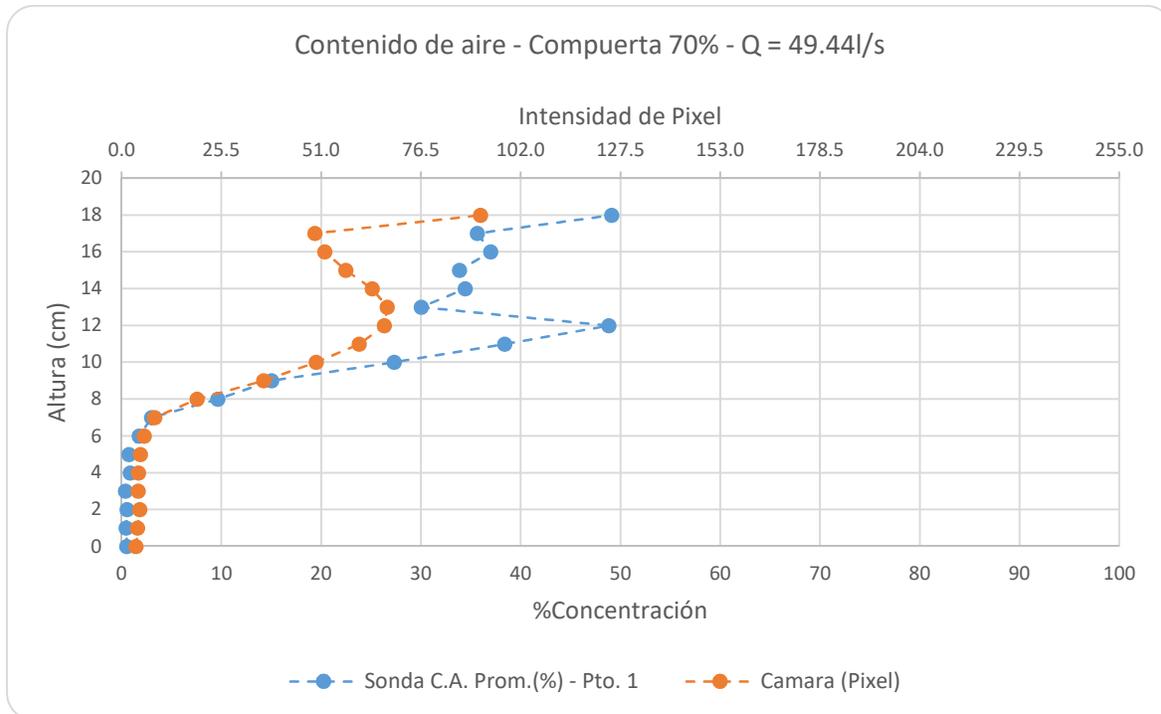


Figura 5.10. Perfiles de concentración de aire (con sonda y cámara) – Compuerta 70% (7P1)

Todos los perfiles de concentración de aire tienen cierta similitud, ya que, como era de esperarse, a alturas por debajo de 6 cm (fase con mayor contenido de agua) la concentración de aire está alrededor del 10% o 25.5px. Conforme se va ingresando a la zona de flujo aire-agua, el contenido de aire se va incrementando hasta alcanzar la superficie libre del agua. No obstante, como se mencionó antes, durante la ejecución de los ensayos, se produjeron tres escenarios, 2.1P1, 6P1 y 7P1, en los cuales el flujo agua-aire prácticamente sellaba el conducto, es decir, a partir de los 6 cm la mezcla ocupó casi todo el diámetro de la tubería. En estos casos, la mayor concentración de aire registrado con la sonda se dio en el escenario 2.1P1 y fue de 55.906% (141.91px) a la altura de 19 cm y la mayor concentración de aire obtenida a partir de las fotografías se produjo en el escenario 6P1 y fue de 58.278% (148.61px) a una altura de 15 cm.

5.1.2 Análisis de los perfiles de velocidad

Para la obtención de los perfiles de velocidad los conjuntos de fotografías, para cada escenario, fueron analizadas con el programa PIVLab. Ya que el programa permite obtener los perfiles de velocidad verticales en cualquier ubicación, los resultados que aquí se muestran corresponden al perfil que coincide, en localización, con los perfiles de concentración de aire obtenidos con la sonda y con fotografías, es decir, los perfiles tanto de concentración como de velocidad se obtuvieron para la misma línea vertical.

En las figuras de la 5.11 a la 5.20 se muestran los perfiles de velocidad, obtenidos para cada escenario en las direcciones 'u' y 'v'. El vector 'u' corresponde a la dirección en 'x' y el 'v' a la dirección en 'y'. Además, en tales figuras se puede apreciar claramente que la distribución de velocidad de las burbujas (flujo agua-aire) no sigue un patrón definido, esto se debe a la alta turbulencia que presenta el flujo. Los puntos de velocidad máxima se presentan siempre en la interfaz agua-aire, además, la velocidad disminuye con la altura, esto es porque, conforme se sale de la interfaz agua-aire, el fluido que predomina es únicamente aire.

La forma de los perfiles de velocidad es una función de la proporción del caudal volumétrico medio local y de una medida del grado de desviación entre flujo monofásico y flujo bifásico (agua-aire). Aunque sería de esperar que los números de Reynolds, Froude y Weber, caractericen los perfiles de velocidad del flujo agua-aire, así como los perfiles de concentración de aire, en los ensayos experimentales llevados a cabo, la tensión superficial del flujo fue una variable no controlada, por lo tanto, al número de Weber no se lo trata como un parámetro característico, tampoco al número de Reynolds ya que el flujo se desarrolla prácticamente a superficie libre.

