



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**“VERIFICACIÓN EXPERIMENTAL DEL FUNCIONAMIENTO DE
AFORADORES TIPO PARSHALL”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL**

**PRESENTA:
ESTRELLA ADHARA SOTO ROMÁN**

**ASESOR:
ING. EVERARDO URQUIZA MARÍN**

MORELIA, MICHOACÁN, agosto 2006.

ÍNDICE

	Página
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 2. CANAL AFORADOR TIPO PARSHALL	4
2.1 Norma Internacional ISO 9826 “Medición de la circulación de líquidos en vías abiertas - Canales Parshall y SANIIRI”	4
2.1.1 Alcance.	4
2.1.2 Definiciones y símbolos	4
2.1.3 Selección del tipo de aforador	5
2.1.4 Instalación	5
2.1.5 Mantenimiento – Requisitos generales	8
2.1.6 Aforadores Parshall	8
2.1.7 Incertidumbres en la medida del flujo	15
2.2 Canal Aforador tipo Parshall	17
2.2.1 Descripción	17
2.2.2 Especificaciones de instalación física	19
2.2.3 Pruebas de calibración y precisión	19
2.2.4 Ventajas y desventajas	20
CAPÍTULO 3. IMPORTANCIA Y APLICACIÓN DE AFORADORES PARSHALL PARA LA MEDICIÓN DE FLUJOS A SUPERFICIE LIBRE	21
3.1 Introducción	21
3.2 Medición de caudales	21
3.3 Gama de caudales a medir	22
3.4 Sensibilidad de la obra de medición	22
3.5 Capacidad de eliminación de sedimentos	22
3.6 El paso de cuerpos flotantes y en suspensión	23
3.7 Exactitud necesaria entre las medidas	23
CAPÍTULO 4. DISEÑO E INSTALACIÓN DEL PROTOTIPO DE PRUEBA	25
4.1 Descripción general	25
4.1.1 Elección del sitio	25
4.1.2 Elección del tamaño de aforador Parshall	26
4.2 Fabricación del prototipo	27
4.2.1 Material	27
4.2.2 Procedimiento de construcción del prototipo	27
4.3 Instalación del aforador Parshall	29
4.3.1 Procedimiento de colocación del aforador en el tramo determinado	30
4.3.2 Instrumentación del aforador tipo Parshall	31
CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA PARA LA VERIFICACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS AFORADORES PARSHALL	32
5.1 Generalidades	32
CAPÍTULO 6. PROGRAMA DE EXPERIMENTOS	34
6.1 Introducción	34
6.2 Descripción de las pruebas	36
6.2.1 Formato para captura de los datos en campo	36
Prueba 1. Calibración del dispositivo en condiciones originales de diseño	37

Prueba 2. Perturbación del flujo de llegada con una pantalla normal al flujo	39
2.1 Pantalla ubicada a una distancia de 1.60m aguas arriba del aforador	40
2.2 Pantalla ubicada a una distancia de 0.80m aguas arriba del aforador	41
2.3 Pantalla ubicada a una distancia de 0.40m aguas arriba del aforador	42
Prueba 3. Desviación de las líneas de corriente con una rejilla tipo peine	43
3.1 Rejilla ubicada a una distancia de 1.60m aguas arriba del aforador	44
3.2 Rejilla ubicada a una distancia de 0.80m aguas arriba del aforador	45
3.3 Rejilla ubicada a una distancia de 0.40m aguas arriba del aforador	46
Prueba 4. Cambio de talud (k)	47
4.1 Talud $k=0.04:1$	47
4.2 Talud $k=0.08:1$	48
4.3 Talud $k=0.12:1$	49
Prueba 5. Variación del ancho de garganta (w)	50
5.1, 5.2, 5.3, y 5.4 Variación de w	50
Prueba 6. Cambio de rugosidad	51
6.1 Arena de $D=3.36\text{mm}$	52
6.2 Arena de $D=2.00\text{mm}$	53
6.3 Arena de $D=0.85\text{mm}$	54
6.4 Arena de $D=0.54\text{mm}$	55
Presentación de los resultados de cada prueba	56
Prueba 1. Calibración del dispositivo en condiciones originales de diseño	57
Prueba 2. Perturbación del flujo de llegada con una pantalla normal al flujo	59
2.1 Pantalla ubicada a una distancia de 1.60m aguas arriba del aforador	59
2.2 Pantalla ubicada a una distancia de 0.80m aguas arriba del aforador	61
2.3 Pantalla ubicada a una distancia de 0.40m aguas arriba del aforador	63
Prueba 3. Desviación de las líneas de corriente con una rejilla tipo peine	65
3.1 Rejilla ubicada a una distancia de 1.60m aguas arriba del aforador	65
3.2 Rejilla ubicada a una distancia de 0.80m aguas arriba del aforador	67
3.3 Rejilla ubicada a una distancia de 0.40m aguas arriba del aforador	69
Prueba 4. Cambio de talud (k)	71
4.1 Talud $k=0.04:1$	71
4.2 Talud $k=0.08:1$	73
4.3 Talud $k=0.12:1$	75
Prueba 5. Variación del ancho de garganta (w)	77
5.1 $w=88.2\text{mm}$	77
5.2 $w=82.2\text{mm}$	79
5.3 $w=68.2\text{mm}$	81
5.4 $w=60.2\text{mm}$	83
Prueba 6. Cambio de rugosidad	85
6.1 Arena de $D=3.36\text{mm}$	85
6.2 Arena de $D=2.00\text{mm}$	87
6.3 Arena de $D=0.85\text{mm}$	89
6.4 Arena de $D=0.54\text{mm}$	91

CAPÍTULO 7. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	93
7.1 Introducción	93
7.2 Resultados	94
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	99
8.1 Conclusiones	99
8.2 Recomendaciones	99
BIBLIOGRAFÍA	101

SINOPSIS

La presentación del siguiente trabajo de investigación tendrá en su primer capítulo la recopilación de antecedentes del uso consultivo del agua y el uso de los dispositivos aforadores de agua para tener un mejor control y aprovechamiento de este vital líquido, principalmente en la República Mexicana.

En el segundo capítulo se hará una descripción detallada del dispositivo aforador tipo Parshall; dicha descripción incluye un resumen de la Norma Internacional ISO 9826 "*Medición de la circulación de líquidos en vías abiertas - Canales Parshall y SANIIRI*" la cual nos indica las características que rigen la construcción y operación de éste dispositivo para su correcto funcionamiento.

El capítulo tercero nos da una reseña histórica de la importancia y aplicación de los aforadores en la medición de caudales, en éste capítulo también se presentan las condiciones que debe cumplir una obra de aforo.

El cuarto capítulo hace referencia al procedimiento que se siguió para el diseño del aforador tipo Parshall, el proceso constructivo del dispositivo y la instalación de éste en el sitio elegido para la verificación experimental del aforador.

En el capítulo quinto encontraremos la metodología a seguir para la verificación del aforador Parshall en su funcionamiento.

El sexto capítulo se trata de describir detalladamente el programa de experimentos que se realizaron, con el fin de representar posibles condiciones que se presentan en el funcionamiento de los aforadores en campo.

En el capítulo séptimo se presenta el análisis y la interpretación de los resultados arrojados por las pruebas de verificación experimental del dispositivo, para lo cual se presentan una serie de tablas con resultados y de gráficas para la mejor interpretación del efecto que causaron las diversas alteraciones.

En el octavo capítulo se hacen las conclusiones y recomendaciones, a las cuales llegamos al terminar y comprender el trabajo de investigación y verificación del funcionamiento de los aforadores tipo Parshall; dichas conclusiones y recomendaciones fueron elaboradas en espera de contribuir a un mejor funcionamiento del aforador Parshall.

Y finalmente en el capítulo noveno se hace referencia a la bibliografía consultada para la realización y complementación de la presente tesis.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Generalidades

La distribución y manejo de los recursos hídricos a nivel mundial ha tenido una acentuada crisis en las últimas décadas, caracterizada por fuertes problemas de disponibilidad de agua en cantidad y calidad adecuadas. Por ello muchos de los esquemas de solución a los conflictos derivados de esta situación tienen que ver con una cuantificación precisa y confiable de los volúmenes líquidos involucrados en las diversas aplicaciones técnicas que se realizan para aprovechamiento y control.

La medición de los caudales y/o de los volúmenes de agua en un proceso de aprovechamiento o tratamiento de aguas residuales cobra cada vez mayor importancia, por lo que las técnicas y equipos de medición precisos, económicos, de fácil operación en campo y durables, son requeridos con mayor insistencia para proporcionar respaldo y sustento técnico a las formas de operación y distribución de este vital recurso.

En este marco, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) en colaboración con la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) impulsaron la realización de un estudio experimental de medidores de flujo que fue materializado en el laboratorio de Hidráulica “Ing. David Hernández Huéramo” de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH, con la finalidad de conocer a mayor detalle el funcionamiento y los límites de operación y medición de algunos de los medidores de flujo más utilizados en nuestro país, entre los que se encuentran los aforadores Aquacontrol, el medidor de flujo de efecto Doppler, las compuertas tipo Amil y los aforadores tipo Parshall.

La presente tesis está enfocada a conocer el funcionamiento de los aforadores tipo Parshall, los cuales son dispositivos de medición y regulación de caudales. Su uso se extiende a regular y medir el caudal en canales de riego y para medir el gasto de los cauces no navegables, drenajes, vertidos libres, etcétera. Cabe mencionar que los aforadores Parshall son dispositivos muy confiables y de fácil operación, siempre y cuando se elija el tipo de aforador apropiado, para lo cual se deben tomar en cuenta una serie de condiciones a cumplir las cuales nos marcarán el tipo de aforador requerido para resolver las necesidades particulares de cada caso. Sin embargo a pesar del extenso uso que tienen los aforadores Parshall, en nuestro país principalmente son utilizados en la descarga de aguas negras.

En la República Mexicana existe un universo de aforadores tipo Parshall operando en la descarga de aguas residuales; según datos proporcionados por el Instituto

Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) alrededor de 12,000 aforadores trabajan en la descarga de aguas negras, ante estos datos es necesario conocer y saber el modo de operación de dichos dispositivos aforadores, así nos podremos dar cuenta si realmente funcionan en óptimas condiciones, para lo cual dichos aforadores deben ser verificados desde su construcción hasta su operación.

Existe una Norma Internacional de la International Standard Organization (ISO) que marca los lineamientos a seguir para saber si dichos aforadores cumplen con los estándares internacionales, dicha Norma Internacional es la *ISO 9826 "Medición de la circulación de líquidos en vías abiertas - Canales Parshall y SANIIRI"*, la cual nos marca los parámetros de diseño, instalación y operación para el correcto funcionamiento de los aforadores tipo Parshall. La gran mayoría de los aforadores existentes no cumplen con la Norma Internacional 9826 ya que es muy restrictiva en cuanto a los márgenes de error que pueden existir en la construcción y los errores en la medición del flujo.

La ISO 9826 hace mención a dos tipos de aforador el Parshall y el SANIIRI, y ya que la presente tesis fue elaborada exclusivamente para observar el comportamiento del aforador Parshall, a continuación nos limitaremos a dar una breve reseña del canal SANIIRI y la principal diferencia existente entre el aforador Parshall y el SANIIRI. Los aforadores SANIIRI tienen una sección transversal rectangular y consisten en una sección convergente en la entrada con un piso nivelado el cual tiene una caída en su extremo en sentido descendiente. La ausencia de una garganta y de una sección de divergencia de salida significa que los aforadores SANIIRI son más simples en diseño que los aforadores Parshall.

Es posible que en la construcción del aforador Parshall *"in situ"*, o en su fabricación modular, se puedan tener pequeños defectos constructivos o la presencia de factores que produzcan perturbaciones al flujo aguas arriba de la entrada al medidor.

Por ello, es necesario, mediante la vía experimental, conocer el comportamiento del aforador para cada una de las alteraciones, ya sea en su construcción o en el flujo de llegada. Para lo cual se plantea un estudio experimental del efecto de este tipo de factores en la precisión de la medición.

De acuerdo a lo anterior, en el presente trabajo se plantea como objetivo principal hacer un estudio experimental comparativo del funcionamiento del aforador tipo Parshall, según la ISO 9826, en sus condiciones originales de diseño y su funcionamiento con las alteraciones que pueden resultar de pequeños errores en el procedimiento de construcción como ya se ha mencionado antes y con alteraciones en el flujo aguas arriba de la entrada del aforador.



Figura 1. Aforador tipo Parshall trabajando a descarga libre en campo

CAPÍTULO 2.- CANAL AFORADOR TIPO PARSHALL

Introducción

La construcción, condiciones de instalación y operación de los aforadores Parshall se encuentra regida por la Norma Internacional ISO 9826, en la que se marcan las características a cumplir para que los medidores proporcionen la certidumbre y precisión determinadas de forma teórico-experimental en su funcionamiento.

Esto quiere decir que todos los aforadores Parshall deben cumplir con las especificaciones de diseño que en ella se establecen, por lo que a continuación presentamos un resumen de la Norma, exponiendo los aspectos más relevantes que se deben seguir en la construcción y en la operación de los aforadores Parshall.

2.1 Norma Internacional ISO 9826 “Medición de la circulación de líquidos en vías abiertas - Canales Parshall y SANIIRI”

RESUMEN

2.1.1 Alcance.

Esta Norma Internacional especifica los métodos de la medición de circulación líquida en canales abiertos (particularmente en canales de irrigación) bajo las condiciones de circulación de flujo regulares o variando las condiciones de flujo, usando aforadores Parshall y canales tipo SANIIRI.

Estos canales son diseñados para operar bajo condiciones de descarga libre y descarga ahogada.

2.1.2 Definiciones y símbolos.

Para los propósitos de esta Norma Internacional, las definiciones y los símbolos dados en ISO 772 (*“Liquid flow measurement in open channels – Vocabulary and symbols”*) y las siguientes definiciones son aplicables.

Aforador Parshall: Aforador que tiene una sección de entrada convergente con un piso nivelado, una sección de garganta pequeña con un piso inclinado hacia abajo en una pendiente de 3:8, y sección de salida divergente con un piso inclinado hacia arriba en una pendiente de 1:6.

2.1.3 Selección del tipo de aforador.

La opción de elegir si un Parshall o un SANIIRI debe ser utilizado depende de varios factores tales como la gama de la descarga que se medirá, la altura disponible, el límite modular y el cociente máximo de sumersión, el canal o características del canal, las pérdidas de carga que se pueden permitir a través del aforador, la exactitud de la medida requerida, si el flujo lleva o no sedimentos, las condiciones de funcionamiento que hacen necesario el uso de aforadores fijos o portables, y consideraciones económicas.

Los aforadores parshall tienen una sección representativa rectangular, y una amplia gama de las anchuras de la garganta que varían de muy pequeño (0.0254m) a grande (15m y mayores).

Hay aforadores Parshall de tamaño mediano, con anchuras de la garganta entre 0.15m y cerca de 2.5m, los cuáles son convenientes para las descargas que miden a partir de $0.0015 \text{ m}^3/\text{s}$ a $4.0 \text{ m}^3/\text{s}$, estos son los mas comúnmente usados para las medidas de flujo; dichos aforadores son recomendados en esta Norma Internacional como “estructuras estándar”.

También existen aforadores Parshall grandes con anchuras de la garganta entre los 3m y 15m, el diseño varía dependiendo de que el tamaño del aforador sea conveniente para las descargas que miden entre $0.75 \text{ m}^3/\text{s}$ a $93 \text{ m}^3/\text{s}$.

Una de las características más confiables del aforador Parshall es que funciona satisfactoriamente con altos cocientes de sumersión con bajas pérdidas de carga. Sin embargo el complicado diseño de este aforador (ver figura 1) hacen que las desventajas al ser tan complicada su construcción se algo las ventajas que ofrece.

2.1.4 Instalación

Selección del sitio.

El aforador será situado en una sección recta del canal, evitando obstrucciones locales, y aspereza o desigualdad en la plantilla del canal.

Deberá hacerse un estudio preliminar de las características físicas e hidráulicas del sitio propuesto, para comprobar que cumple (o puede ser construido o ser modificado para cumplir) con los requisitos necesarios para medir la descarga que circulará por el aforador. Habrá que prestar particular atención a las características siguientes al seleccionar el sitio:

- a) la suficiencia de la longitud del canal en la sección representativa regular y la pendiente disponibles;
- b) la uniformidad de la distribución de la velocidad existente;
- c) las condiciones aguas abajo (incluyendo influencias tales como mareas, estructuras del control, etc.);
- d) la impermeabilidad de la tierra en la cual la estructura debe ser colocada y la necesidad de utilizar viruta, mampostería u otro material para controlar la filtración;
- e) la estabilidad de los bancos o de las cuestas laterales del canal, y la necesidad para el ajuste y/o el revestimiento;
- f) la necesidad de bancos de inundación, para confinar la descarga máxima al canal y el remanso causados por la instalación del aforador;
- g) el efecto del viento en el flujo que pasa por el aforador, especialmente cuando el aforador es ancho y la cabeza es angosta y cuando el viento predominante está en dirección transversal a la dirección del flujo;
- h) crecimiento acuático de la mala hierba;
- i) transporte de sedimentos por el flujo.

Condiciones de instalación

Requisitos generales

La instalación completa para realizar las mediciones consiste en un canal de acercamiento, una estructura aforadora y un canal en sentido descendente. La condición de cada uno de estos tres componentes afecta la exactitud total de las medidas. Además, las características tales como el final superficial del aforador, la forma de la sección transversal del canal y la aspereza del canal serán tomadas en consideración.

Canal de llegada

El canal de llegada al aforador se conformará con los requisitos siguientes.

- a) Será recto y uniforme y tendrá una recta constante con una longitud igual a cinco y hasta diez veces la anchura de la superficie del agua en el flujo máximo.
- b) La pendiente en la plantilla será para asegurar un flujo subcrítico con un número de Froude Fr menor a 0.5 (o 0.7), donde:

$$Fr = \frac{Q_{\max}}{A\sqrt{gh_{\max}}}$$

donde:

$Q_{\max}$	es el gasto máximo de descarga;
A	es el área de la sección transversal del canal;
$h_{\max}$	es la máxima profundidad del agua.

Estructura del aforador

La estructura será rígida y hermética y capaz de soportar las condiciones de inundación sin peligro de desbordar el flujo o presentar erosión aguas abajo. El eje estará en línea con la dirección del flujo del canal aguas arriba, y la geometría se conformará con las dimensiones dadas en la tabla 1 como apropiados.

Las superficies del aforador, particularmente las de la sección de entrada y la garganta, serán lisas. El aforador se puede construir de concreto con un acabado liso o se puede emerger con un material no-corrosible liso. En instalaciones de laboratorio, el acabado será equivalente al de una hoja de metal o de madera cepillada, enarenada y pintada. El acabado superficial es de importancia particular dentro de la sección de la garganta.

Para reducir al mínimo la incertidumbre en la medición de la descarga, deberán cumplirse las siguientes tolerancias en la construcción del aforador:

- a) en la anchura inferior b de la garganta: 0.2% de b con un máximo absoluto de 0.01m;
- b) en desviaciones del punto de la superficie plana en la garganta: 0.1% de l ;
- c) en la anchura entre las superficies verticales en la garganta: 0.2% de esta anchura con un máximo de 0.01m;
- d) en las cuestas longitudinales y transversales de la base de la garganta: 0.1%;
- e) en la cuesta de superficies inclinadas en la garganta: 0.1%;
- f) en la longitud de la garganta: el 1% de l ;
- g) en desviaciones del punto de la superficie plana en la transición de entrada a la garganta: 0.1% de l ;
- h) en desviaciones del punto de la superficie plana en la transición de salida de la garganta: 0.3% de l ;
- i) en desviaciones de un plano o de una curva en otras superficies verticales o inclinadas: el 1%;
- j) en la desviación de un plano de la cama del canal en línea con el canal de acercamiento: 0.1% de l ;

La estructura será medida una vez terminada la construcción, y los valores medios de dimensiones relevantes y de sus desviaciones estándar en los límites de confianza del 95% serán computados. Los valores medios de dimensiones serán utilizados para el cómputo de la descarga y sus desviaciones estándar serán utilizadas para obtener la incertidumbre total en la determinación de la descarga.

Aguas abajo de la estructura

Las condiciones del flujo aguas abajo de la estructura son importantes ya que controlan el nivel del agua que puede influenciar la operación del aforador. El aforador será diseñado para que no pueda ahogarse bajo condiciones de funcionamiento normales a excepción de un período de tiempo limitado, por ejemplo durante las inundaciones. La construcción de un aforador en un río o una corriente puede llegar a alterarse en las condiciones de flujo aguas arriba y en sentido descendiente de la estructura. Esto puede dar lugar a la acumulación de material en la plantilla del río aguas abajo, con el tiempo, puede aumentar el nivel de agua lo suficientemente para ahogar el aforador, particularmente en los regímenes bajos. Cualquier acumulación de material deberá ser quitada antes de que llegue a ser excesiva.

2.1.5 Mantenimiento – Requisitos generales

El mantenimiento de la estructura de medición y del canal de acercamiento es importante para asegurar que las medidas sean exactas.

Es esencial que, donde sea posible, el canal de acercamiento hacia los aforadores se mantenga limpio y libre de sedimentos y de la vegetación a la distancia mínima especificada.

2.1.6 Aforadores Parshall

Descripción

Los aforadores Parshall tienen una sección transversal rectangular y consisten en una sección convergente de entrada, una garganta y la sección de divergencia de salida (véase la figura 2).

El piso de la sección de entrada debe ser nivelado longitudinalmente y lateralmente. Las paredes laterales serán verticales y dispuestas a un ángulo

constante a la convergencia de $11^\circ 19'$ o tendrán una contracción de 1:5 en el plano con respecto al eje del aforador.

Las paredes laterales de la garganta serán paralelas en el plano. El piso tendrá una pendiente hacia abajo con un gradiente de 3:8; esto se aplica a los aforadores de todos los tamaños. La línea de intersección entre el piso de la sección de la entrada con el piso de la garganta se conoce como la cresta del aforador. La elevación de la cresta sobre la garganta invertida se refiere como la altura de la cresta h_{p1} del aforador.

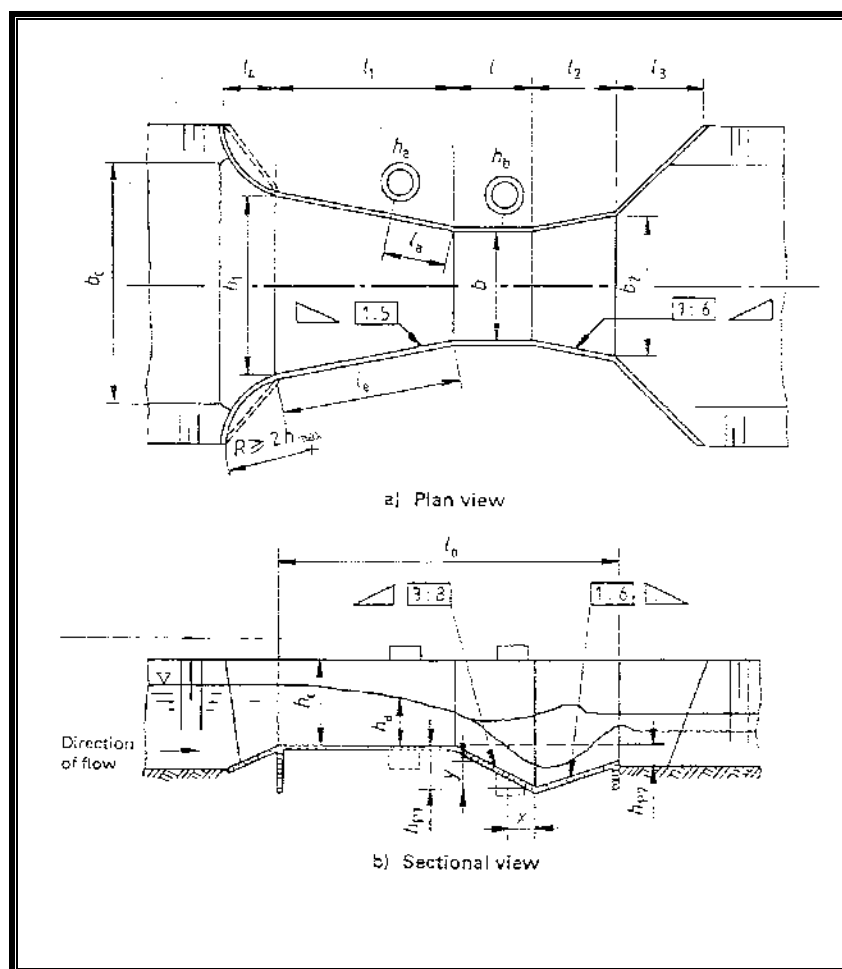


Figura 2. Aforador Parshall

Las paredes laterales de la sección de la salida serán verticales y dispuestas a un ángulo de divergencia constante de $9^\circ 28'$ o tendrán una extensión de 1:6 en el

plano con respecto al eje del aforador. El piso tendrá una pendiente hacia arriba con un gradiente reverso de 1:6; esto se aplica a los aforadores de todos los tamaños.

Para asegurar una entrada lisa del flujo en el aforador y para prevenir el disturbio superficial en la salida del aforador, la entrada y las secciones representativas de la salida serán conectadas con los bancos naturales del canal o las paredes laterales del canal artificial por las paredes verticales del ala dispuestos en 45° al eje del saetín o curvados en el plano con un radio $R \geq 2h_{\max}$ (véase la figura 1). Para tamaños más pequeños de aforadores con anchuras de la garganta de menos de 0.5m, las paredes del ala se pueden poner perpendicularmente al eje del aforador.

Los aforadores Parshall se pueden construir de madera, de piedra, de concreto, de concreto reforzado, o de cualquier otro material dependiendo de las condiciones que prevalecen. Los aforadores pequeños Parshall se pueden construir de lámina de metal y utilizar como estructuras portables. Los aforadores hechos de concreto reforzado se pueden prefabricar para su ensamble en el campo.

Dimensiones

Los aforadores Parshall tienen una característica específica en la que los aforadores no son modelos geométricos similares a ningún otro. La longitud de la garganta, la altura de la cresta y la longitud de la sección de la salida siguen siendo constantes para una serie de aforadores mientras que otras dimensiones varían en función de la anchura de la garganta; estas otras dimensiones se pueden determinar analíticamente.

Es esencial utilizar los aforadores calibrados contruidos de acuerdo con las dimensiones especificadas en las tabla 1 para los aforadores estándares Parshall.

Tabla 1 – Dimensiones para aforadores Parshall estándares

Dimensiones en metros

Aforador Parshall No.	Garganta					Sección de entrada				Sección de salida			Altura de la pared lateral
	b	l	X	Y	h_{p1}	b_1	l_1	l_0	l_a	b_2	l_2	h_{p2}	h_c
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0.152	0.305	0.05	0.075	0.115	0.40	0.610	0.622	0.415	0.39	0.61	0.012	0.60
2	0.250	0.600	0.05	0.075	0.230	0.78	1.325	1.352	0.900	0.55	0.92	0.072	0.80
3	0.300	0.600	0.05	0.075	0.230	0.84	1.350	1.377	0.920	0.60	0.92	0.072	0.95
4	0.450	0.600	0.05	0.075	0.230	1.02	1.425	1.454	0.967	0.75	0.92	0.072	0.95
5	0.600	0.600	0.05	0.075	0.230	1.20	1.500	1.530	1.020	0.90	0.92	0.072	0.95
6	0.750	0.600	0.05	0.075	0.230	1.38	1.575	1.607	1.074	1.05	0.92	0.072	0.95
7	0.900	0.600	0.05	0.075	0.230	1.56	1.650	1.683	1.121	1.20	0.92	0.072	0.95
8	1.000	0.600	0.05	0.075	0.230	1.68	1.700	1.734	1.161	1.30	0.92	0.072	1.00
9	1.200	0.600	0.05	0.075	0.230	1.92	1.800	1.836	1.227	1.50	0.92	0.072	1.00
10	1.500	0.600	0.05	0.075	0.230	2.28	1.950	1.989	1.329	1.80	0.92	0.072	1.00
11	1.800	0.600	0.05	0.075	0.230	2.64	2.100	2.142	1.427	2.10	0.92	0.072	1.00
12	2.100	0.600	0.05	0.075	0.230	3.00	2.250	2.295	1.534	2.40	0.92	0.072	1.00
13	2.400	0.600	0.05	0.075	0.230	3.36	2.400	2.448	1.632	2.70	0.92	0.072	1.00

Aforadores Parshall estándares.

El tamaño de un aforador estándar particular de Parshall es denotado por su ancho de garganta b (véase la tabla 1, columna 2).

Para la serie de aforadores estándares tipo Parshall que tienen anchos b de la garganta a partir de 0.250m a 2.400m (véase la tabla 1, columna 1, No. 2 a 13) las dimensiones principales son idénticas, p.ej. la longitud de la garganta l (columna 3), la altura de la cresta h_{p1} (columna 6), los coordenadas X y Y de la sección transversal de la garganta en el pozo de calma de la tubería usada para la medida del h_b principal (columnas 4 y 5), la longitud axial de la sección de salida l_2 (columna 12), la altura h_{p2} (columna 13), la pendiente del piso de la garganta (3:8) y la pendiente inversa del piso de la sección de la salida (1:6).

Las otras dimensiones de estos aforadores (No. 2 a 13) se calculan usando las ecuaciones siguientes.

- a) Anchura, en metros, de la sección representativa de entrada del aforador.

$$b_1 = 1.2b + 0.48 \quad \dots (1)$$

b) Longitud axial, en metros, de la sección de la entrada.

$$l_1 = 0.5b + 1.2 \quad \dots (2)$$

c) Longitud convergente de la pared, en metros.

$$l_e = 1.02 l_1 \quad \dots (3)$$

d) Longitud de la pared, en metros, entre la cresta y la altura h_a de la sección de medición.

$$l_a = 2l_e/3 \quad \dots (4)$$

e) Anchura, en metros, de la sección transversal de salida del aforador.

$$b_2 = b + 0.30 \quad \dots (5)$$

f) Altura de la pared lateral, en metros, en la sección de entrada.

$$h_e = h_{a \max} + (0.15 \text{ a } 0.20) \quad \dots (6)$$

Se recomienda que una tolerancia de hasta 1 m esté proporcionada en la altura de las paredes laterales para evitar el riesgo de derrame de flujo cuando atraviere el aforador y que el gasto esté en el exceso de la descarga máxima del diseño.

Medición de la carga y límites de aplicación

La descarga a través de un aforador Parshall es determinada al medir las cargas en la sección de entrada (carga aguas arriba, h_a) y en la sección de la garganta (carga aguas abajo, h_b). Si una o ambas cargas tienen que ser medidas depende de las condiciones del flujo en el aforador.

Para las condiciones de flujo libre, solamente la carga h_a necesita ser medida. La sección para la medición de la carga h_a será localizada a una distancia l_a medida a lo largo de la pared oblicua contra la corriente de la cresta del aforador [la distancia l_a se puede calcular usando la fórmula (4) y la fórmula (7)]. La gama recomendada de las cargas h_a se especifica en las tablas 3 y 4.

Donde la alta exactitud de las medidas no tiene gran importancia, fije una escala verticalmente en la sección principal de la medición en la cara interior de la pared convergente de la entrada, esta escala puede ser utilizada determinar la carga h_a . La escala será puesta a cero cuidadosamente con respecto a la elevación de la

cresta del aforador, la cuál es la elevación del piso horizontal del aforador en el extremo aguas abajo de la sección de la entrada.

Donde se requiere la mayor exactitud o donde necesitan ser utilizados los instrumentos de la continuidad o los dispositivos de la etapa, la consideración será dada a proporcionar un pozo que de calma. Para conectar bien el pozo de calma con el flujo en el aforador, la longitud de la tubería que se usará, su entrada será situada en la posición recomendada para la medida de la carga, cerca del piso de la sección de la entrada (véase la tabla 1)

Si un aforador Parshall va a ser utilizado bajo condiciones de flujo sumergido, se requiere la medida de las cargas h_a y h_b . La sección para la medida de la carga h_b será situada en la garganta, a una distancia X de la garganta invertida. Puesto que el flujo en la garganta es absolutamente turbulento, el cual causa la fluctuación considerable de la superficie del agua, es indeseable utilizar una escala para la medida del h_b . Por lo tanto, un pozo de calma es necesario.

Condiciones de flujo libre y flujo sumergido.

La descarga a través de un aforador Parshall se considera ser de flujo libre cuando es independiente de variaciones en nivel de agua. En un aforador Parshall que funciona bajo condiciones de flujo libre, el flujo en la sección de la entrada es subcrítico, con las profundidades disminuyendo en la dirección del flujo hasta que la profundidad crítica se alcanza cerca de la cresta del aforador. Más allá de la cresta, en la sección de la garganta, las profundidades son subcríticas (véase el cuadro 1). Las condiciones de flujo libre existirán hasta que la carga aguas abajo aumenta al punto donde hace el cociente de sumersión ($\sigma = h_a/h_b$) al llegar a ser igual al límite modular σ_c , es decir.

$$\sigma_c = h_a/h_b \quad \dots (7)$$

Cuando sucede esto el flujo en la sección de salida y en la parte mayor de la garganta se ahoga (véase la figura 1).

Con una mayor carga uniforme en sentido descendiente, las condiciones de flujo sumergido se extenderán más lejos de la sección de entrada contra la corriente y de tal modo reducirán la descarga a través del aforador. En un aforador que funciona bajo las condiciones de flujo sumergido, la descarga que se medirá depende del cociente de sumersión σ .

La determinación de la descarga bajo las condiciones de flujo sumergido es posible con la condición de que el cociente de sumersión no sea igual o mayor de 0.95.

Con cocientes más altos de sumersión el aforador deja de funcionar como una estructura medidora de flujo en descarga libre.

Debe ser observado que un aforador que funciona bajo condiciones de flujo sumergido ofrece la ventaja de la pérdida de carga más baja. Sin embargo, las condiciones de flujo sumergido hacen que las medidas de la descarga sean menos exactas que las realizadas bajo condiciones de flujo libre. Es recomendable elegir las dimensiones de un aforador de modo que funcione bajo condiciones de flujo sumergido solamente por un período de tiempo limitado, por ejemplo durante las inundaciones.

Determinación de la descarga.

Determinación de la descarga bajo condiciones de flujo libre.

La descarga a través de un aforador Parshall que funciona bajo condiciones de flujo libre (es decir $\sigma < \sigma_c$) se obtiene de la ecuación general siguiente:

$$Q = C_D h_a^n \quad \dots (8)$$

donde:

Q	es la descarga, en metros cúbicos por segundo;
h_a	es la carga en la sección de entrada, en metros;
C_D	es el coeficiente de descarga;
n	es un exponente que depende de b.

Determinación de la descarga bajo condiciones de flujo sumergido.

La descarga a través de un aforador Parshall que funciona bajo condiciones de flujo sumergido es afectada en la carga en sentido aguas abajo y obtenida así por medio de un ajuste en la descarga libre:

$$Q_{dr} = Q - Q_E \quad \dots (9)$$

donde:

Q_{dr}	es la descarga sumergida;
Q	es la descarga libre obtenida de la fórmula (9) ;
Q_E	es la reducción en la descarga como resultado de la sumersión.

2.1.7 Incertidumbres en la medida del flujo

General

En general, los componentes de las incertidumbres que se presentan de varias fuentes del error se pueden determinar para obtener una valoración de la incertidumbre total en la medida de la descarga. Esta incertidumbre total permitirá el juicio o si la descarga se puede medir con la suficiente exactitud para el propósito a disposición. La cláusula 7 (véase ISO 9826) se plantea para proporcionar la suficiente información a el usuario de este estándar internacional, para estimar la incertidumbre en una medida de la descarga (véase también ISO 5168).

La incertidumbre total se puede definir como la diferencia entre la descarga verdadera y la calculada de acuerdo con las ecuaciones usadas para calibrar el aforador, que se asume para ser construido y para ser instalado de acuerdo con estándar internacional.

Fuentes de error

Las únicas fuentes de error que necesitan ser consideradas son:

- a) el coeficiente de la descarga C_D ;
- b) las medidas de las dimensiones del aforador, por ejemplo la anchura de la garganta, b , del aforador;
- c) la medida de la carga h .

Tipos de error

Los errores se pueden clasificar como al azar o sistemáticos, el anterior que afecta la precisión de la medida y el último afectando su exactitud verdadera.

Incertidumbres en valores del coeficiente de descarga (C_D)

Los valores presentados en este estándar internacional para los varios coeficientes en las ecuaciones de la descarga para los aforadores Parshall y SANIIRI fueron obtenidos empíricamente en base a experimentos, que se han realizado cuidadosamente, con la suficiente repetición de las lecturas para asegurar la precisión adecuada. Sin embargo, cuando las medidas se hacen en otras

instalaciones similares, las discrepancias sistemáticas entre los coeficientes de descarga pueden ocurrir debido a variaciones en acabado de la superficie del dispositivo, de su instalación, de las condiciones del flujo del acercamiento, del efecto de la escala entre el modelo y las estructuras del sitio, etc.

Las incertidumbres en los coeficientes de descarga (C_D) presentadas en este estándar internacional se calculan en base a la desviación de los datos experimentales (de varias fuentes) de las ecuaciones teóricas dadas y están en el conjunto sistemático. La incertidumbre sistemática del porcentaje en C para los aforadores Parshall X''_C está entre el 2% y el 4%.

Incertidumbres en las mediciones hechas por el usuario

Los errores al azar y sistemáticos ocurrirán en las medidas hechas por el usuario.

Puesto que ni los métodos de medida ni la manera en la cual deben ser hechos se especifica, ningunos valores numéricos para las incertidumbres en esta categoría pueden ser dados; por lo tanto serán estimados por el usuario. Por ejemplo, la consideración del método de medida de la anchura del aforador debe permitir que el usuario determine la incertidumbre en esta cantidad.

La incertidumbre en el valor de la carga medida con una escala calibrada será determinada de un gravamen de las fuentes del error individuales, por ejemplo la incertidumbre en la determinación del cero en la escala, la libertad del diagonal y de la capacidad de repetición del aparato de medición (de cuál es un elemento el contragolpe mecánico del equipo importante), las fluctuaciones del nivel que se medirá, etc. La incertidumbre en la carga calibrada es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las incertidumbres individuales. Esta incertidumbre puede ser pequeña si se utiliza un vernier o un instrumento del micrómetro, con una determinación cero de la exactitud comparable.

La incertidumbre en la medida dimensional del aforador (esencialmente la anchura b) dependerá de la exactitud con la cual el dispositivo construido puede ser medido. En la práctica, esta incertidumbre puede demostrar a menudo ser insignificante en comparación con otras incertidumbres.

Todas las fuentes que contribuyen incertidumbres tendrán componentes al azar y sistemáticos. Sin embargo, en algunos casos, el componente al azar o sistemático puede ser predominante y el otro componente se puede descuidar en la comparación.

2.2 CANAL AFORADOR TIPO PARSHALL

2.2.1 Descripción.

Un aforador tipo Parshall es un sistema tipo canal diseñado para la determinación precisa de caudales en canales abiertos, es adecuado para la medición del caudal en los canales de riego o en las corrientes naturales con una pendiente suave. El aforador tipo Parshall puede ser instalado en una zanja, un canal o un lateral.

Sus principales ventajas son:

- Que sólo existe una pequeña pérdida de carga a través del aforador
- Que deja pasar fácilmente sedimentos o desechos
- Que no necesita condiciones especiales de acceso o uno pozo de amortiguación
- Que no necesita correcciones para un sumergimiento de hasta el 70%

El canal Parshall está constituido por tres partes fundamentales que son: la entrada o sección convergente, la garganta, y la salida o sección divergente.