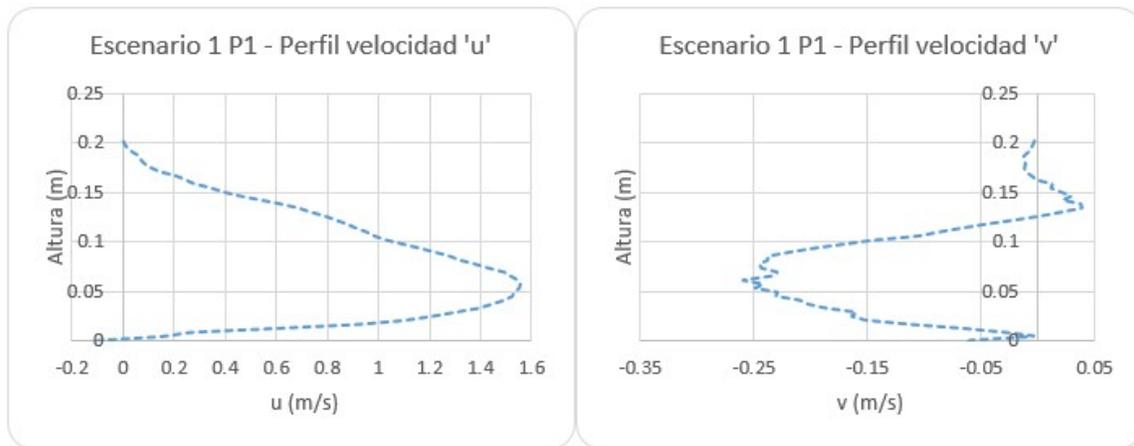


Figura 5.11. Perfiles de velocidad en 'u' y 'v' – Compuerta 10% (1P1)

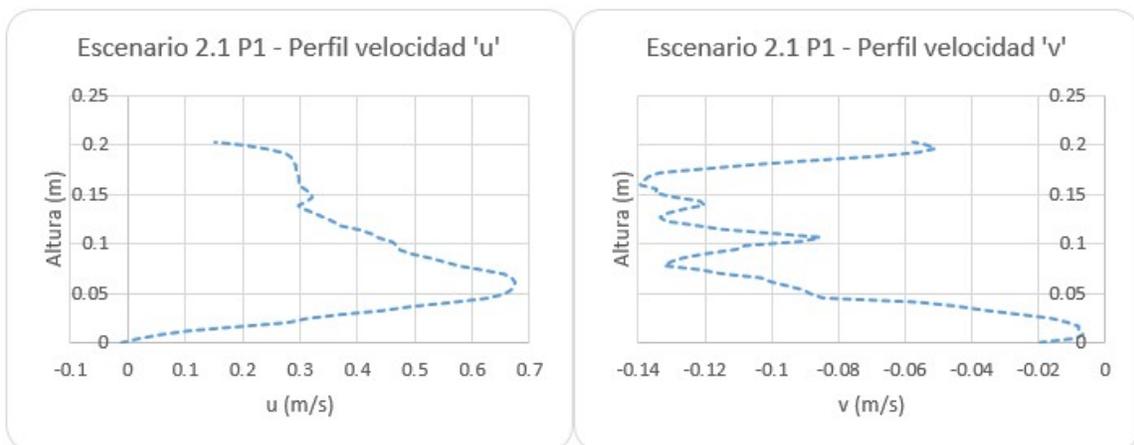


Figura 5.12. Perfiles de velocidad en 'u' y 'v' – Compuerta 20% (2.1P1)

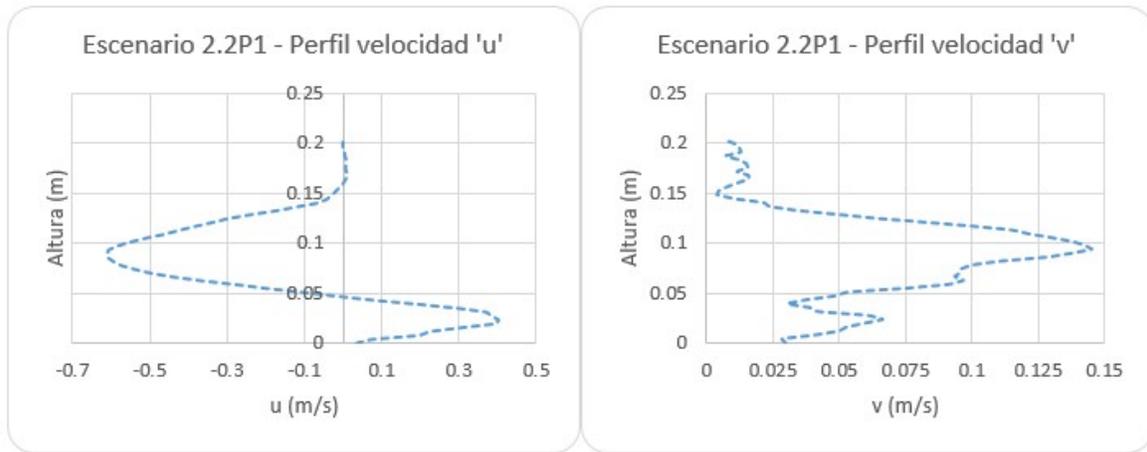


Figura 5.13. Perfiles de velocidad en 'u' y 'v' – Compuerta 20% (2.2P1)