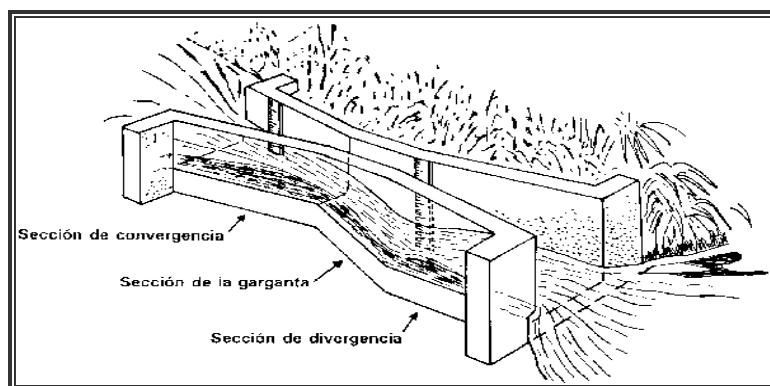


Figura 3. Secciones que conforman al aforador Parshall

Nomenclatura de las partes del aforador Parshall

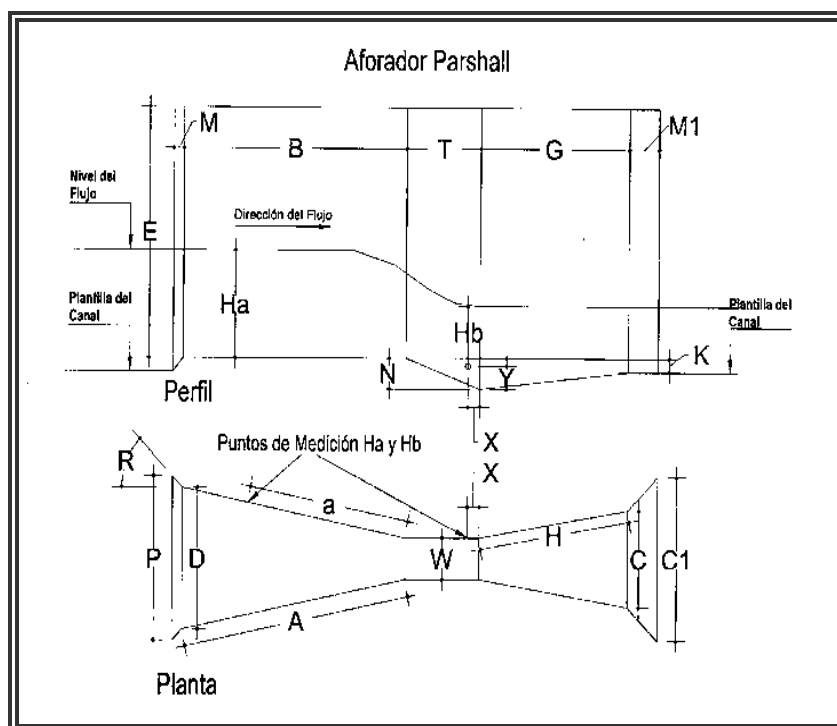


Figura 4. Vista en perfil y en planta del aforador Parshall y su nomenclatura

NOMENCLATURA

W = Ancho de la garganta

A = Longitud de las paredes de la sección convergente

a = Ubicación del punto de medición H_a

B = Longitud de la sección convergente

C = Ancho de la salida

D = Ancho de la entrada de la sección convergente

E = Profundidad total

T = Longitud de la garganta

G = Longitud de la sección divergente

H = Longitud de las paredes de la sección divergente

K = Diferente de elevación entre la salida y la cresta

M = Longitud de la transición de entrada

N = Profundidad de la cubeta

P = Ancho de la entrada de la transición

R = Radio de curvatura

X = Abscisa del punto de medición H_b

Y = Ordenada del punto de medición

2.2.2 Especificaciones de instalación física

Características del flujo del canal

Para garantizar la exactitud de las mediciones, debemos asegurarnos de que el lugar en el que se pretende colocar el modelo experimental cumpla con los requisitos de instalación, por lo cuál se debe verificar lo siguiente:

- Que el sitio de ubicación del aforador permita grandes pérdidas de carga para absorber el remanso y así usar una relación única de tirante y gasto.
- Es necesario saber si el sitio de ubicación del aforador está influenciado por la operación de compuertas sobre el canal.
- Se debe conocer el mínimo y máximo gasto que circula por el canal, la velocidad máxima, y las dimensiones del canal en el sitio de ubicación del aforador.
- El tramo seleccionado del canal debe ser estable.
- La corriente aguas arriba debe ser uniforme, es decir que antes del medidor se debe tener un tramo recto y sin obstáculos, lo cuál nos garantiza que las mediciones sean confiables.
- Es necesario tener por lo menos un tramo recto de cinco a diez veces el ancho del canal.

2.2.3 Pruebas de calibración y precisión

Verificación de funcionamiento

Cuando se quiera verificar el buen funcionamiento de un aforador, se propone lo siguiente:

- a) Se deben medir todas las partes del aforador identificando primeramente el ancho de la garganta.
- b) Una vez identificado el ancho de la garganta se procede a entrar a la tabla de medidas y comparar la totalidad de las medidas del aforador.
- c) Regresar al aforador y verificar que todas las medidas sean correctas. Las medidas deben ser las mismas. Si se tienen diferencias, éstas no deben ser significativas especialmente para aforadores pequeños.

- d) Es básico revisar que las escalas tengan su “cero” coincidiendo con el nivel de la parte horizontal del aforador (cresta).
- e) Es necesario verificar que la ecuación que se usa es la adecuada para el ancho del vertedor.
- f) Si el vertedor trabaja ahogado se debe verificar que se realice la corrección del gasto.

2.2.4 Ventajas y desventajas

- 1) El diseño de la estructura es simple.
- 2) Puede estimarse el gasto con una buena precisión, ya que cuando trabaja ahogado, el error no pasa del 5%, y cuando trabaja libremente el error es menor del 3%.
- 3) Los sedimentos que trae el agua no se depositan, ya que la transición de salida aumenta la velocidad, eliminando los azolves en la estructura.
- 4) La velocidad de llegada no influye en el cálculo del gasto.
- 5) La pérdida de carga es mucho menor que en otros medidores.
- 6) Es difícil alterar la medición.
- 7) Es menos caro que el aforador de garganta larga para la misma capacidad.

Su principal desventaja es que la construcción del aforador debe hacerse de acuerdo a medidas estándar especificadas en la ISO 9826, lo cuál dificulta y encarece su construcción, además no puede combinarse con estructuras de derivación o control.

CAPÍTULO 3.- IMPORTANCIA Y APLICACIÓN DE AFORADORES PARSHALL PARA LA MEDICIÓN DE FLUJOS A SUPERFICIE LIBRE

3.1 Introducción

Para que una obra destinada a medir o regular el caudal de un canal funcione bien, habrá de ser convenientemente elegida. Deberán relacionarse todas las condiciones que haya que cumplir y cubrirlas con las características de los medidores conocidos, en este caso el canal aforador tipo Parshall.

En general, estas exigencias provienen de cuatro fuentes:

1. De las características hidráulicas.
2. De los costos de construcción y/o de instalación.
3. De la facilidad de manejo del medidor.
4. De los gastos de mantenimiento.

Una obra de aforo debe cumplir con distintas funciones, en caso la principal función, es la medición de caudal.

3.2 Medición de caudales

Todos los vertedores y aforadores son ejemplos de instalaciones para medir el caudal. Para determinar el tipo específico de obra a adoptar, si es que hay alguno, debemos primero, conocer durante que período y con que frecuencia deben realizarse las mediciones. Esto, unido a la información sobre el tamaño y tipo de canal en el que han de medirse los caudales, nos llevará a utilizar:

1. El método de la velocidad-área de la sección.
2. Un dispositivo portátil y reutilizable.
3. Una obra de uso temporal hecha a la medida.
4. Una obra de uso permanente.

Si se desea medir el volumen total, puede utilizarse un vertedor o un aforador (en éste caso tipo Parshall), a cuyo limnómetro se le puede acoplar un instrumento, que acumule los diferentes caudales, durante cualquier intervalo de tiempo.

3.3 Gama de caudales a medir

El caudal en un canal abierto suele variar en el tiempo. Los límites entre $Q_{\max}$ y $Q_{\min}$ en los que puede medirse el gasto dependen, en gran parte, de la naturaleza del canal en el que se instala la obra de aforo.

3.4 Sensibilidad de la obra de medición

La precisión con la que puede medirse un caudal circulante depende de:

- La exactitud con la que pueda confeccionarse la tabla de valoración de los caudales para tal instalación, y;
- La exactitud con la que pueda medirse la altura de carga de aguas arriba.

3.5 Capacidad de eliminación de sedimentos

Casi todos los canales abiertos, además de agua, transportan sedimentos que, ordinariamente, reciben denominaciones diversas, según la forma o proceso de transporte o sea según su origen, los sedimentos transportados se definen de la manera siguiente:

- Arrastres de fondo. Consisten en un transporte de partículas de sedimentos que se deslizan, ruedan o rebotan sobre la plantilla del canal, o cerca de ella, generalmente en forma de lecho móvil, semejante a las dunas y crestas de arena.
- Arrastre de sólidos en suspensión. Por “arrastres suspendidos” se entiende el transporte de partículas de fondo, cuando la fuerza de gravedad está contrarrestada por otras fuerzas ascendentes, debidas a la turbulencia de la corriente de agua. Esto supone que tales partículas pueden dar rebotes más o menos grandes pero, siempre vuelven a caer a la plantilla del canal, aunque en ese momento, sin embargo, otras partículas arrastradas puedan encontrarse en suspensión.
- Carga sólida total. No es posible hacer una separación estricta entre los arrastres de fondo y los sólidos en suspensión pues, de hecho, en ambos casos, son similares los mecanismos por los que se mueven las partículas. Por ello es frecuente calcular la carga sólida total como la suma de los dos arrastres mencionados.

3.6 El paso de cuerpos flotantes y en suspensión.

Los canales abiertos, especialmente los que atraviesan bosques o zonas urbanizadas, transportan toda clase de cuerpos flotantes o en suspensión. Si estos cuerpos quedan retenidos por el limnómetro o por la propia obra de aforo, tanto el canal de llegada como la sección de control quedan atascados, con lo que se reduce la posibilidad de medición de caudales en el dispositivo y se producen desbordamientos del canal aguas arriba.

Para evitar la retención de los materiales arrastrados, la escala limnimétrica no debe interferir con el curso del agua.

3.7 Exactitud necesaria entre las medidas

La exactitud con la que es posible aforar un caudal mediante una instalación dada está limitada por la precisión con la que pueda efectuarse una medida. Si se construyen dos obras de medición idénticas e independientes y se hace pasar por ellas dos corrientes que tengan exactamente la misma altura de carga con respecto al nivel de sus resaltos, lo normal es que los dos caudales medidos sean diferentes.

Errores sistemáticos

Si, por ejemplo, el limnómetro de medición de h_1 está colocado demasiado bajo, todos los valores “medidos” de h_1 serán, sistemáticamente, mayores que los verdaderos, en tanto no se verifique la posición del cero y se corrija la altura de la escala. Cualquier error sistemático puede corregirse, si se llega a conocer.

Errores aleatorios

Si dos personas leen el valor de h_1 en un limnómetro o en un gráfico del registrador, con frecuencia leerán valores diferentes, e incluso una tercera persona podría leer otro valor distinto. Algunos de estos valores leídos son superiores y otros inferiores al verdadero de h_1 . Dicho de otro modo, los valores leídos se distribuyen al azar en torno al verdadero valor de h_1 .

Errores por equivocación

Estos errores invalidan la medida del caudal y se deben a equivocaciones humanas, a defectos del funcionamiento de los limnógrafos automáticos o a obstrucciones del curso normal del agua.

Los errores de medición de la altura de carga aguas arriba pueden provenir de múltiples causas. Algunas de las más frecuentes son las siguientes:

- ***Colocación del cero***

Además del antes citado error de método en la colocación del cero de la escala, una cimentación inestable de toda la obra, o simplemente del dispositivo de medida de la altura de carga, pueden ser la causa de otro error, por desplazamiento de la posición del cero.

- ***Error en la lectura de la altura de carga***

En el error de la lectura de la escala limnimétrica, básicamente influyen la distancia entre ésta escala y el observador, el ángulo bajo el cual se realiza la lectura, la turbulencia del agua y el tamaño de las divisiones del limnímetro. Una escala sucia dificulta la lectura y puede ser causa de errores importantes, por lo que las regletas limnimétricas deben instalarse en lugares en los que resulte fácil su limpieza por el observador.

- ***Errores relacionados con la construcción***

Las dimensiones de construcción de las obras de aforo deben ser lo más ajustadas posible a las que se dan en las especificaciones de diseño. Cualquier variación de estas dimensiones influirá sobre el “error” entre el verdadero caudal y el que señalan las tablas.

CAPÍTULO 4.- DISEÑO E INSTALACIÓN DE LOS PROTOTIPOS DE PRUEBA

4.1 Descripción general

Antes de iniciar el proyecto de investigación, se definió el lugar de instalación del prototipo de prueba, desde un principio se pensó en un tramo del canal de flujo lento del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil, por lo que verificamos que el sitio cumpliera con las especificaciones marcadas en la ISO 9826 y en la Serie autodidáctica de medición: “Canal Parshall”, publicada por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua IMTA. Posteriormente se definió el tipo de material con que habría de construirse el modelo pensando en las diversas modificaciones que debían de hacerse al mismo para representar una serie de alteraciones ya fuera en el cuerpo geométrico o ya fuera en el flujo de llegada al aforador Parshall.

4.1.1 Elección del sitio

El primer paso para la elección del sitio donde instalaríamos el prototipo experimental, fue verificar que en el canal de flujo lento del Laboratorio de Hidráulica existiera un tramo recto de longitud considerable con la capacidad de permitirnos hacer las mediciones y las modificaciones necesarias, por lo tanto buscamos un tramo recto y sin obstáculos de una longitud mínima, que permitiera que el flujo fuera uniforme aguas arriba de la entrada al aforador. Dicho tramo debía tener por lo menos diez veces el ancho del fondo del canal, la sección transversal del tramo era rectangular lo cual facilitó su elección, a la par verificamos que no existieran obstáculos que pudieran afectar en el flujo de llegada.



Figura 5. Tramo recto donde se colocó el aforador

4.1.2 Elección del tamaño de aforador Parshall

Una vez definido el tramo del canal donde colocaríamos nuestro dispositivo aforador procedimos a determinar el tamaño de aforador a utilizar; teniendo nuestro tramo una longitud $l=4.00$ m , ancho de la plantilla del canal $b=0.40$ m y una altura de las paredes del canal $h=0.45$ m (con lo cual verificamos que se cumple la condición establecida en 4.1.1), con esos datos entramos a la tabla que marca las medidas estándares de los aforadores tipo Parshall, teniendo como resultado que existían tres tamaños de aforador que podrían ser utilizados en nuestro proyecto, basándonos en la información recabada y pensando en los diferentes tipos de pruebas a realizarse optamos por construir un canal Parshall de $w=76.2$ mm ($w=3$ ") de garganta, los otros aforadores eran más pequeños que dicho aforador y se hubiera dificultado la óptima realización de las diferentes pruebas.

Entonces se dio paso a la construcción del aforador con las siguientes medidas:

w	A	a	B	C	D	E	T	G	K	M	N	Dimensiones en cm				
												P	R	X	Y	
7.62	46.61	31.10	45.70	17.80	25.90	45.70	15.20	30.50	2.50	---	5.70	---	---	---	---	---

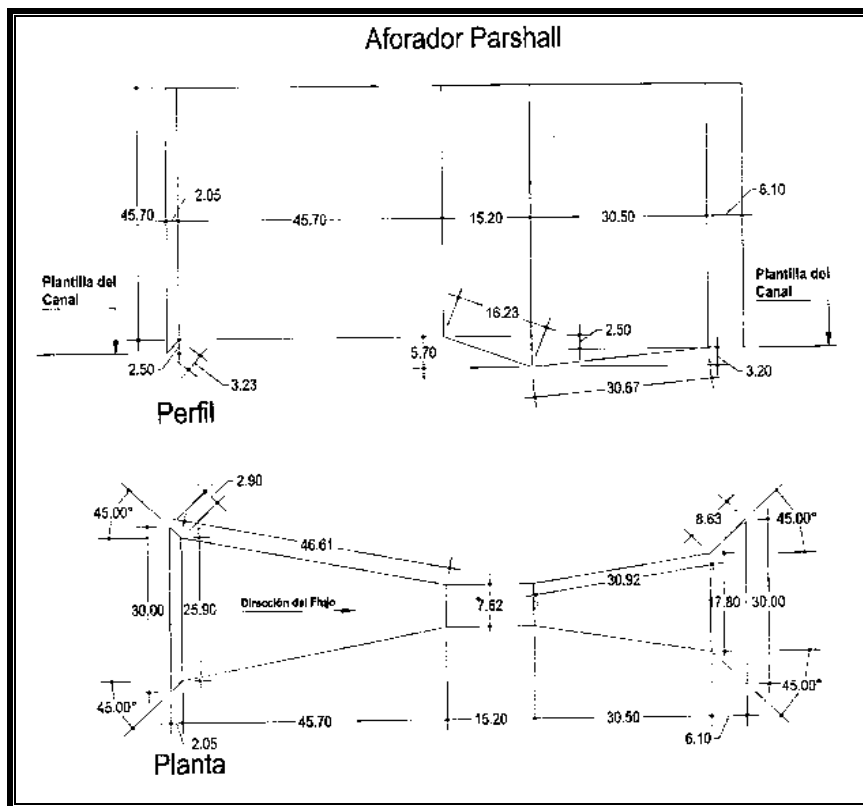


Figura 6. Tamaño de Aforador Parshall elegido y sus dimensiones

4.2 Fabricación del prototipo

4.2.1 Material

El aforador Parshall fue fabricado de acrílico transparente y en forma modular para permitir la representación de las diferentes condiciones geométricas a estudiar, siendo la plantilla del aforador de acrílico de 6mm de espesor soportada por una estructura de lamina para darle mayor estabilidad, las paredes al igual que la plantilla se fabricaron de acrílico de 4mm de espesor. El modelo fue diseñado teniendo como característica principal la capacidad de adoptar las diferentes modificaciones que habrían de hacerse con el fin de verificar su funcionamiento.

4.2.2 Procedimiento de construcción del prototipo

El siguiente es el procedimiento que se siguió para la fabricación del aforador modular:



Figura 7. Se marcaron las dimensiones del aforador en el acrílico



Figura 8. Se cortaron las piezas con mucho cuidado para mantener las medidas lo más exactas posible.



Figura 9. La plantilla del canal se cortó y pegó en secciones.



Figura 10. Se fabricó una estructura de soporte para darle mayor estabilidad a la plantilla.



Figura 11. Las paredes del aforador se cortaron en una sola pieza, la cual fue sometida a un proceso termo-eléctrico para doblarla y así obtener la forma del diseño.



Figura 12. Se colocaron unos dispositivos de refuerzo en el tope de las paredes, los cuales nos permitieron darle mayor rigidez a las paredes del aforador.



Figura 13. El aforador fue armado y pegado, y está listo para instalarse.

4.3 Instalación del aforador Parshall

Una vez construido el modelo se procedió a colocarlo en la instalación física, para lo cual se adaptó una base metálica para darle soporte a la plantilla del aforador. La instalación del modelo tuvo varios inconvenientes que en el transcurso fuimos solucionando, sin embargo tenemos conciencia de conforme avancemos en las pruebas surgirán algunos otros, de tal manera que debemos estar preparados para solucionarlos.

Antes de la colocación del aforador en el lugar, hicimos una limpieza general y modificamos un vertedor lateral de demasías que ocasionaba que el flujo aguas arriba del aforador se desbordara y no permitía que el flujo llegara uniformemente ya que está ubicado inmediato a la entrada del aforador.