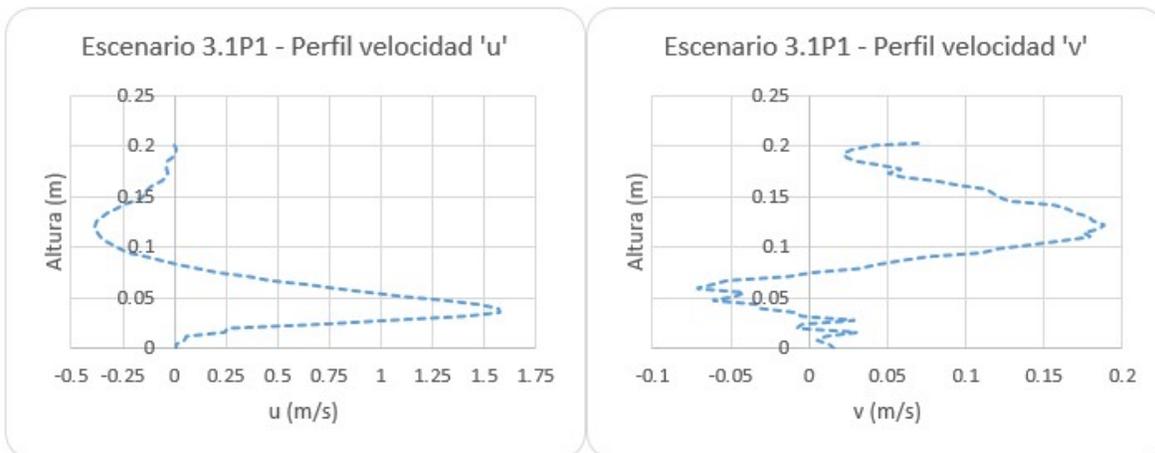


Figura 5.14. Perfiles de velocidad en 'u' y 'v' – Compuerta 30% (3.1P1)

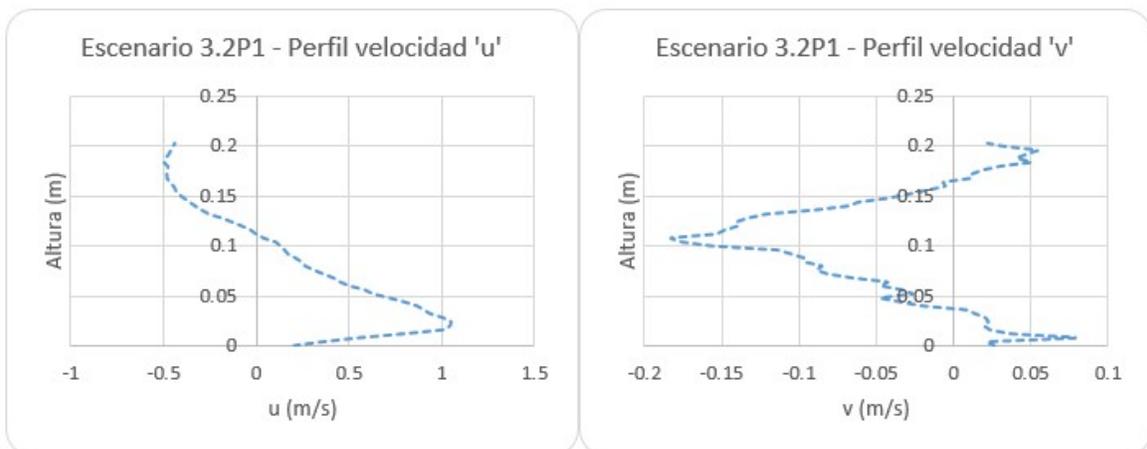


Figura 5.15. Perfiles de velocidad en 'u' y 'v' – Compuerta 30% (3.2P1)

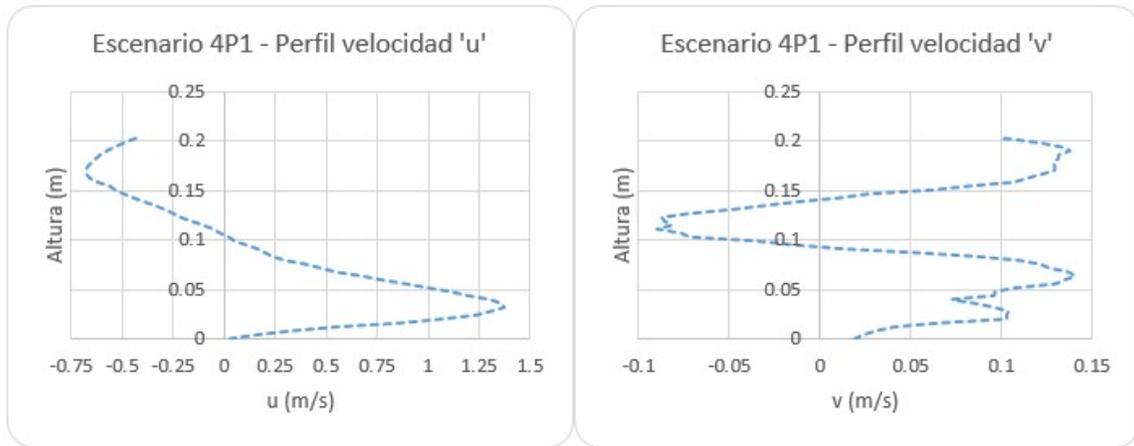


Figura 5.16. Perfiles de velocidad en 'u' y 'v' – Compuerta 40% (4P1)

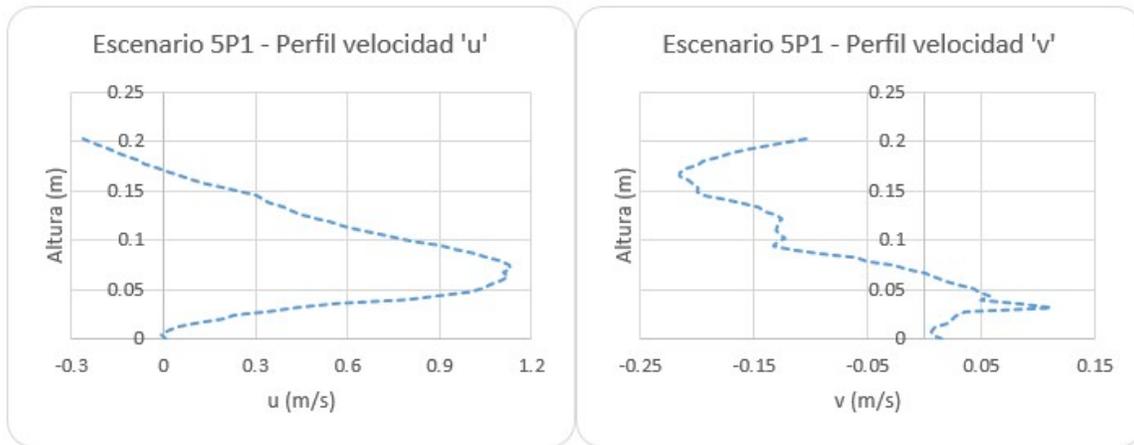


Figura 5.17. Perfiles de velocidad en 'u' y 'v' – Compuerta 50% (5P1)