Figura 14. Vertedor de demasías modificado

4.3.1 Procedimiento de colocación del aforador en el tramo determinado.



Figura 15. Instalación de la plantilla del aforador Parshall



Figura 16. Colocación del resto de los componentes del aforador.



Figura 17. Vista aguas arriba del aforador colocado en el canal.



Figura 18. Modelo fijo en el canal.



Figura 19. Aforador instalado y listo para calibrarse.

Finalmente el modelo quedó instalado y listo para realizar en él los experimentos para verificar el funcionamiento de los aforadores tipo Parshall

4.3.2 Instrumentación del aforador tipo Parshall

Se colocaron las escalas para medir las cargas h_a y h_b siguiendo las recomendaciones de diseño anteriormente mencionadas.

Figura 20. Escala utilizada para medir h_a 

Figura 21. Escalas colocadas en el aforador

CAPÍTULO 5.- METODOLOGÍA PARA LA VERIFICACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS AFORADORES PARSHALL

5.1 Generalidades

Se realizó un programa de experimentos para estudiar un prototipo aforador fabricado con los estándares internacionales que nos marcan las especificaciones de diseño y construcción.

El aforador Parshall fue construido para realizar una verificación experimental de la afectación en la precisión de las mediciones por influencia de cambios geométricos o alteraciones del flujo de llegada, dichos factores se podrían presentar en campo afectando así la medición.

Los experimentos se diseñaron para analizar el efecto de:

- Pequeñas modificaciones geométricas con respecto al diseño, como son del ancho de garganta y desplome de las paredes.
- Cambios en la rugosidad de las paredes del Parshall.
- Perturbaciones del flujo inmediatamente aguas arriba del medidor.

El dispositivo construido fue calibrado en el laboratorio para usarlo con fines comparativos, para este fin se llevó a cabo el programa de experimentos, dichos experimentos planteados para comparar el funcionamiento original del aforador Parshall contra los resultados de su funcionamiento al presentarse las diversas alteraciones antes mencionadas.

Una vez terminadas las pruebas se debieron procesar los resultados para así darnos una idea del funcionamiento del aforador en condiciones originales y su funcionamiento una vez que se le realizaron cada una de las modificaciones.

Las pruebas fueron realizadas sólo en descarga libre, dejando abierta la posibilidad de hacer otra investigación para el comportamiento del aforador Parshall con descarga ahogada.

El programa de experimentos descrito de forma general se presenta a continuación:

Tabla 2. Condiciones a estudiar experimentalmente

TIPO DE PRUEBA	CONDICIONES	OBSERVACIONES
1) Revisión y calibración del diseño original según Normas y especificaciones.	▪ Descarga libre.	Se propone calibrar el dispositivo en base a la ecuación marcada por la Norma.
2) Efecto de perturbación aguas arriba del medidor, variando la distancia de la fuente de disturbio.	▪ Descarga libre.	Se propone utilizar como agente perturbador una pantalla plana normal al flujo, que permita el paso del agua por los costados, en una abertura de 1/5 del ancho de la plantilla del canal.
3) Efecto de líneas de corriente de llegada no alineadas con el eje del canal.	▪ Descarga libre. ▪ Esviajamiento de 30°.	Se propone diseñar y utilizar un dispositivo de orientación diagonal del flujo aguas arriba de la entrada al aforador.
4) Efecto de cambio de talud (k).	▪ Descarga libre. ▪ Probar desplome de paredes.	Se propone: ▪ Representar el desplome de las paredes del aforador variando el talud k.
5) Efecto de alteración del ancho de garganta.	▪ Efecto de alteración del ancho de garganta.	Variar el ancho de garganta.
6) Efecto del incremento de rugosidad de las paredes.	▪ Descarga libre. ▪ Se sugiere probar cuatro tamaños de grano $D=3.36\text{mm}$, 2.00mm, 0.85mm y 0.54mm.	Se asume que el dispositivo es sensible a cambios de rugosidad.

CAPÍTULO 6.- PROGRAMA DE EXPERIMENTOS

6.1 Introducción

Para poder comprender el funcionamiento del aforador Parshall, se propusieron una serie de experimentos, los cuales se pensaron para representar condiciones reales y así poder observar el efecto que causarían en la exactitud de las mediciones de caudal circulante por el aforador Parshall.

De acuerdo a lo establecido por la ISO 9826 y por los estándares internacionales, los cuales recomiendan una perfecta construcción del aforador, teniendo especial cuidado en que el acabado superficial sea totalmente liso o bien que las dimensiones de la garganta y secciones representativas del Parshall sean exactas, y también hacen énfasis en las condiciones aguas arriba las cuales deben promover condiciones laminares del flujo en la entrada del aforador, lo cual permitiría que el aforador funcionara correctamente.

De la combinación de las condiciones anteriores resultó un programa de 18 experimentos, que se describen en la tabla que se encuentra en la siguiente página.

Tabla 3. Programa de experimentos

EXPERIMENTO No.	CONDICIÓN
1	Calibración en condiciones originales de diseño.
2	Perturbación del flujo de llegada con una pantalla plana normal al flujo.
2.1	Perturbación del flujo con pantalla ubicada a una distancia de 1.60m aguas arriba del aforador.
2.2	Perturbación del flujo con pantalla ubicada a una distancia de 0.80m aguas arriba del aforador.
2.3	Perturbación del flujo pantalla ubicada a una distancia de 0.40m aguas arriba del aforador.
3	Desviación de las líneas de corriente con una rejilla tipo peine con esviajamiento de 30°.
3.1	Desviación de las líneas de corriente con rejilla tipo peine ubicada a 1.60m de distancia aguas arriba de la entrada del aforador.
3.2	Desviación de las líneas de corriente con rejilla ubicada a una distancia de 0.80m aguas arriba de la entrada del aforador.
3.3	Desviación de las líneas de corriente con rejilla ubicada a una distancia de 0.40m aguas arriba de la entrada del aforador.
4	Cambio de talud (k)
4.1	Cambio de talud $k = 0.04:1$
4.2	Cambio de talud $k = 0.08:1$
4.3	Cambio de talud $k = 0.12:1$
5	Variación del ancho de la garganta (w)
5.1	Variación del ancho de garganta, $w=88.2\text{mm}$
5.2	Variación del ancho de garganta, $w=82.2\text{mm}$
5.3	Variación del ancho de garganta, $w=68.2\text{mm}$
5.4	Variación del ancho de garganta, $w=60.2\text{mm}$
6	Cambio de rugosidad
6.1	Cambio de rugosidad con arena de $D=3.36\text{mm}$
6.2	Cambio de rugosidad con arena de $D=2.00\text{mm}$
6.3	Cambio de rugosidad con arena de $D=0.85\text{mm}$
6.4	Cambio de rugosidad con arena de $D=0.54\text{mm}$

6.2 Descripción de las pruebas

6.2.1 Formato para captura de los datos de campo.

El siguiente es el formato de la hoja utilizado en la captura de los datos de cada una de las pruebas a realizar, el cual fue utilizado en todo el procedimiento de verificación del aforador para sistematizar la recopilación y procesamiento de los resultados experimentales.



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



VERIFICACIÓN EXPERIMENTAL DEL FUNCIONAMIENTO DE AFORADORES TIPO PARSHALL

Fecha _____

Experimento no. _____

Condiciones de la prueba.- _____

Prueba	h_a	Aforo volumétrico				Aforo vertedor		Observaciones
		Vol (lt)	T (seg)	$Q_{parcial}$ (lt/seg)	Q_{total} (lt/seg)	h (m)	$Q=1.2077h^{2.3192}$ (lt/seg)	

Figura 22. Tabla de recopilación de los datos de campo

1. Calibración del dispositivo en condiciones originales de diseño

Esta prueba fue la primera en realizarse, ya que primeramente debíamos conocer el desempeño de nuestro modelo, es decir, verificar que no tuviera fugas en su interior que pudieran alterar las mediciones que realizaríamos y en caso de tener fugas localizarlas y proceder a repararlas, otro aspecto a observar fue el de determinar el gasto máximo que estaría pasando por nuestro aforador sin que causara desbordamiento en la sección aguas arriba del aforador Parshall, para lo cual primeramente hicimos una observación del caudal máximo que pasaba a través del aforador sin causar problemas de desbordamiento para posteriormente basándonos en esa observación empezar a realizar los aforos volumétricos y aforos con un vertedor tipo “V”.



Figura 23. Aforador Parshall en funcionamiento

Enseguida fijamos la distribución de medidas a hacer para calibrar el dispositivo, tomando en cuenta que debían de ser lo más posible representativas de las condiciones reales de nuestro aforador.

Una vez definida la distribución de las mediciones empezamos a realizar cada una de estas, checando antes que nada que las dimensiones del aforador fueran las correctas, habiendo verificado las condiciones existentes procedimos a realizar una a una las mediciones, tomando los datos necesarios para posteriormente procesarlos y llegar a obtener los resultados finales.

En esta prueba fue necesario hacer las mediciones en orden ascendente y orden descendente, es decir de menos gasto a más gasto y viceversa, esto lo hicimos para observar la exactitud de las mediciones y descartar el fenómeno de histéresis.



Figura 24. Lectura de la carga h_a

Finalmente obtuvimos los resultados de la primera prueba, los cuáles serán la base comparativa con las pruebas siguientes, ya que el dispositivo se calibró en condiciones originales de operación, dichas condiciones cambiarán para las próximas pruebas, en las que hemos de implementar varios elementos para verificar el buen funcionamiento de nuestro modelo aforador como está planteado en el programa de experimentos.

2. Perturbación del flujo de llegada al aforador con una pantalla plana normal al flujo.

Esta prueba fue diseñada con el propósito de observar el funcionamiento del aforador Parshall con una pantalla perturbadora de flujo, la cual fue diseñada y construida tomando en cuenta que debía dejar pasar el flujo por unas aberturas laterales de $1/5$ de la plantilla del sitio de colocación, posteriormente ésta se ubicó en 3 distancias previamente marcadas, dichas distancias de ubicación de la pantalla se decidieron tomando en cuenta el efecto que ésta debía producir en el flujo de llegada al aforador.



Figura 25. Pantalla perturbadora de flujo

2.1 Pantalla ubicada a una distancia de 1.60m aguas arriba del aforador.

Primeramente colocamos la pantalla a una distancia de 1.60m medidos a partir de la entrada al canal Parshall; habiendo colocado la pantalla perturbadora del flujo procedimos a realizar las mediciones con el mismo procedimiento descrito anteriormente en la prueba 1.

Posteriormente realizamos las mediciones correspondientes observando que la perturbación de flujo causada por el dispositivo en gastos pequeños fue mínima, sólo se produjeron algunos vórtices que avanzaron unos cuantos centímetros pero se desvanecieron conforme el flujo se acercaba a la entrada del aforador y por lo tanto no causaron efecto alguno en la lectura de la carga en la sección convergente; conforme aumentaba el gasto circulante a través del canal se observó que el flujo se empezó a tornar un poco inestable produciendo una formación de vórtices más marcados y con más fuerza los cuales viajaron cada vez más lejos de la pantalla, sin embargo dichos vórtices se alcanzaban a desvanecer antes de la sección de entrada del aforador, éste comportamiento se observó constantemente en las mediciones, es decir, si el gasto iba creciendo el flujo se volvía cada vez más inestable, aunque observamos que esta perturbación no llegaba al aforador.

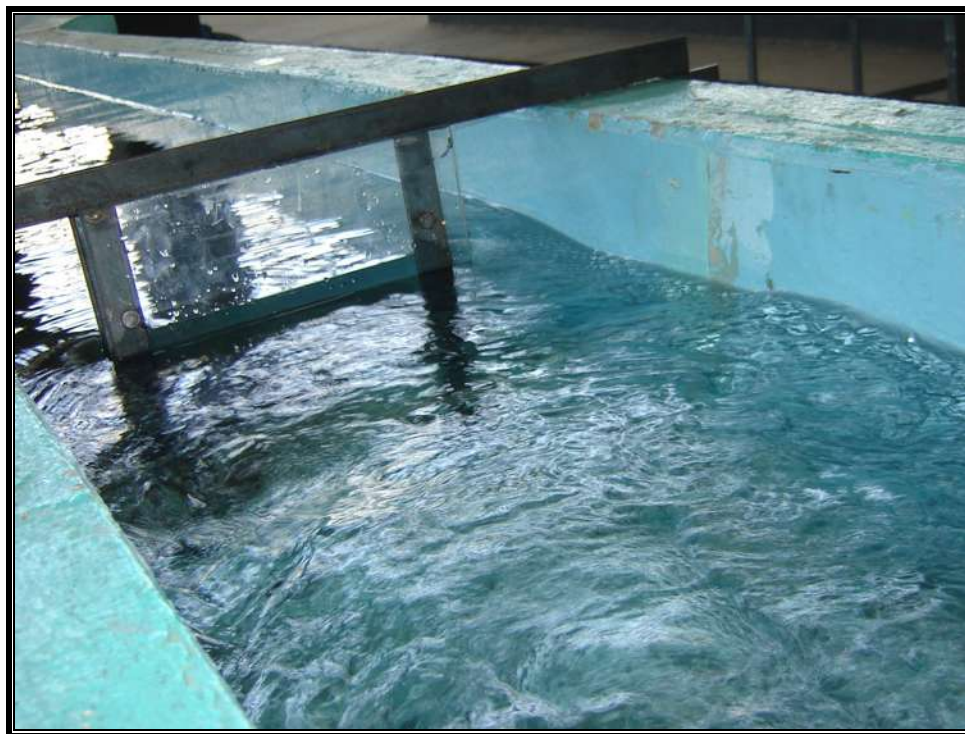


Figura 26. Perturbación del flujo causada por la pantalla

2.2 Pantalla ubicada a una distancia de 0.80m aguas arriba del aforador.

Siguiendo con la prueba cambiamos de ubicación la pantalla, en este caso se ubicó a 0.80m de distancia de la entrada de la sección convergente del aforador tipo Parshall.

En esta nueva ubicación pudimos observar que el flujo siguió un comportamiento similar al descrito anteriormente, las primeras mediciones no sufrieron alteración alguna ya que como mencionamos previamente los vórtices que se formaron inmediatamente después de la pantalla no tuvieron la suficiente fuerza y se desvanecieron antes de llegar al aforador, pero al aumentar el gasto y al llegar al gasto máximo circulante a través del canal se observó la formación de un vórtice en la entrada del aforador, por lo tanto pusimos énfasis en tal medición dando como resultado que a simple vista ésta perturbación del flujo no influyó mayormente en el comportamiento del flujo al entrar en la sección convergente del aforador tipo Parshall.



Figura 27. Pantalla perturbadora ubicada aguas arriba del aforador

2.3 Pantalla ubicada a una distancia de 0.40m aguas arriba de la entrada del aforador.

Ahora cambiamos la ubicación de la pantalla a su posición final, la colocamos a 0.40m de distancia medidos a partir de la entrada del aforador tipo Parshall e inmediatamente dimos inicio a las mediciones.

Observamos que en ésta posición la perturbación fue muy similar pero ahora se encuentra más cerca de la entrada del aforador lo cuál pudo haber afectado en los resultados finales.

Los vórtices que se formaron al pasar el flujo por los costados de la pantalla avanzaron y se alcanzaron a observar aún en la sección convergente del aforador Parshall, pero al llegar a la garganta desaparecieron totalmente debido al cambio de sección y de velocidad del flujo.



Figura 28. Vórtices formados en el flujo a la entrada del aforador Parshall

Finalmente habiendo observado el comportamiento del flujo provocado por la colocación de la pantalla perturbadora de flujo llegamos a una conclusión para saber que tanto pudo haber afectado tal alteración en el funcionamiento del aforador, es decir, si los resultados de las mediciones realizadas con el dispositivo difieren de los obtenidos en condiciones normales de operación.

3. Desviación de las líneas de corriente con una rejilla tipo peine con esviajamiento de 30° .

Para esta prueba diseñamos y construimos una rejilla tipo peine, la rejilla fue construida con una separación de 7cm entre cada elemento esviado en un ángulo de 30° con respecto a la horizontal, posteriormente la rejilla se ubicó en las mismas 3 distancias en las que anteriormente se colocó la pantalla utilizada para la prueba número 2.



Figura 29. Rejilla tipo peine

3.1 Rejilla ubicada a una distancia de 1.60m aguas arriba de la entrada del aforador.

Habiendo colocado la pantalla perturbadora del flujo procedimos a realizar las mediciones con el mismo procedimiento descrito anteriormente en las pruebas anteriores.

Una vez que empezó a circular el flujo a través del aforador observamos que las líneas de corriente cambiaban de dirección, provocando perturbaciones en el flujo las cuales aumentaban conforme aumentaba el gasto circulante, se observó también la aparición de varios vórtices superficiales los cuales tornaban al flujo un poco inestable, seguimos la trayectoria de las turbulencias y observamos que se desvanecían mucho antes de la entrada al aforador Parshall, por lo tanto no tuvimos dificultad en la lectura de cargas, lo cual es importante para el correcto funcionamiento del dispositivo aforador.



Figura 30. Rejilla ubicada aguas arriba del aforador Parshall

3.2 Rejilla ubicada a una distancia de 0.80m aguas arriba del aforador.

Siguiendo con la prueba ubicamos ahora la rejilla en su segunda posición, en este caso se ubicó a 0.80m de distancia de la entrada de la sección convergente del aforador tipo Parshall.

Ahora observamos que el flujo siguió un comportamiento similar al descrito en la posición anterior, con la diferencia de que estando la rejilla más cercana al aforador las líneas de corriente se acercaron más a la entrada del aforador, sólo que aún las turbulencias desaparecían antes de ingresar a la sección convergente del aforador Parshall.



Figura 31. Perturbación causada por la rejilla tipo peine

3.3 Rejilla ubicada a una distancia de 0.40m aguas arriba de la entrada del aforador.

Ahora cambiamos la ubicación de la rejilla a su posición final, la colocamos a 0.40m de distancia medidos a partir de la entrada del aforador tipo Parshall e inmediatamente dimos inicio a las mediciones.

Observamos que en ésta posición la perturbación fue muy similar pero ahora se encuentra más cerca de la entrada del aforador. Los vórtices que se formaron al desviarse las líneas de corriente y chocar entre sí, avanzaron y se alcanzaron a observar aún en la sección convergente del aforador Parshall, las perturbaciones fueron creciendo proporcionalmente al crecimiento del gasto, causando la inexactitud de las medidas de la carga en la sección convergente.



Figura 32. Pequeños vórtices en el flujo aguas arriba del aforador

Una vez que realizamos todas las pruebas con la rejilla tipo peine y habiendo observado las alteraciones del flujo que se producían con la rejilla, no nos queda más que procesar los datos que obtuvimos en las pruebas y analizarlos para de esa manera ver si existen diferencias significativas en el funcionamiento del aforador con este tipo de condición.

4. Cambio de talud (k).

Esta serie de pruebas fue propuesta para observar el funcionamiento del aforador Parshall bajo la condición de un cambio de talud, dicho cambio significa que las paredes del aforador no se encontrarían totalmente verticales, lo cual podría significar cambios en el funcionamiento correcto del aforador Parshall. Para la realización de ésta serie de experimentos se cambió el talud de las paredes en tres posiciones, las cuales describiremos a continuación.

4.1 Talud $k = 0.04:1$

En la primera prueba el cambio en la verticalidad de las paredes no fue muy significativo, por lo cual esperamos que la exactitud de las mediciones no se vea alterada. La primera condición con un talud $k = 0.04:1$ es muy similar a la condición original, con una variación pequeña en la verticalidad de las paredes lo que provoca que en el espejo de agua del flujo circulante se presenten ligeras ondulaciones, las cuales no afectan las lecturas.



Figura 33. Paredes del aforador Parshall modificadas en su verticalidad

4.2 Talud $k = 0.08:1$

Esta prueba presenta condiciones similares a las presentadas en el inciso anterior, ahora observamos que la sección transversal se ve mas afectada, esto quiere decir que hay más área hidráulica por lo cual suponemos que con una misma carga pasará un mayor gasto, esto lo habremos de comprobar una vez que capturemos los datos tomados de la prueba.