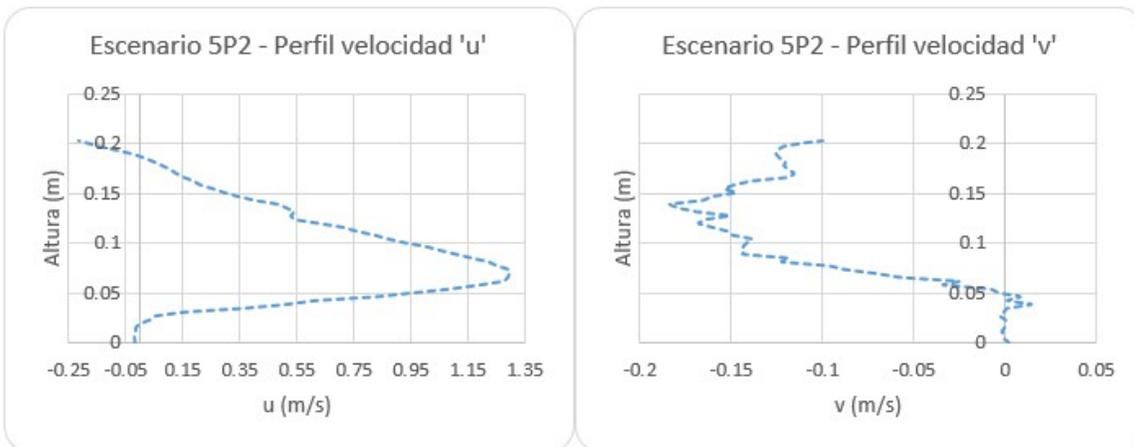


Figura 5.18. Perfiles de velocidad en 'u' y 'v' – Compuerta 50% (5P2)

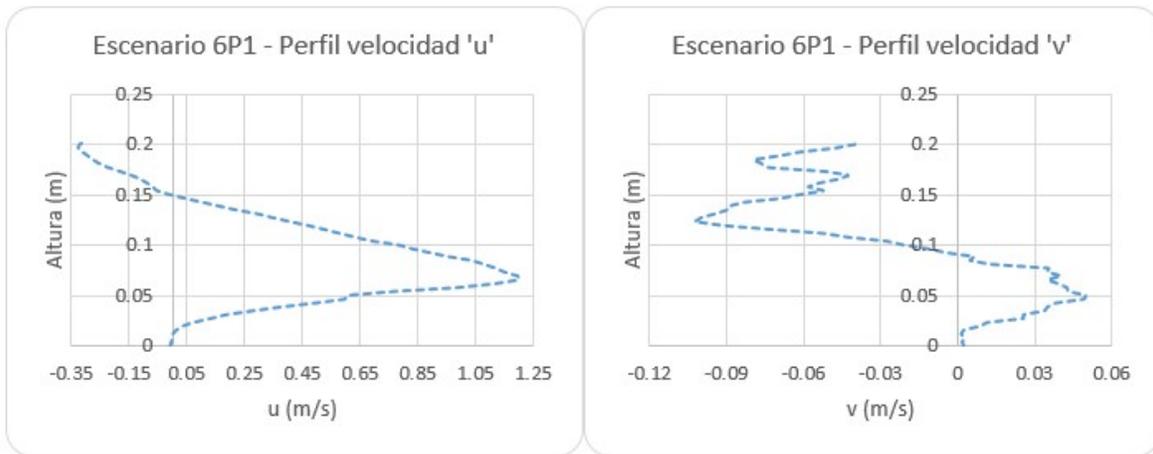


Figura 5.19. Perfiles de velocidad en 'u' y 'v' – Compuerta 60% (6P1)

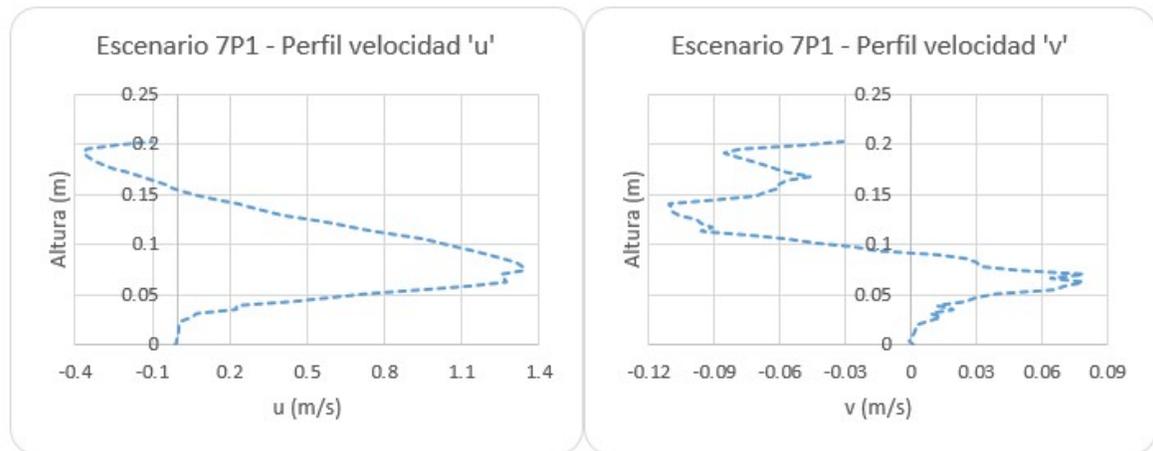


Figura 5.20. Perfiles de velocidad en 'u' y 'v' – Compuerta 70% (7P1)