Figura 34. Flujo circulando a través del aforador modificado

4.3 Talud $k = 0.12:1$

En esta prueba las dimensiones originales del aforador fueron modificadas de una manera muy importante, por lo cual procedimos a verificar el funcionamiento del aforador y así poder determinar la diferencia real entre su funcionamiento en condiciones originales y su funcionamiento con estas condiciones de alteración en sus medidas de diseño.



Figura 35. Alteración significativa en la verticalidad de las paredes

Habiendo terminado esta serie de pruebas, observamos que el flujo de agua circulante a través del aforador Parshall se comportó más inestable conforme el talud de las paredes era más significativo, es decir, entre más apertura del talud (k) con respecto a la vertical, el flujo se volvía más inestable, logrando dificultar un poco la lectura de la carga en la sección de entrada.

En el siguiente capítulo analizaremos los resultados de la verificación experimental.

5. Variación del ancho de garganta (w) de diseño (condición original $w=76.2\text{mm}$).

NOTA. Para esta serie de pruebas fue necesario construir una nueva plantilla, la cual se elaboró de una mezcla compuesta por cemento blanco, yeso y colorante, ya que la plantilla anterior se deformó debido a las modificaciones que se hicieron en las pruebas anteriores, por lo que se optó por sustituirla, poniendo especial cuidado en su construcción para que no se alteraran las medidas geométricas que marcan los estándares internacionales.

5.1, 5.2, 5.3 y 5.4 Variación de w .

Estas pruebas fueron similares en su procedimiento, en dichas pruebas se varió el ancho de garganta, siendo las pruebas 5.1 y 5.2 correspondientes a un ancho de garganta mayor al de proyecto, con unos valores de $w=88.2\text{mm}$ y $w=82.2\text{mm}$ respectivamente, y las pruebas 5.3 y 5.4 con un ancho menor al de proyecto, con valores de $w=68.2\text{mm}$ y $w=60.2\text{mm}$ respectivamente.

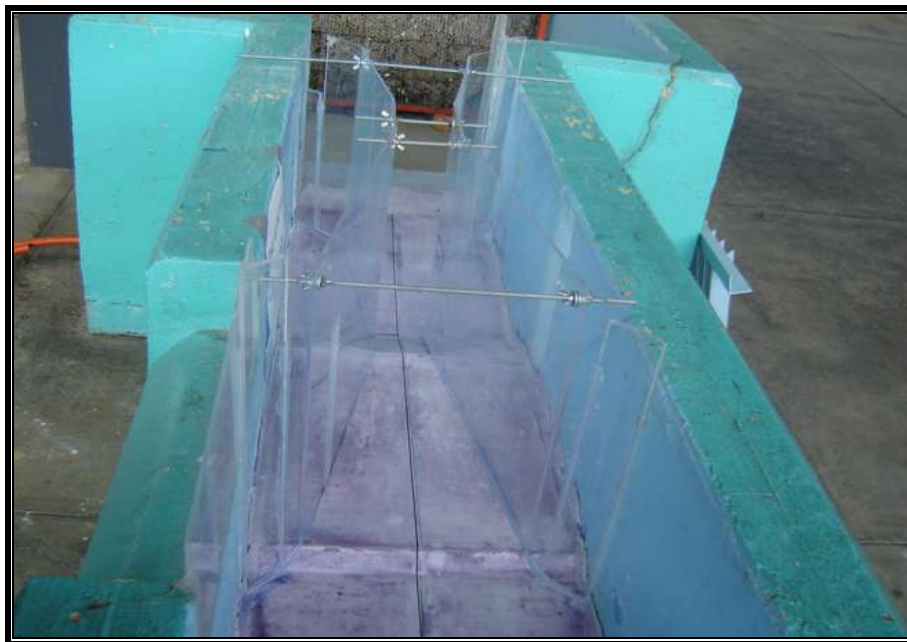


Figura 36. Aforador Parshall con variación en la dimensión de la garganta

El funcionamiento del aforador presentó unas características de flujo similares a la prueba de calibración, ya que no hay obstáculos para alterar el flujo ni hay condiciones de cambio de talud, las paredes se mantuvieron verticales y lo único que se alteró fue el ancho de garganta.

6. Cambio de rugosidad

El objetivo de esta serie de pruebas fue observar que podría ocurrir si no se cumple con la especificación que nos indica que el acabado del aforador Parshall debe ser una superficie completamente lisa. Para tal objetivo se probaron cuatro tamaños de granos para simular un cambio en el coeficiente de rugosidad (n).



Figura 37. Distintos tamaños de grano para cambiar el coeficiente de rugosidad

6.1 Arena de $D=3.36\text{mm}$

Primeramente se decidió empezar con las partículas más grandes, en este caso los granos con un diámetro de 3.36mm, observando en el transcurso de la prueba la formación de más líneas superficiales de corriente dentro del aforador Parshall, sin embargo el flujo pasa uniformemente a través del dispositivo sin alterar la medición de la carga.



Figura 37. Líneas de flujo más marcadas en la superficie

6.2 Arena de $D=2.00\text{mm}$

En esta prueba la rugosidad del aforador se representó con las partículas de diámetro igual a 2.00mm , observando las características que se describieron en el inciso anterior, pero con la diferencia de unas líneas más marcadas en el espejo de agua.



Figura 38. Aforador forrado simulando el cambio en la rugosidad

6.3 Arena de $D=0.85\text{mm}$

Se observan en la estela de turbulencia unas ondas superficiales más marcadas, ahora la rugosidad existente en el canal es de partículas de diámetro igual a 0.85mm , lo que hace que la distribución sea más cerrada.



Figura 39. Flujo circulando a través del aforador

6.4 Arena de $D=0.54\text{mm}$

Las condiciones de funcionamiento del aforador se mantienen similares a las descritas anteriormente, lo que se pudo observar es que cuando la rugosidad es mayor la limpieza dentro del aforador puede dificultarse, lo cual ocasionaría problemas de acumulación de sedimentos o basura.



Figura 40. Rugosidad dentro del dispositivo aforador

Con esta serie de pruebas concluimos las pruebas experimentales planteadas para verificar de manera experimental el funcionamiento de los aforadores Parshall.

Presentación de los resultados de cada prueba

Generalidades

Una vez terminadas las pruebas experimentales se procedió a capturar los datos obtenidos y procesarlos, de manera que pudiéramos comparar el funcionamiento de nuestro dispositivo en condiciones originales contra el funcionamiento del mismo con las diversas alteraciones, descritas en el capítulo anterior. De esta manera procederemos a analizar los resultados que arrojó nuestro proyecto de investigación.

Para obtener la ecuación original se siguió el siguiente procedimiento:

- 1) Definimos que la fórmula a utilizar sería la ecuación que obtiene el gasto para condiciones de descarga libre, es decir:

$$Q = C_D h_a^n$$

donde

Q	es el gasto, en lt/seg;
h_a	es la carga en la sección de entrada, en milímetros;
C_D	es el coeficiente de descarga, en este caso $C_D=0.003965^{(*)}$;
n	es un exponente que depende de b , en este caso $n=1.55^{(*)}$.

^(*)Datos tomados del manual del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

- 2) Sustituimos los coeficientes C_D y n en la ecuación del gasto, por lo tanto:

$$Q = 0.003965 h_a^{1.55}$$

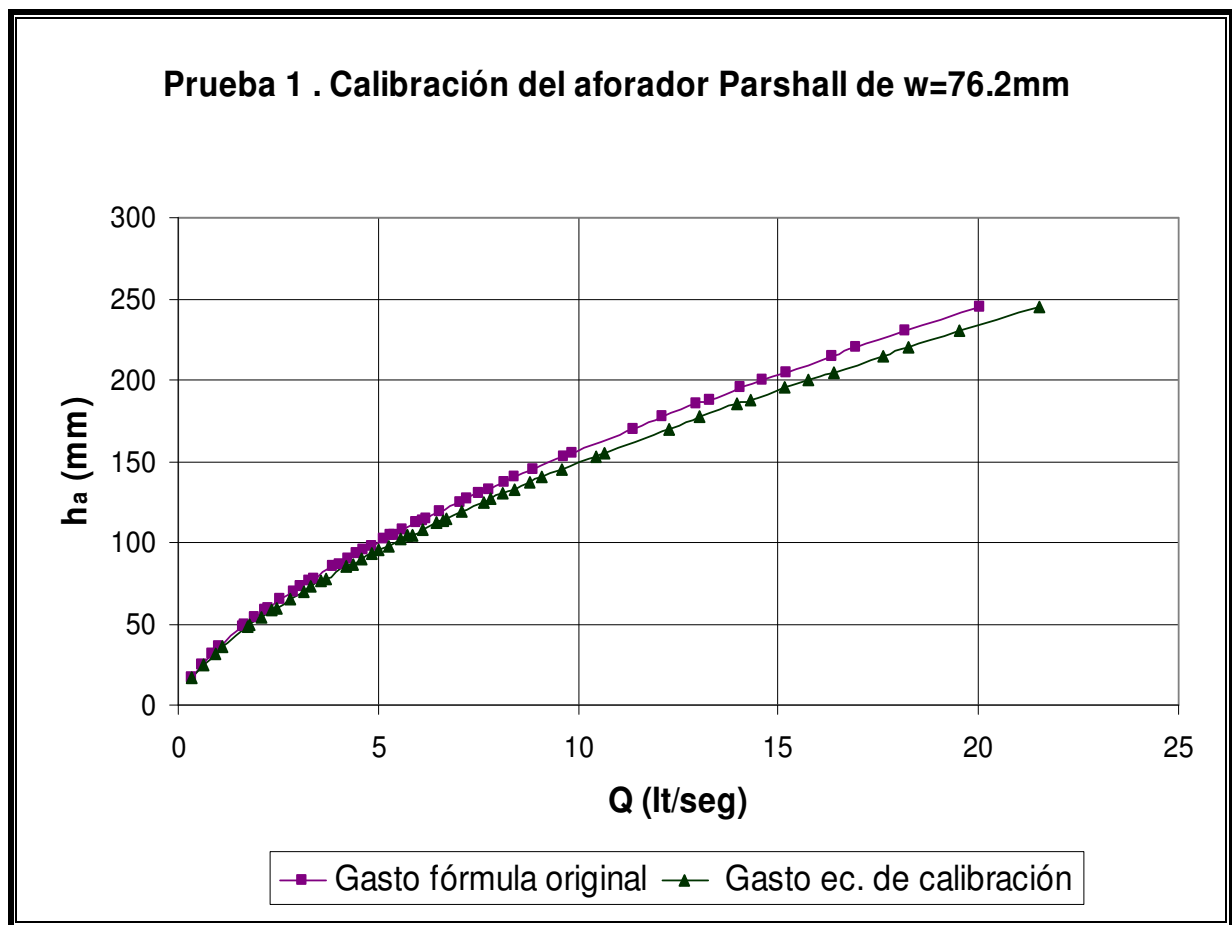
Cabe mencionar que el único dato que requerimos de la verificación experimental fue el valor de la carga h_a , el cual sustituimos en la fórmula anterior para la obtención del gasto. El gasto obtenido con la fórmula anterior sólo lo utilizamos con el fin de calibrar el dispositivo aforador.

En seguida se determinó seguir un método estadístico para encontrar cada una de las ecuaciones de cada prueba, el ajuste se realizó con el método de regresión lineal. Así pues, cada una de las pruebas tendrá una ecuación representativa de su funcionamiento, dicha ecuación será localizada en la columna número cuatro.

Prueba 1. Calibración del dispositivo.

Tabla 4. Resultados

Carga	Gasto real aforado	Gasto fórmula original	Gasto ec. de calibración
h_a (mm)	Q (lt/seg)	$Q=0.003965h_a^{1.55}$ (lt/seg)	$Q=0.004492h_a^{1.54061}$ (lt/seg)
25	0.59	0.58	0.64
36	1.00	1.02	1.12
49	1.73	1.65	1.80
54	1.82	1.92	2.10
58	2.12	2.15	2.34
60	2.47	2.26	2.47
65	2.60	2.56	2.79
70	3.01	2.87	3.13
76	3.57	3.26	3.55
85	4.14	3.88	4.22
90	4.66	4.24	4.60
95	4.87	4.61	5.00
102	5.60	5.15	5.58
105	5.49	5.38	5.84
108	6.03	5.62	6.10
115	7.24	6.20	6.72
119	7.25	6.54	7.08
125	7.44	7.05	7.64
130	8.69	7.50	8.11
137	9.20	8.13	8.80
140	9.36	8.41	9.09
145	9.90	8.88	9.60
153	10.47	9.65	10.43
155	10.85	9.85	10.64
170	13.06	11.36	12.27
177	13.51	12.09	13.05
185	14.60	12.95	13.97
188	14.85	13.28	14.32
195	15.29	14.05	15.15
200	15.79	14.62	15.76
205	16.49	15.19	16.37
215	17.98	16.35	17.61
220	18.52	16.94	18.25
230	19.85	18.15	19.54
245	22.34	20.02	21.54



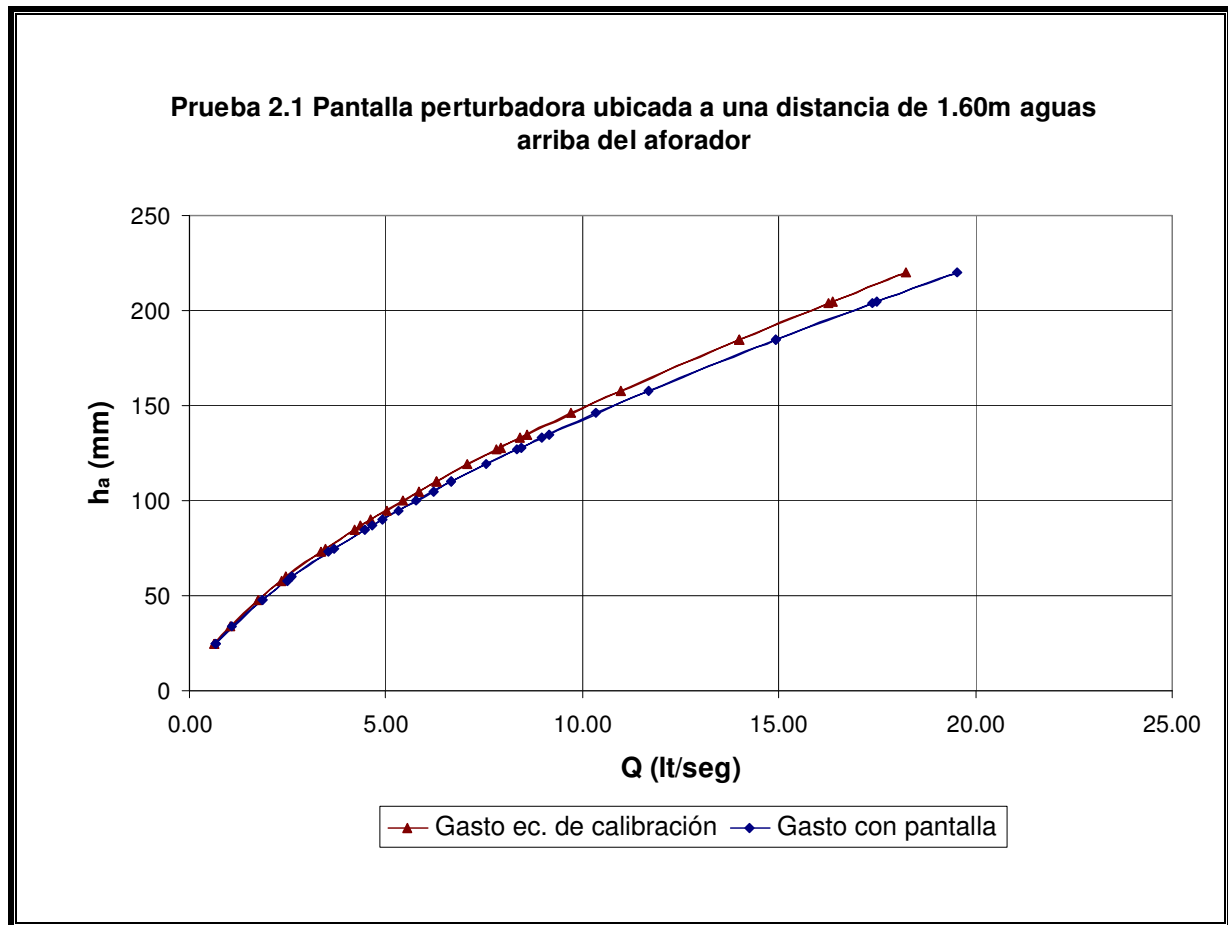
Gráfica 1. Prueba en condiciones originales de operación

Prueba 2. Perturbación del flujo de llegada con pantalla

2.1 Perturbación del flujo, con pantalla ubicada a 1.60m aguas arriba del aforador.

Tabla 5. Resultados

Carga	Gasto real aforado	Gasto ec. de calibración	Gasto con pantalla
h_a (mm)	Q (lt/seg)	$Q=0.004492h_a^{1.54061}$ (lt/seg)	$Q=0.0046241h_a^{1.54776}$ (lt/seg)
25	0.58	0.64	0.67
48	1.33	1.75	1.85
58	2.29	2.34	2.48
73	3.16	3.33	3.54
85	4.20	4.22	4.48
90	4.89	4.60	4.89
95	5.14	5.00	5.32
105	6.05	5.84	6.21
110	7.07	6.27	6.68
127	8.01	7.83	8.34
133	9.01	8.40	8.96
146	10.08	9.70	10.35
185	13.06	13.97	14.93
205	16.98	16.37	17.50
220	19.02	18.25	19.52
204	16.98	16.24	17.37
185	15.06	13.97	14.93
158	12.22	10.96	11.70
135	9.90	8.60	9.17
128	9.01	7.92	8.44
119	8.01	7.08	7.54
110	7.07	6.27	6.68
100	6.06	5.42	5.76
87	5.02	4.37	4.64
75	4.08	3.48	3.69
60	3.06	2.47	2.61
48	2.06	1.75	1.85
34	1.16	1.03	1.08
25	0.77	0.64	0.67

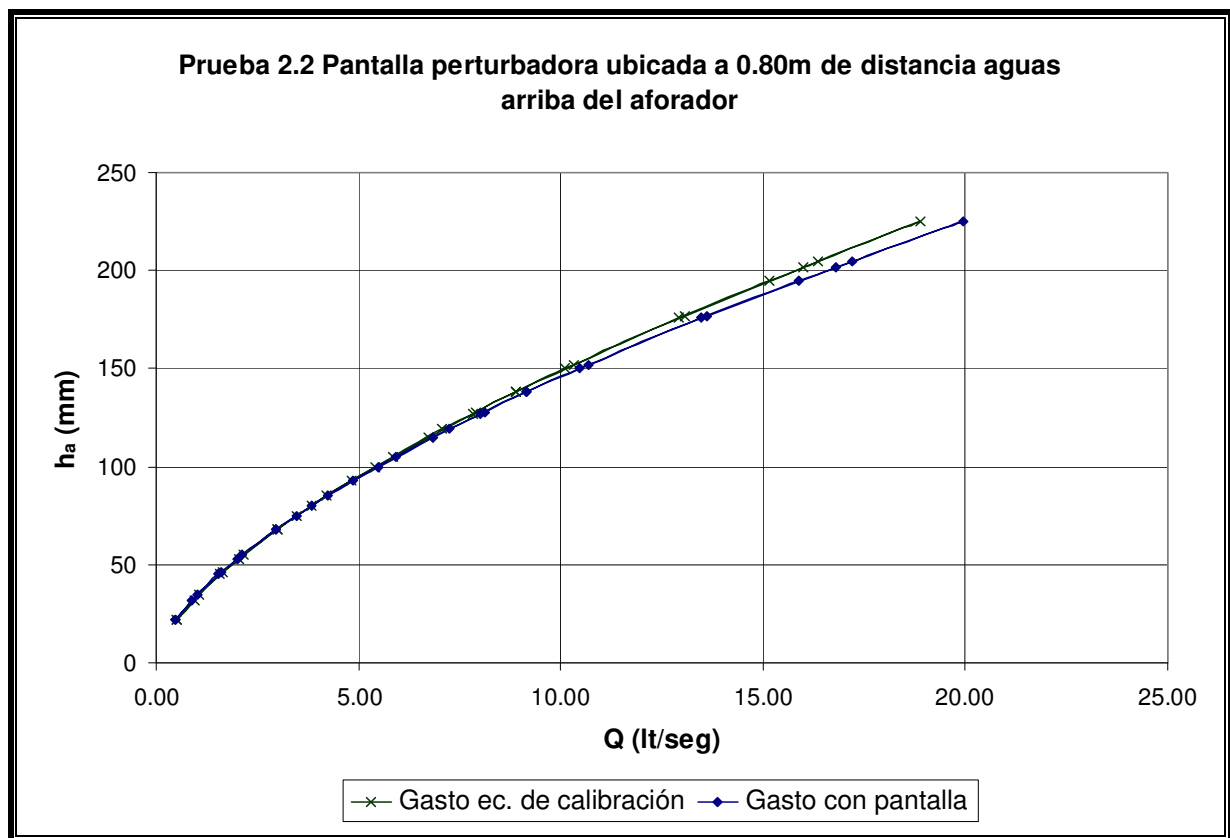


Gráfica 2. Prueba con pantalla perturbadora

2.2 Pantalla ubicada a 0.80m aguas arriba del aforador

Tabla 6. Resultados

Carga	Gasto real aforado	Gasto ec. de calibración	Gasto con rejilla
h_a (mm)	Q (lt/seg)	$Q=0.004492h_a^{1.54061}$ (lt/seg)	$Q=0.0035902h_a^{1.59196}$ (lt/seg)
22	0.45	0.53	0.49
32	0.74	0.94	0.89
45	1.28	1.58	1.54
46	1.52	1.64	1.59
55	1.99	2.16	2.12
68	3.06	2.99	2.97
80	3.98	3.84	3.84
93	5.02	4.84	4.88
105	6.06	5.84	5.93
119	7.07	7.08	7.23
128	8.02	7.92	8.12
138	9.03	8.90	9.16
152	10.66	10.32	10.68
176	13.27	12.94	13.49
195	15.76	15.15	15.88
202	16.24	16.00	16.79
225	19.05	18.89	19.94
205	16.51	16.37	17.19
177	13.49	13.05	13.61
150	10.47	10.11	10.46
138	9.24	8.90	9.16
127	8.19	7.83	8.02
115	7.07	6.72	6.85
100	5.93	5.42	5.48
85	4.42	4.22	4.23
75	3.98	3.48	3.47
68	3.16	2.99	2.97
53	2.06	2.04	2.00
35	1.06	1.07	1.03
22	0.61	0.53	0.49

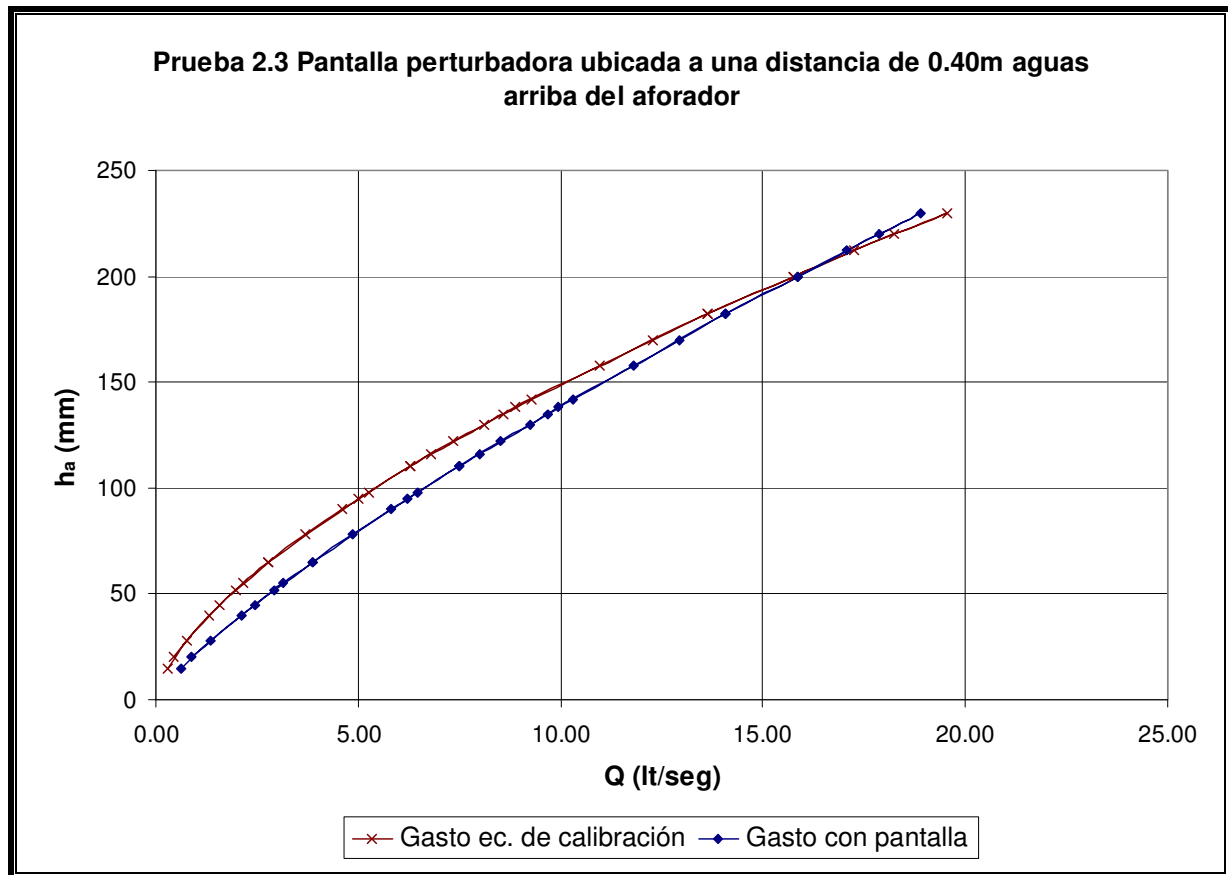


Gráfica 3. Prueba con pantalla perturbadora

2.3 Pantalla ubicada a 0.40m aguas arriba del aforador

Tabla 7. Resultados

Carga	Gasto real aforado	Gasto ec. de calibración	Gasto con pantalla
h_a (mm)	Q (lt/seg)	$Q=0.004492h_a^{1.54061}$ (lt/seg)	$Q=0.0204667h_a^{1.25564}$ (lt/seg)
20	0.54	0.45	0.88
40	1.11	1.32	2.10
52	1.98	1.98	2.92
65	2.97	2.79	3.87
78	4.08	3.69	4.86
90	5.02	4.60	5.82
98	5.93	5.25	6.48
110	7.07	6.27	7.49
122	8.01	7.36	8.53
135	9.01	8.60	9.68
142	10.08	9.30	10.32
170	13.06	12.27	12.93
182	15.06	13.62	14.09
200	17.22	15.76	15.86
220	19.02	18.25	17.88
230	20.92	19.54	18.90
212	19.02	17.24	17.06
200	17.22	15.76	15.86
182	15.06	13.62	14.09
158	13.06	10.96	11.80
138	10.08	8.90	9.95
130	9.01	8.11	9.23
116	8.01	6.81	8.00
110	7.07	6.27	7.49
95	6.06	5.00	6.23
65	5.02	2.79	3.87
55	4.08	2.16	3.14
45	3.06	1.58	2.44
28	2.06	0.76	1.34
15	1.16	0.29	0.61



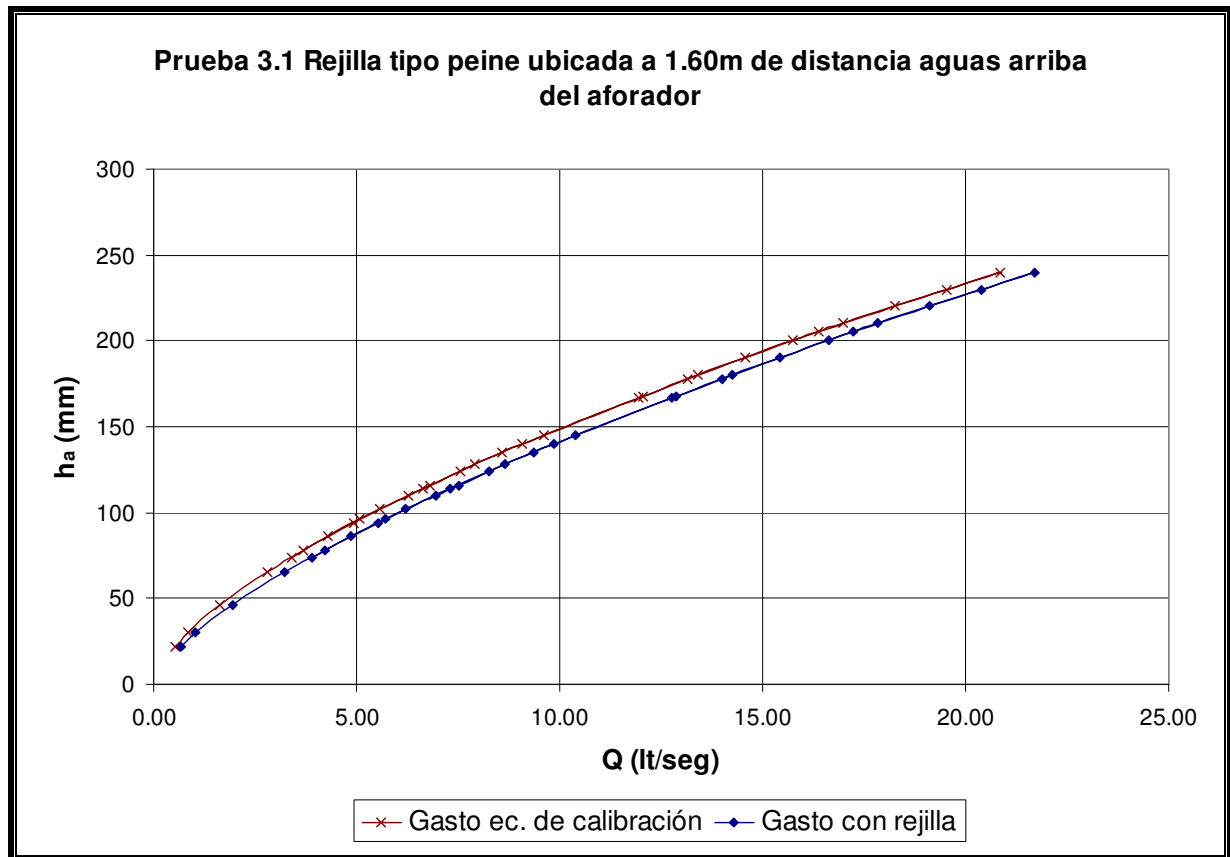
Gráfica 4. Prueba con pantalla perturbadora

Prueba 3. Desviación de las líneas de corriente del flujo.

3.1 Rejilla ubicada a 1.60m de distancia.

Tabla 8. Resultados

Carga	Gasto real aforado	Gasto ec. de calibración	Gasto con rejilla
h_a (mm)	Q (lt/seg)	$Q=0.004492h_a^{1,54061}$ (lt/seg)	$Q=0.0072821h_a^{1.45951}$ (lt/seg)
22	0.65	0.53	0.66
30	1.11	0.85	1.04
46	1.98	1.64	1.95
65	2.97	2.79	3.22
78	4.08	3.69	4.21
94	5.02	4.92	5.52
102	6.06	5.58	6.22
114	7.07	6.63	7.32
124	8.01	7.54	8.27
135	9.01	8.60	9.36
145	10.08	9.60	10.39
168	12.22	12.04	12.89
180	14.15	13.39	14.25
200	16.00	15.76	16.62
210	17.98	16.99	17.85
230	21.20	19.54	20.38
240	22.06	20.86	21.69
220	19.56	18.25	19.10
205	17.98	16.37	17.23
190	16.00	14.56	15.42
178	14.15	13.17	14.02
167	12.02	11.93	12.77
140	10.08	9.09	9.88
128	9.01	7.92	8.66
116	8.01	6.81	7.50
110	7.07	6.27	6.95
96	6.06	5.09	5.69
86	5.02	4.29	4.85
74	4.08	3.41	3.89

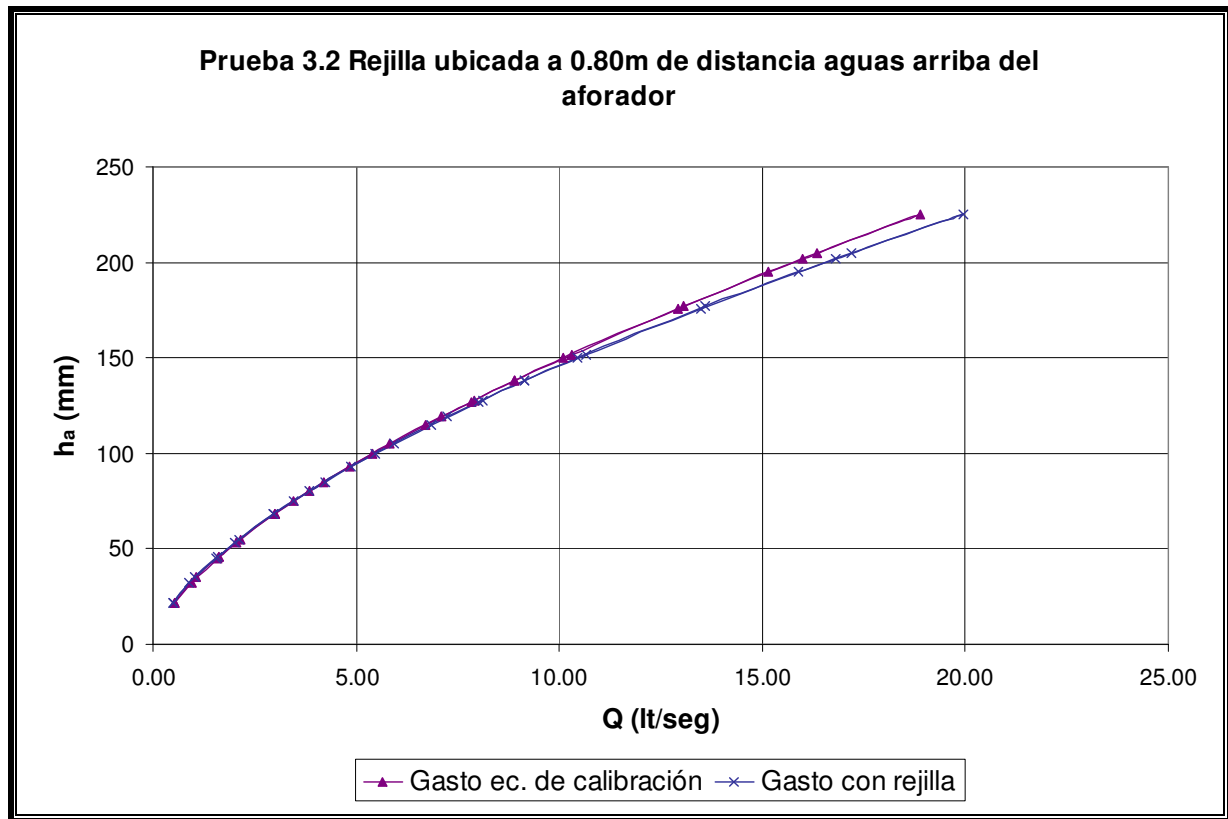


Gráfica 5. Prueba con rejilla

3.2 Rejilla ubicada a 0.80m de distancia

Tabla 9. Resultados

Carga	Gasto real aforado	Gasto ec. de calibración	Gasto con rejilla
h_a (mm)	Q (lt/seg)	$Q=0.004492h_a^{1.54061}$ (lt/seg)	$Q=0.0035902h_a^{1.59196}$ (lt/seg)
22	0.45	0.53	0.49
32	0.74	0.94	0.89
45	1.28	1.58	1.54
46	1.52	1.64	1.59
55	1.99	2.16	2.12
68	3.06	2.99	2.97
80	3.98	3.84	3.84
93	5.02	4.84	4.88
105	6.06	5.84	5.93
119	7.07	7.08	7.23
128	8.02	7.92	8.12
138	9.03	8.90	9.16
152	10.66	10.32	10.68
176	13.27	12.94	13.49
195	15.76	15.15	15.88
202	16.24	16.00	16.79
225	19.05	18.89	19.94
205	16.51	16.37	17.19
177	13.49	13.05	13.61
150	10.47	10.11	10.46
138	9.24	8.90	9.16
127	8.19	7.83	8.02
115	7.07	6.72	6.85
100	5.93	5.42	5.48
85	4.42	4.22	4.23
75	3.98	3.48	3.47
68	3.16	2.99	2.97
53	2.06	2.04	2.00
35	1.06	1.07	1.03
22	0.61	0.53	0.49

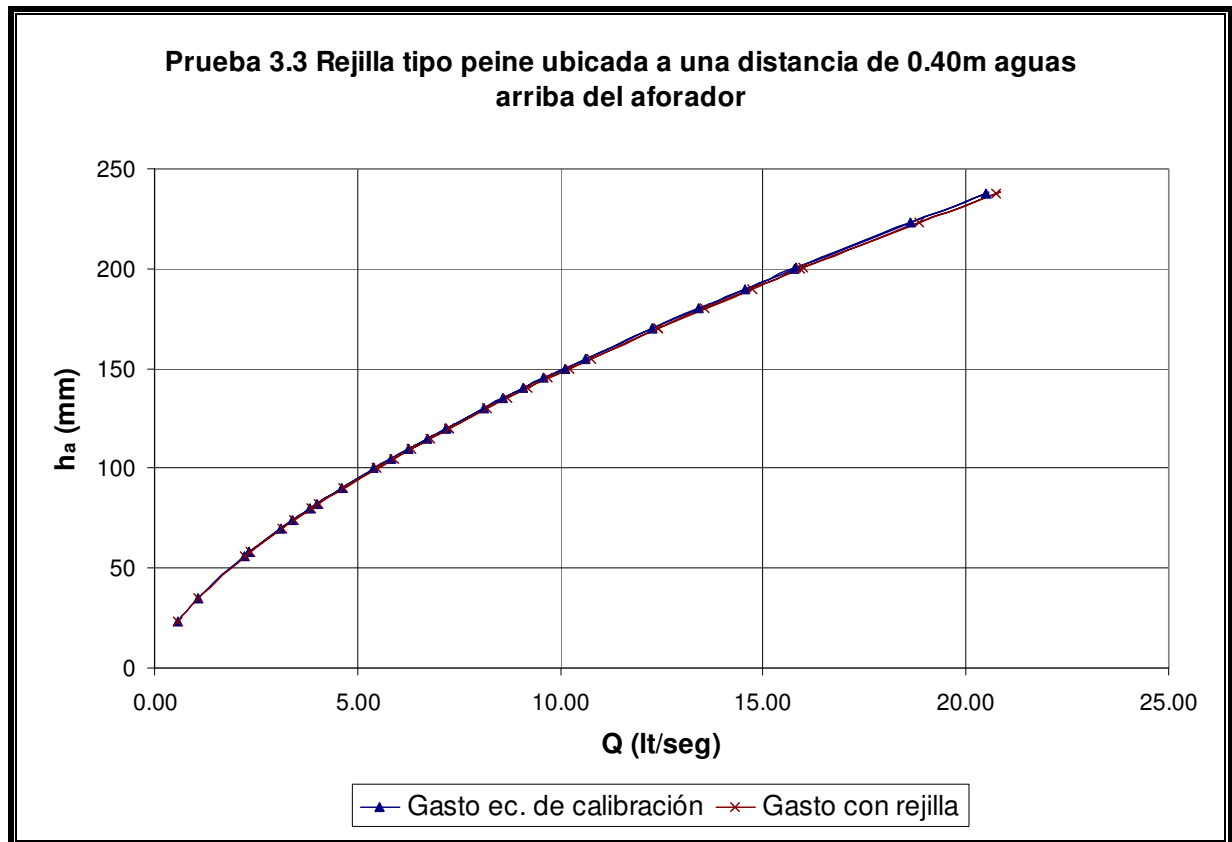


Gráfica 6. Prueba con rejilla tipo peine

3.3 Rejilla ubicada a 0.40m de distancia.

Tabla 10. Resultados

Carga	Gasto real aforado	Gasto ec. de calibración	Gasto con rejilla
h_a (mm)	(lt/seg)	$Q=0.004492h_a^{1.54061}$ (lt/seg)	$Q=0.0044838h_a^{1.54307}$ (lt/seg)
23	0.61	0.56	0.57
35	1.06	1.07	1.08
58	1.98	2.34	2.36
74	2.97	3.41	3.44
82	3.97	3.99	4.03
100	5.02	5.42	5.47
110	6.06	6.27	6.33
120	7.07	7.17	7.24
130	8.01	8.11	8.20
140	9.01	9.09	9.19
150	10.08	10.11	10.22
170	12.22	12.27	12.40
190	14.15	14.56	14.72
200	16.24	15.80	15.97
223	17.98	18.63	18.85
237	20.65	20.51	20.75
200	16.00	15.76	15.93
180	13.71	13.39	13.54
170	13.06	12.27	12.40
155	11.22	10.64	10.75
145	10.08	9.60	9.70
135	9.01	8.60	8.69
120	8.01	7.17	7.24
115	7.07	6.72	6.78
105	6.06	5.84	5.89
90	5.02	4.60	4.65
80	4.08	3.84	3.87
70	3.25	3.13	3.15
56	2.37	2.22	2.23