Todos los perfiles de velocidad tienen ciertas características en común, por ejemplo, todos tienen su velocidad máxima por debajo de los 10 cm y por arriba de los 2 cm., es decir, por debajo del centro de la tubería. Otra característica a destacar es la presencia de máximos y mínimos locales definidos en las pendientes de las curvas de velocidad. Estos cambios de pendientes reflejan claramente los cambios en la distribución de la fase gaseosa (incremento o disminución de la cantidad de burbujas en el flujo, así como un cambio de dirección). Una de las características más sobresalientes que se puede observar en todos los perfiles de velocidad es que son totalmente asimétricos.

A continuación, se presentan la tabla 5.5 y la figura 5.21 de resumen con los valores máximos tanto positivos como negativos en las direcciones 'u' y 'v' para cada escenario ensayado.

Como se verá en seguida, en todos los escenarios la velocidad predominante es aquella que ocurre en la dirección 'u' que prácticamente da el valor a la magnitud de la misma. Así, los perfiles de velocidad nos permiten observar y conocer la dinámica del flujo agua-aire y el comportamiento de las burbujas que se generan

en un salto hidráulico aguas abajo de una compuerta de desfogue de fondo de presas.

Escenario	Q _{agua} (l/s)	V _{agua} (m/s)	Velocidades máximas del flujo agua-aire				
			u ⁺ (m/s)	u ⁻ (m/s)	v ⁺ (m/s)	v ⁻ (m/s)	Magnitud (m/s)
1P1	5.989	1.638	1.55305	-0.10362	0.03819	-0.25990	1.57205
2.1P1	11.239	2.836	0.67442	-0.01139		-0.13950	0.68180
2.2P1	11.494	2.163	0.40102	-0.61211	0.14545		0.62774
3.1P1	18.063	3.180	1.57191	-0.38744	0.18807	-0.07079	1.57197
3.2P1	17.964	3.291	1.05289	-0.49117	0.07872	-0.18265	1.05312
4P1	30.341	3.558	1.37130	-0.67797	0.14007	-0.08950	1.37453
5P1	31.334	3.358	1.13264	-0.26446	0.11071	-0.21546	1.13280
5P2	31.334	3.358	1.29246	-0.21667	0.01450	-0.18366	1.29517
6P1	38.995	2.835	1.19807	-0.32862	0.04991	-0.10208	1.19862
7P1	49.441	2.777	1.33991	-0.36911	0.07874	-0.11069	1.34068

Tabla 5.5. Resumen de los valores máximos de las velocidades en 'u' y 'v'

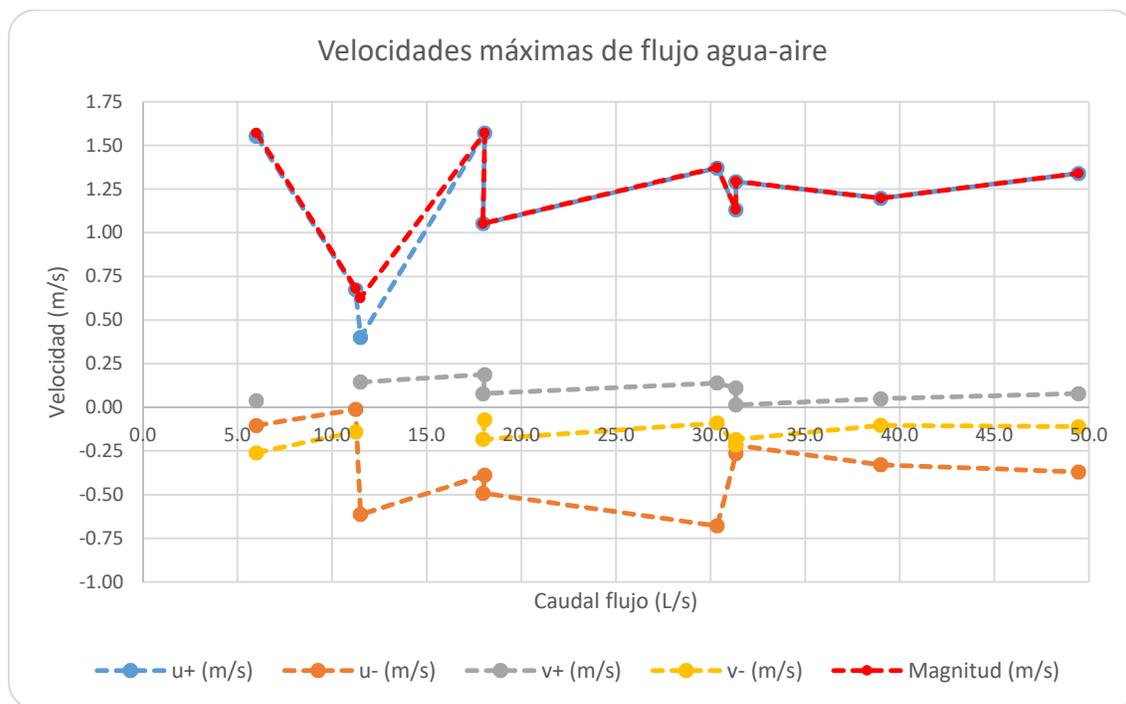


Figura 5.21. Velocidades máximas positivas y negativas registradas para cada escenario

CAPÍTULO VI:
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- ✓ Los resultados obtenidos a través de las fotografías indican que, los métodos no intrusivos con una adecuada calibración pueden, con suficiente precisión, estimar la concentración de aire en el flujo agua-aire dentro de un salto hidráulico generado en el interior de un conducto cerrado para diferentes gastos, lo cual resulta una herramienta poderosa para complementar los datos recolectados con una sonda de doble punta o con cualquier método intrusivo.
- ✓ La ligera variación que se observó en las gráficas entre los perfiles de concentración obtenidos con la sonda y con los algoritmos para procesamiento de imágenes, se debe principalmente al hecho de que, a través de los algoritmos se obtienen los perfiles cerca de la pared lateral del conducto mientras que la sonda mide a lo largo del centro del mismo, inclusive, las alturas a las que se tomaron las medidas no coinciden perfectamente en el centro y en los lados por la curvatura propia que tiene la tubería, no obstante, se trató de reducir el efecto de curvatura con el uso de la pecera llena de agua.
- ✓ A pesar de todo lo indicado en el párrafo anterior, si se optara por cambiar la ubicación de la sonda para que sus lecturas se tomen junto a la pared lateral del conducto, ésta no sería una solución aceptable ya que, las burbujas adheridas a la pared interferirían inevitablemente con las lecturas de la sonda. Esto no representa un inconveniente al usar los algoritmos ya que empleando la ecuación 4.7 se eliminan la mayoría de las burbujas de aire que están pegadas a la pared de la tubería.
- ✓ Los perfiles de concentración de aire en el salto hidráulico varían en función de la apertura de compuerta, el caudal que circula por el sistema y del diámetro del venteo.
- ✓ Al usar un método intrusivo, la sonda interfiere en el desarrollo normal del flujo, pues, durante la ejecución de los experimentos, se pudo apreciar que, sobre todo para los escenarios 6P1 y 7P1, el salto hidráulico se desplazaba hacia aguas arriba o aguas abajo, conforme lo hacia la sonda al ubicarse en las diferentes alturas. Por lo que, la implementación de los métodos no intrusivos para la obtención del porcentaje de concentración de aire constituye un complemento muy útil para medidas realizadas con sonda o con cualquier otro método intrusivo.

- ✓ El uso de los métodos intrusivos permite la toma de lecturas puntuales dentro del flujo a lo largo de un perfil vertical como en nuestro caso, es decir, no permite la lectura de múltiples puntos sino solamente en el lugar donde se coloca el dispositivo. Es por eso que, la implementación de los métodos no intrusivos, como el basado en el análisis de imágenes, puede ofrecer una mayor cobertura para conocer la concentración de aire en diferentes partes del flujo, a través de un registro de datos en zonas donde la sonda no fue colocada. Para ello, y para tener una mayor representatividad de los resultados obtenidos con imágenes, se recomienda que las fotografías sean tomadas cerca de la pared lateral de la tubería donde se están llevando a cabo los ensayos.

- ✓ En cuanto a los perfiles de velocidad, esta información fue tomada para el flujo dentro de un conducto cerrado donde, registros usando un método intrusivo son generalmente difíciles de obtener. Los perfiles de velocidad del flujo agua-aire muestran principalmente la hidrodinámica del sistema y permiten conocer la variación de la velocidad a lo largo de un perfil vertical.

7. ANEXO A

Tablas con los valores numéricos de los perfiles de concentración de aire obtenidos con la sonda y mediante las fotografías para cada escenario

Compuerta 10%	<i>Perfil de Concentración Aire</i>	
<i>h (cm)</i>	% Concentración	Intensidad de Pixel
0	1.224	5.000
1	2.796	7.290
2	6.498	9.440
3	9.584	12.450
4	8.193	16.090
5	10.578	21.900
6	12.187	29.360
7	21.928	42.600
8	20.086	73.450
9	34.883	100.390
10	39.918	123.480
11	52.832	144.510
12	71.982	166.800
13	76.864	192.830
14	86.377	218.670
15	91.616	224.020
16	95.733	228.100

Tabla 7.1. Valores numéricos, escenario 1P1

Compuerta 20%	<i>Perfil de Concentración Aire</i>	
<i>h (cm)</i>	% Concentración	Intensidad de Pixel
0	0.978	8.080
1	1.428	10.140
2	2.040	11.780
3	3.227	14.020
4	5.680	16.700
5	6.458	20.260
6	7.747	23.610
7	8.455	27.580
8	10.589	31.710
9	10.757	36.040
10	12.541	37.960
11	14.656	41.960
12	15.794	45.920
13	19.260	47.140
14	19.488	62.400
15	24.810	68.610
16	31.228	76.900
17	30.753	88.190
18	53.547	105.910
19	55.906	141.910

Tabla 7.2. Valores numéricos, escenario 2.1P1

Compuerta 20%	<i>Perfil de Concentración Aire</i>	
<i>h (cm)</i>	% Concentración	Intensidad de Pixel
0	1.268	7.370
1	2.889	9.590
2	3.535	12.820
3	5.192	19.720
4	10.122	28.850
5	12.342	40.200
6	17.326	51.350
7	25.060	62.450
8	31.546	70.110
9	32.864	80.840
10	34.052	84.690
11	38.284	90.260
12	48.426	109.450
13	75.094	149.810
14	70.850	181.220
15	79.964	208.580
16	88.340	233.750
17	88.846	237.560
18	95.309	237.670
19	96.402	237.790