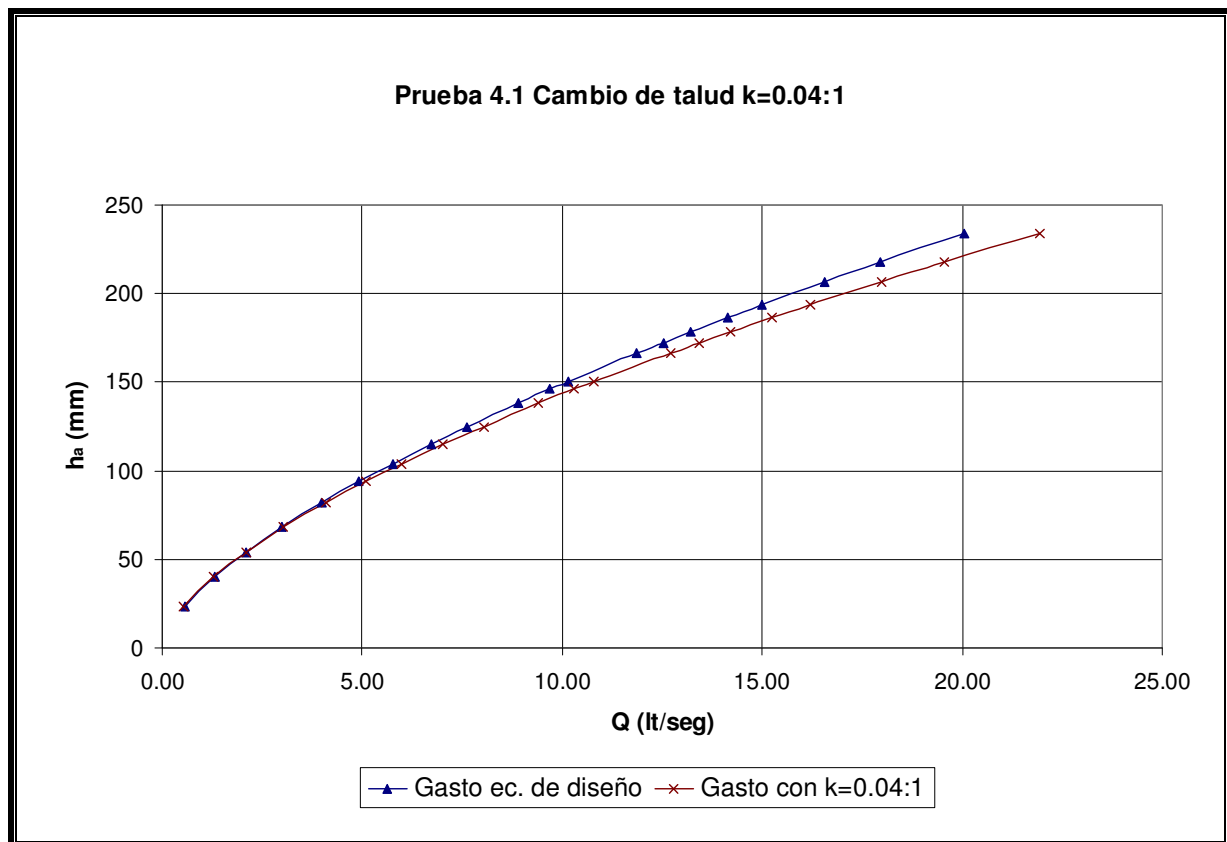
Gráfica 7. Prueba con rejilla

Prueba 4 Cambio de talud (k).

4.1 k=0.04:1

Tabla 11. Resultados

Carga	Gasto real aforado	Gasto ec. de calibración	Gasto k=0.04:1
h_a (mm)	Q (lt/seg)	$Q=0.004492h_a^{1,54061}$ (lt/seg)	$Q=0.0035137h_a^{1.60198}$ (lt/seg)
23	0.61	0.56	0.53
40	1.06	1.32	1.29
54	2.06	2.10	2.09
68	3.06	2.99	3.03
82	4.08	3.99	4.09
94	5.14	4.92	5.09
104	6.06	5.75	5.98
115	7.07	6.72	7.03
125	8.17	7.64	8.03
138	9.36	8.90	9.41
146	10.45	9.70	10.30
150	11.03	10.15	10.80
166	12.64	11.86	12.70
172	13.71	12.53	13.44
178	14.15	13.20	14.20
186	15.06	14.13	15.23
194	16.24	14.99	16.20
207	17.98	16.57	17.98
218	19.56	17.95	19.54
234	21.77	20.07	21.94

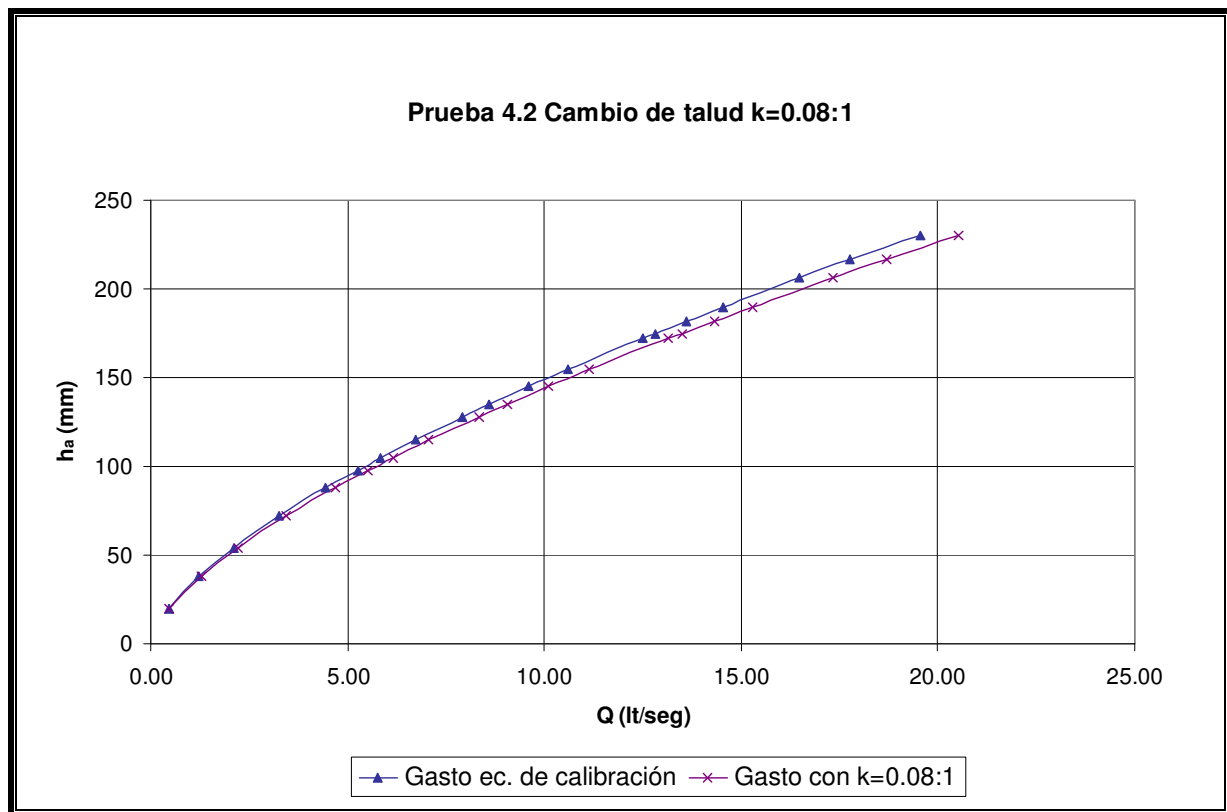


Gráfica 8. Cambio de talud

4.2 $k=0.08:1$

Tabla 12. Resultados

Carga	Gasto real aforado	Gasto ec. de calibración	Gasto $k=0.08:1$
h_a (mm)	Q (lt/seg)	$Q=0.004492h_a^{1.54061}$ (lt/seg)	$Q=0.0047735h_a^{1.53856}$ (lt/seg)
20	0.65	0.45	0.48
38	1.16	1.22	1.29
54	1.84	2.10	2.21
72	3.06	3.26	3.44
88	4.19	4.45	4.68
98	5.02	5.25	5.53
105	6.06	5.84	6.15
115	7.07	6.72	7.07
128	8.17	7.92	8.34
135	9.01	8.60	9.05
145	10.27	9.60	10.10
155	11.03	10.60	11.15
172	13.06	12.49	13.13
175	14.15	12.83	13.49
182	15.06	13.62	14.32
190	16.00	14.56	15.31
206	18.24	16.49	17.33
216	20.10	17.78	18.69
230	22.06	19.54	20.54

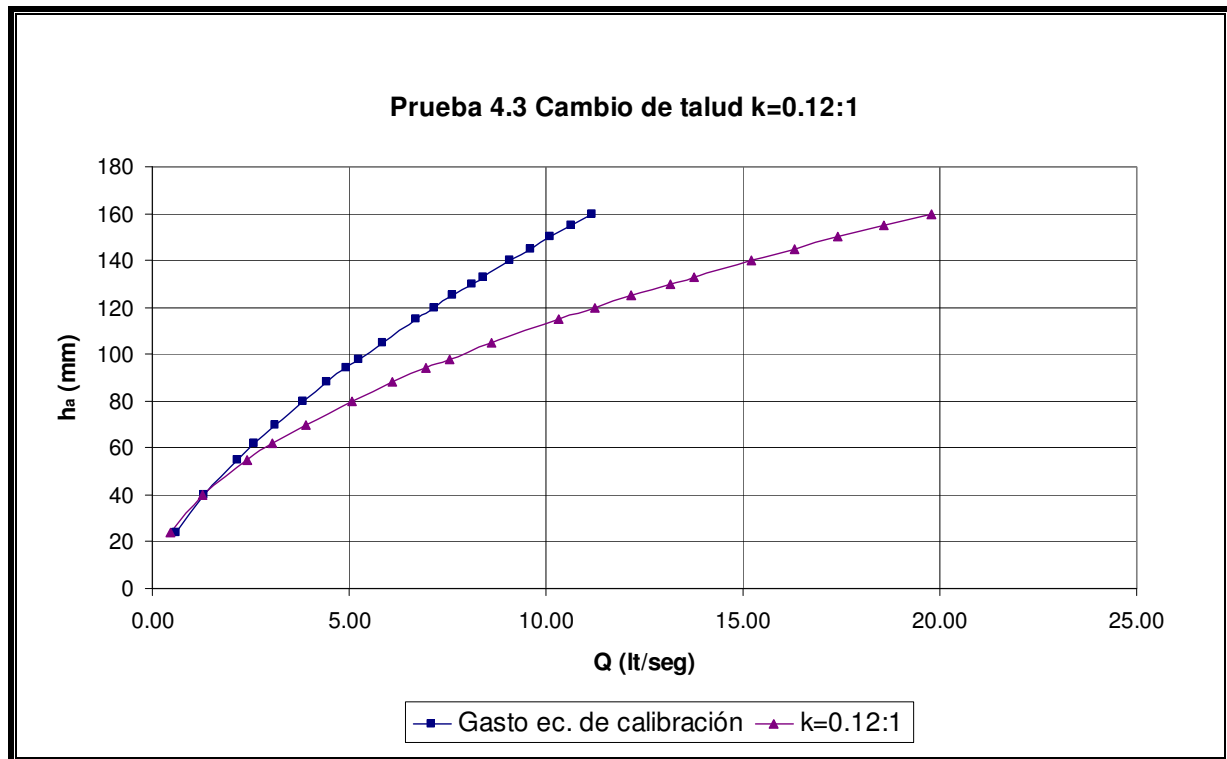


Gráfica 9. Cambio de talud

4.3 $k=0.12:1$

Tabla 13. Resultados

Carga	Gasto real aforado	Gasto ec. de calibración	Gasto $k=0.12:1$
h_a (mm)	Q (lt/seg)	$Q=0.004492h_a^{1.54061}$ (lt/seg)	$Q=0.0009075h_a^{1.96833}$ (lt/seg)
24	0.58	0.60	0.47
40	1.06	1.32	1.29
55	2.06	2.16	2.42
62	3.06	2.59	3.06
70	4.08	3.13	3.89
80	5.02	3.84	5.06
88	6.06	4.45	6.10
94	7.07	4.92	6.94
98	8.01	5.25	7.54
105	9.01	5.84	8.63
115	10.08	6.72	10.33
120	11.03	7.17	11.23
125	12.02	7.64	12.17
130	13.06	8.11	13.15
133	14.15	8.40	13.75
140	15.06	9.09	15.21
145	16.00	9.60	16.30
150	16.98	10.11	17.42
155	19.02	10.64	18.58
160	21.20	11.17	19.78

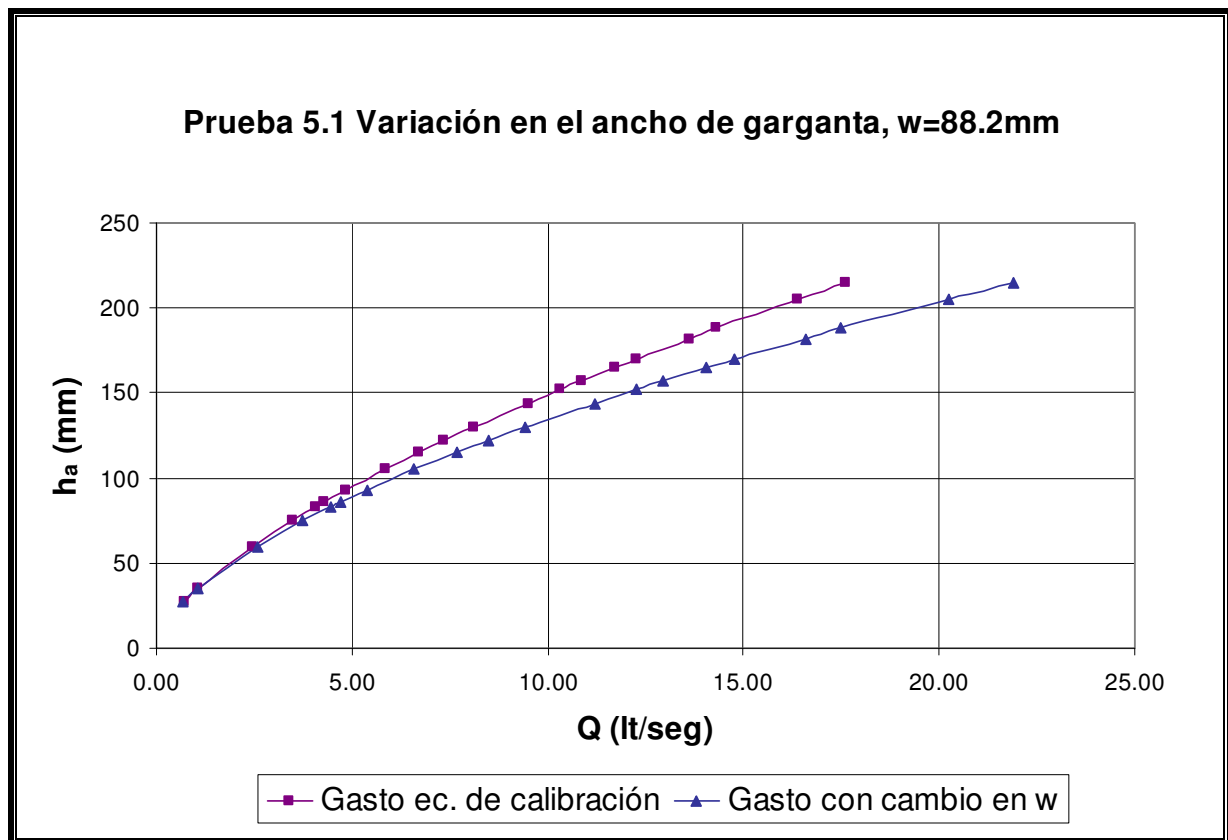


Gráfica 10. Cambio de talud

Prueba 5. Variación en el ancho de garganta (w).**5.1 w=88.2mm**

Tabla 14. Resultados

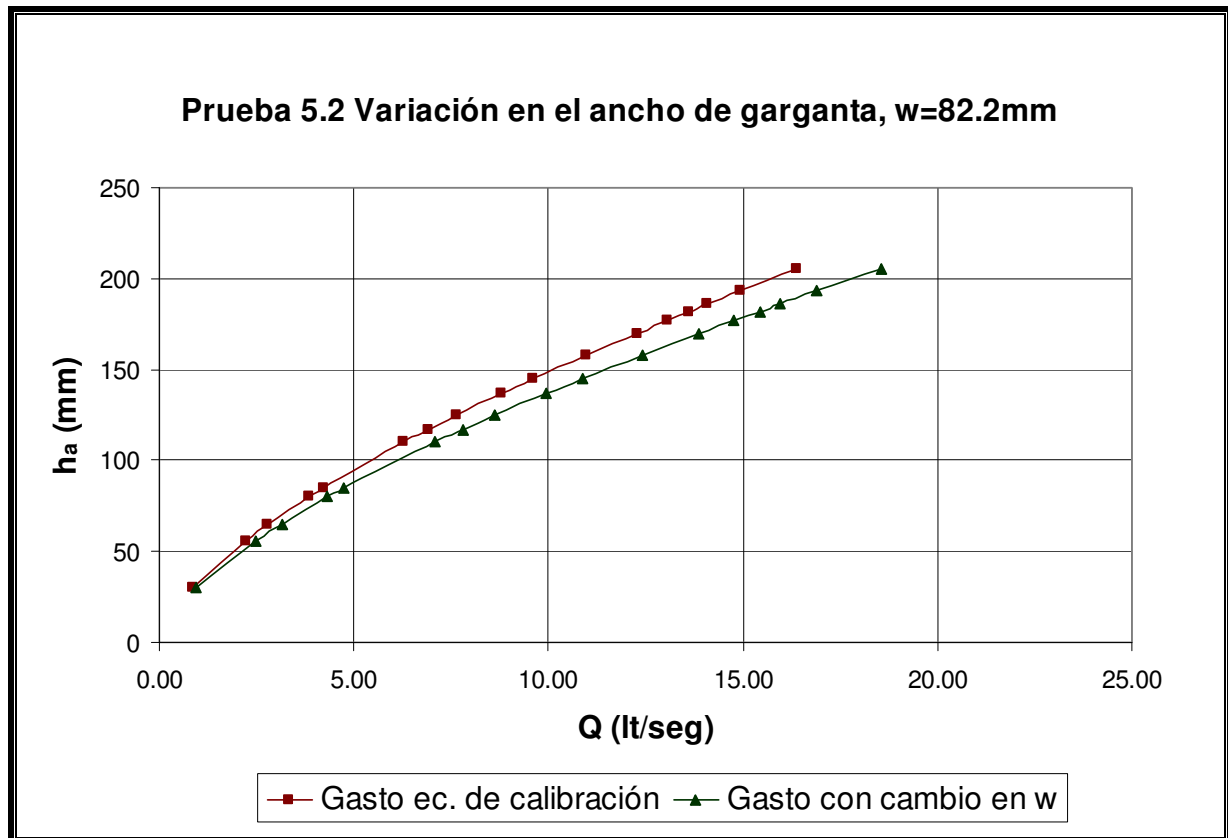
Carga	Gasto real aforado	Gasto ec. de calibración	Gasto con cambio en w
h_a (mm)	Q (lt/seg)	$Q=0.004492h_a^{1.54061}$ (lt/seg)	$Q=0.0027101h_a^{1.67546}$ (lt/seg)
27	0.69	0.72	0.68
35	1.11	1.07	1.05
60	2.13	2.47	2.58
75	3.16	3.48	3.75
83	4.08	4.06	4.45
86	5.40	4.29	4.72
93	6.06	4.84	5.38
105	7.07	5.84	6.60
115	8.17	6.72	7.68
122	9.01	7.36	8.48
130	10.08	8.11	9.44
144	11.03	9.50	11.20
152	12.22	10.32	12.26
157	13.06	10.85	12.95
165	14.15	11.71	14.07
170	15.06	12.27	14.79
182	16.00	13.62	16.58
188	16.98	14.32	17.51
205	19.29	16.37	20.24
215	21.20	17.61	21.92