Tabla 7.3. Valores numéricos, escenario 2.2P1

Compuerta 30%	<i>Perfil de Concentración Aire</i>	
<i>h (cm)</i>	% Concentración	Intensidad de Pixel
0	1.646	5.010
1	2.266	6.240
2	2.394	7.360
3	4.863	8.860
4	6.429	12.820
5	14.628	20.490
6	20.639	32.220
7	19.262	44.540
8	29.68	62.670
9	30.555	72.980
10	28.162	80.340
11	36.762	83.290
12	41.839	81.710
13	51.201	95.070
14	60.442	142.130
15	73.919	176.420
16	85.648	200.250
17	81.039	218.280
18	91.99	223.530
19	96.784	224.770

Tabla 7.4. Valores numéricos, escenario 3.1P1

Compuerta 30%	Perfil de Concentración Aire	
<i>h</i> (cm)	% Concentración	Intensidad de Pixel
0	1.102	6.940
1	1.798	9.300
2	2.076	12.380
3	2.605	16.480
4	4.463	23.250
5	6.52	32.150
6	12.544	41.820
7	17.567	53.020
8	21.313	69.830
9	26.785	80.980
10	27.483	85.700
11	25.059	91.850
12	25.546	98.450
13	31.234	115.680
14	45.121	128.300
15	48.173	140.170
16	54.808	160.770
17	70.509	175.300
18	80.273	196.030
19	80.298	209.890

Tabla 7.5. Valores numéricos, escenario 3.2P1

Compuerta 40%	Perfil de Concentración Aire	
<i>h</i> (cm)	% Concentración	Intensidad de Pixel
0	0.424	4.040
1	0.7	5.090
2	0.808	6.650
3	0.565	8.400
4	1.554	12.180
5	4.715	18.100
6	8.35	26.740
7	33.749	50.650
8	39.231	88.930
9	33.044	112.210
10	55.079	133.270
11	60.802	153.180
12	77.489	172.540
13	79.384	191.860
14	79.677	207.020
15	84.425	208.410
16	93.666	211.430
17	94.829	214.390
18	93.539	218.990
19	96.303	224.980

Tabla 7.6. Valores numéricos, escenario 4P1

Compuerta 50%	<i>Perfil de Concentración Aire</i>	
<i>h (cm)</i>	% Concentración	Intensidad de Pixel
0	0.228	3.970
1	0.274	5.200
2	0.332	6.120
3	0.317	7.120
4	0.302	9.670
5	0.571	13.240
6	1.164	18.420
7	2.054	26.660
8	3.616	41.610
9	6.137	54.000
10	19.776	62.080
11	19.695	71.580
12	20.006	82.510
13	38.328	106.150
14	27.699	124.920
15	65.251	142.220
16	57.272	162.100
17	72.579	185.650
18	80.986	206.250
19	80.004	211.320

Tabla 7.7. Valores numéricos, escenario 5P1

Compuerta 50%	<i>Perfil de Concentración Aire</i>	
<i>h (cm)</i>	% Concentración	Intensidad de Pixel
0	0.269	2.980
1	0.327	3.940
2	0.397	4.650
3	0.480	5.140
4	0.583	5.990
5	0.848	9.290
6	1.402	13.340
7	2.616	17.980
8	3.635	24.610
9	8.112	32.500
10	12.796	40.680
11	21.506	46.790
12	14.481	51.550
13	13.327	53.920
14	21.844	83.110
15	45.754	116.750
16	70.641	148.410
17	75.150	183.880
18	77.274	214.590
19	89.671	217.990

Tabla 7.8. Valores numéricos, escenario 5P2

Compuerta 60%	<i>Perfil de Concentración Aire</i>	
<i>h (cm)</i>	% Concentración	Intensidad de Pixel
0	0.356	3.400
1	0.538	4.100
2	0.610	4.910
3	0.327	4.590
4	0.440	5.540
5	0.460	7.050
6	0.467	10.580
7	2.857	18.990
8	12.192	45.340
9	17.485	74.200
10	25.109	97.150
11	25.758	118.040
12	31.018	133.310
13	32.191	144.370
14	28.738	145.830
15	29.027	148.610
16	27.207	143.990
17	28.627	134.400
18	25.485	116.800

Tabla 7.9. Valores numéricos, escenario 6P1

Compuerta 70%	<i>Perfil de Concentración Aire</i>	
<i>h (cm)</i>	% Concentración	Intensidad de Pixel
0	0.519	3.680
1	0.456	4.040
2	0.528	4.650
3	0.397	4.240
4	0.847	4.300
5	0.721	4.800
6	1.765	5.770
7	2.995	8.420
8	9.622	19.270
9	15.020	36.290
10	27.308	49.730
11	38.402	60.740
12	48.820	67.120
13	30.017	67.880
14	34.428	64.050
15	33.863	57.320
16	36.992	51.900
17	35.645	49.370
18	49.121	91.720

Tabla 7.10. Valores numéricos, escenario 7P1

8. BIBLIOGRAFIA

- ✓ Baird D. C., “Experimentación – Una introducción a la teoría de mediciones y al diseño de experimentos”, segunda edición. Prentice-Hall.
- ✓ Brown F. C. y Kranich W.L., (1968), “A Model for the Prediction of Velocity and Void Fraction Profiles in Two-Phase Flow”, *AIChE Journal*, pp 750 – 758.
- ✓ Bung D. B., (2011a), “Developing flow in skimming flow regime on embankment stepped spillways”. *J. Hydraul. Res.* 49(5): 639 – 648.
- ✓ Bung D.B., (2011b), Non-intrusive measuring of air-water flow properties in self-aerated stepped spillway flow. *Proceedings of the 34th world congress of the international association for hydro-environment research and engineering: 33rd Hydrology and water resources symposium and 10th conference on hydraulics in water engineering.*
- ✓ Campbell F. B., Guyton B. (1953), “Air Demand in Gated Outlet Works”, *Proceedings of the 5th Congress of the International Association of Hydraulic Research*, Minnesota.
- ✓ Chanson H., Quiao G.L. (1994), “Air Bubble Entrainment and Gas Transfer at Hydraulic Jumps”, Department of Civil Engineering, The University of Queensland.
- ✓ Chanson H., Brattberg T. (1999), “Experimental study of the air-water shear flow in a hydraulic jump”, Department of Civil Engineering, The University of Queensland, Brisbane QLD 4072, Australia.
- ✓ Chanson H. (2007) “Bubbly flow structure in hydraulic jump”. *Eur J. Mech – B/Fluids*, 26(3): 42 – 435.
- ✓ Chanson H., Felder S., (2010) “Turbulence measurements in air-water self-aerated flows: basic analysis and results”. In: Curtis J.S., Balachandar S (eds) *7th International conference on multiphase flow ICMF 2010*. Tampa FL, USA, pp 1–11.
- ✓ Erbisti Paulo C. F., “Design of Hydraulic Gates” 2nd edition, CRC Press/Balkema.

- ✓ Escarameia M., (2007), “Investigating hydraulic removal of air from water pipelines. Dissertation 158. Stuttgart university, Stuttgart Germany.
- ✓ Falvey H., (1990), “Cavitation in Chutes and Spillways”, United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver Colorado.
- ✓ “Hydraulic Design Criteria: Air Demand Regulated Outlet Works”, United States Army Corps of Engineers, 1964.
- ✓ Kalinske A. A. and Robertson J. M. (1943), “Closed Conduit Flow”, Transactions of the Symposium on Entrainment of Air in Flowing Water, ASCE, Vol. 108, Paper No. 2205, pp. 1435 – 1447.
- ✓ Khatsuria R. M., “Hydraulic of Spillways and Energy Dissipators”, Marcel Dekker, New York.
- ✓ Larchar J.A. (2011), “Air Demand in Low-Level Outlet Works”, MSc Thesis, Utah State University.
- ✓ Leandro J., Bung D. B., Carvalho R. (2014), “Measuring void fraction and velocity fields of a stepped spillway for skimming flow using non-intrusive methods”, Research Article.
- ✓ Leandro J., Carvalho R., Chachereau Y., Chanson H. (2012), “Estimating void fraction in a hydraulic jump by measurements of pixel intensity”, Exp. Fluids (2012).
- ✓ Lewin Jack, “Hydraulic gates and valves” 2nd edition, Thomas Telford.
- ✓ Mortensen Joshua D., Barfuss Steven L., Johnson Michael C. (2011), “Scale effects of air entrained by hydraulic jumps within closed conduits”, Journal of Hydraulic Research Vol. 49.
- ✓ Mortensen J. D., Kubitschek J. P., (2016) “Effects of hydraulic jump motion on air entrainment in closed conduits”, 6th international symposium on hydraulic structures. Utah State University.
- ✓ Mossa M., Tolve U., (1998), “Flow visualization in bubbly two-phase hydraulic jump”. J. Fluid Eng 120:160–165
- ✓ Oveson D. P. (2008), “Air Demand in Free Flowing Gated Conduits”, MSc Thesis, Utah State University.

- ✓ Petti M., and Longo S., (2001), Turbulence experiments in the swash zone, *Coastal Engineering*, 43(1), 1-24.
- ✓ Pozo D., Salazar F., Toledo M.A., “Modelación del funcionamiento hidráulico de los dispositivos de aireación de desagües de fondo de presas mediante el método de partículas y elementos finitos”, *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en Ingeniería*.
- ✓ Rabben S. L., Els, H. Rouvé G., (1983), “Investigation on flow aereation of offsets downstream of high-head control structures”. *Proc. 20th IAHR congress Moscow* 4, 354 – 360.
- ✓ Rahman M. A., Heidrick T., Fleck B. A., (2009) “A critical review of advanced experimental techniques to measure two-phase gas/liquid flow”. *The open fuels and energy science journal*, 2, 54 – 70.
- ✓ Rajaratnam N., (1967), “Hydraulic jumps. *Advances in hydroscience* 4, 197 – 280, V.T. Chow, ed. Academic Press, New York.
- ✓ Ryu Y., Chang K-A, Lim H-J, (2005), Use of bubble image velocimetry for measurement of plunging wave impinging on structure and associated greenwater. *Meas Sci Technol* 16:1945-1953.
- ✓ RWP May, (1987), “Cavitation in Hydraulic Structures: occurrence and prevention”, *Hydraulics Research – Wallingford*.
- ✓ Salazar F. et al. (2012), “Numerical Modeling of Air-Water Interaction in Bottom Outlets. Application to Susqueda Dam”, *LAHR International Symposium on Hydraulic Structures*.
- ✓ Santos Madrid González de la Aleja, “Los desagües de fondo en presas”, *Comité Nacional Español de Grandes Presas*.
- ✓ Sharma (1976), “Air-Entrainment in High Head Gates Conduits”, *Journal of the Hydraulics Division, ASCE* 102 (HY11), 1629 – 1646.
- ✓ Tanchev Ljubomir (2005), “Dams and Appurtenant Hydraulic Structures”, 2da. Edición, CRC Press/Balkema.
- ✓ Thielicke, W. and Stamhuis, E.J. (2014): PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. *Journal of Open Research Software* 2(1): e30.

- ✓ Thielicke, W. and Stamhuis, E. J. (2014): PIVlab - Time-Resolved Digital Particle Image Velocimetry Tool for MATLAB (version: 1.41).
- ✓ Thielicke, W. (2014): The Flapping Flight of Birds - Analysis and Application. Phd thesis, Rijksuniversiteit Groningen.
- ✓ Torres Herrera F. (1983), "Obras Hidráulicas", 2da. edición, Noriega Editores.
- ✓ Wisner P., (1965), "Sur le role du critere de Froude dans l'étude de l'entraînement de l'air par les courants al grande vitesse". Proceeding of the 11th Congress of the International Association of Hydraulics Research, Vol. 1, Leningrad, U.S.S.R.