Gráfica 11. Variación de w

5.2 $w=82.2\text{mm}$

Tabla 15. Resultados

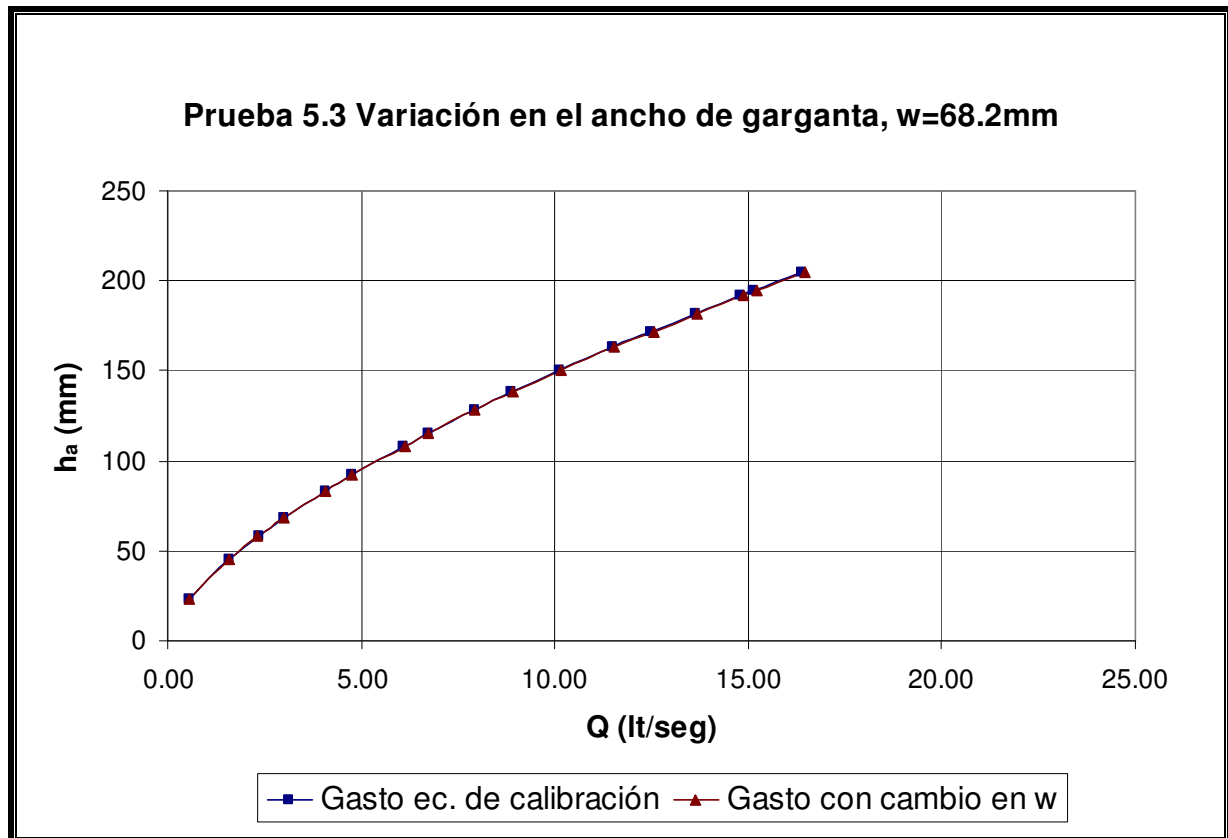
Carga	Gasto real aforado	Gasto ec. de calibración	Gasto con cambio en w
h_a (mm)	Q (lt/seg)	$Q=0.004492h_a^{1.54061}$ (lt/seg)	$Q=0.0049381h_a^{1.54634}$ (lt/seg)
30	1.06	0.85	0.95
56	2.13	2.22	2.49
65	3.06	2.79	3.14
80	4.08	3.84	4.33
85	5.02	4.22	4.75
110	7.07	6.27	7.08
117	8.01	6.90	7.79
125	9.01	7.64	8.63
137	10.08	8.80	9.95
145	11.03	9.60	10.86
158	12.22	10.96	12.40
170	13.49	12.27	13.89
177	14.60	13.05	14.78
182	15.53	13.62	15.43
186	16.00	14.09	15.96
193	16.98	14.91	16.90
205	19.02	16.37	18.55

Gráfica 11. Variación en w

5.3 $w=68.2\text{mm}$

Tabla 16. Resultados

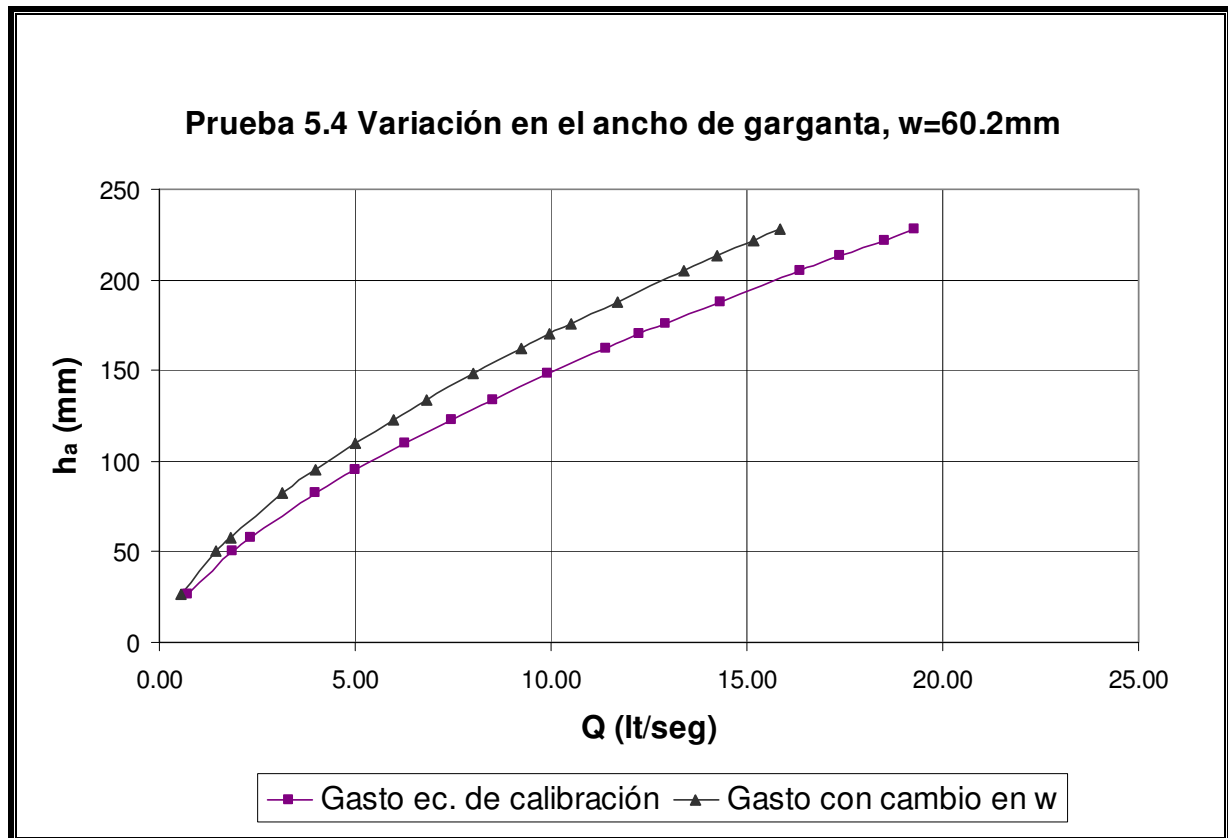
Carga	Gasto real aforado	Gasto ec. de calibración	Gasto con cambio en w
h_a (mm)	Q (lt/seg)	$Q=0.004492h_a^{1.54061}$ (lt/seg)	$Q=0.0043814h_a^{1.54645}$ (lt/seg)
23	0.65	0.56	0.56
45	1.33	1.58	1.58
58	2.06	2.34	2.34
68	3.06	2.99	2.99
83	4.08	4.06	4.07
92	5.02	4.76	4.77
108	6.06	6.10	6.11
115	7.07	6.72	6.74
128	8.01	7.92	7.95
138	9.01	8.90	8.93
150	10.08	10.11	10.16
163	11.03	11.50	11.55
172	12.02	12.49	12.55
182	13.93	13.62	13.70
192	15.06	14.80	14.88
195	16.00	15.15	15.24
205	16.98	16.37	16.47

Gráfica 12. Variación en w

5.4 $w=60.2\text{mm}$

Tabla 17. Resultados

Carga	Gasto real aforado	Gasto ec. de calibración	Gasto con cambio en w
h_a (mm)	Q (lt/seg)	$Q=0.004492h_a^{1.54061}$ (lt/seg)	$Q=0.0029683h_a^{1.58072}$ (lt/seg)
27	0.65	0.72	0.54
50	1.01	1.86	1.44
58	1.98	2.34	1.82
82	3.06	3.99	3.15
95	4.08	5.00	3.97
110	5.02	6.27	5.00
123	6.06	7.45	5.97
134	7.07	8.50	6.84
148	8.01	9.91	8.00
162	9.01	11.39	9.23
170	10.08	12.27	9.96
176	11.03	12.94	10.52
188	12.02	14.32	11.68
205	13.06	16.37	13.39
213	14.15	17.36	14.22
222	15.06	18.50	15.19
228	16.00	19.28	15.84

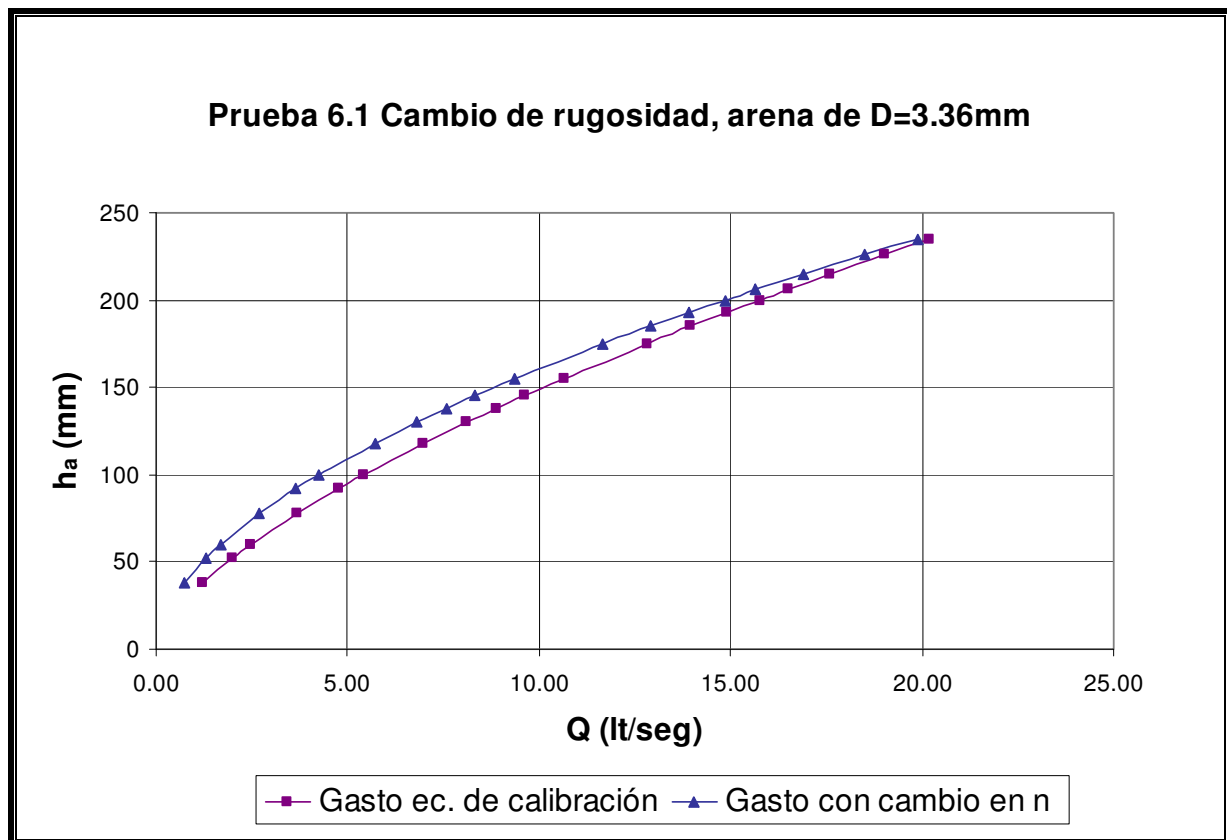
Gráfica 13. Variación en w

Prueba 6. Cambio de rugosidad (n)

6.1 Arena de $D=3.36\text{mm}$

Tabla 18. Resultados

Carga	Gasto real aforado	Gasto ec. de calibración	Gasto con cambio en n
h_a (mm)	Q (lt/seg)	$Q=0.004492h_a^{1.54061}$ (lt/seg)	$Q=0.0010241h_a^{1.80842}$ (lt/seg)
38	0.58	1.22	0.74
52	1.06	1.98	1.30
60	2.06	2.47	1.68
78	3.06	3.69	2.70
92	4.08	4.76	3.64
100	5.02	5.42	4.24
118	6.06	6.99	5.72
130	7.07	8.11	6.81
138	8.01	8.90	7.59
145	9.01	9.60	8.30
155	10.08	10.64	9.36
175	11.03	12.83	11.66
185	12.02	13.97	12.89
193	13.06	14.91	13.92
200	14.15	15.76	14.84
206	15.06	16.49	15.66
215	16.00	17.61	16.92
226	16.98	19.02	18.52
235	19.02	20.20	19.87

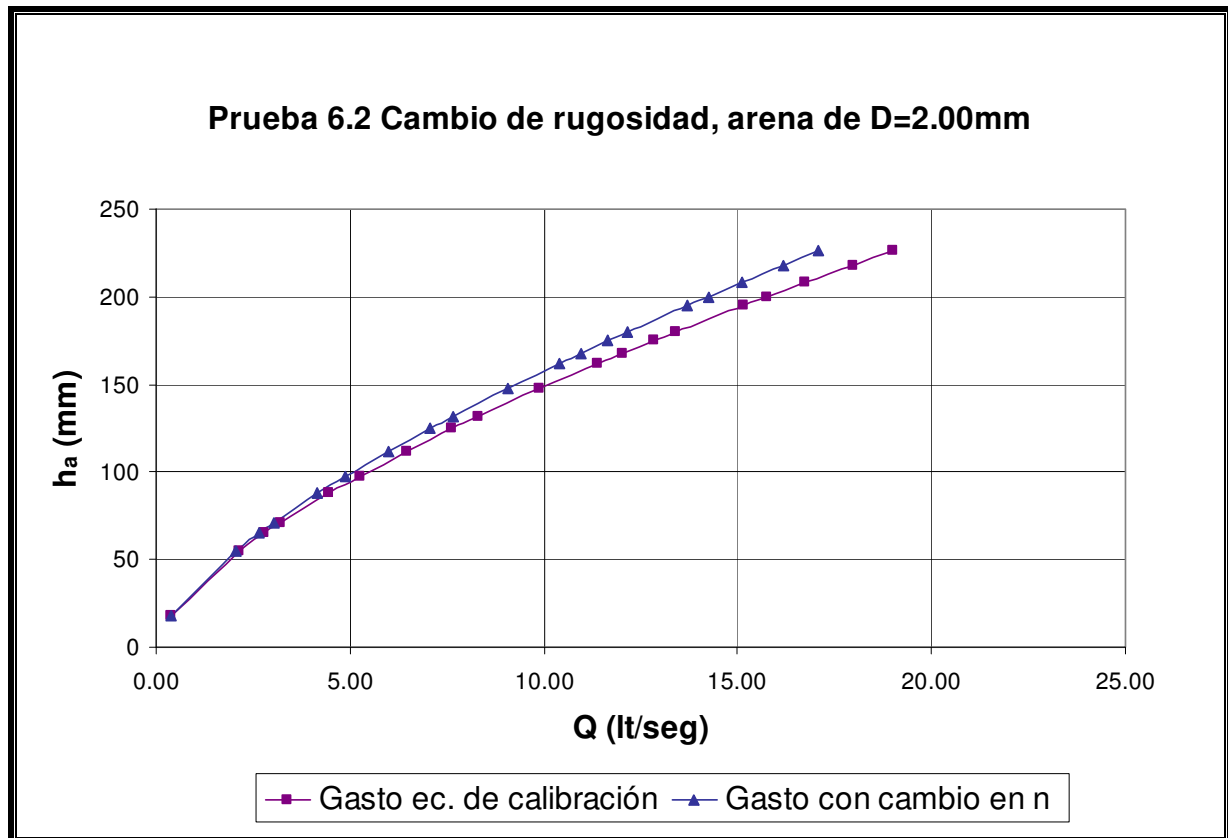


Gráfica 14. Cambio de rugosidad

6.2 Arena de D=2.00mm

Tabla 19. Resultados

Carga	Gasto real aforado	Gasto ec. de calibración	Gasto con cambio en n
h_a (mm)	Q (lt/seg)	$Q=0.004492h_a^{1,54061}$ (lt/seg)	$Q=0.0051028h_a^{1.49741}$ (lt/seg)
18	0.61	0.39	0.39
55	1.06	2.16	2.06
65	2.06	2.79	2.65
71	3.06	3.20	3.02
88	4.08	4.45	4.16
98	5.02	5.25	4.89
112	6.06	6.45	5.97
125	7.07	7.64	7.04
132	8.01	8.31	7.64
148	9.01	9.91	9.07
162	10.08	11.39	10.38
168	11.03	12.04	10.97
175	12.02	12.83	11.66
180	13.06	13.39	12.16
195	14.15	15.15	13.71
200	15.06	15.76	14.24
208	16.00	16.74	15.10
218	16.98	17.99	16.20
226	19.02	19.02	17.10

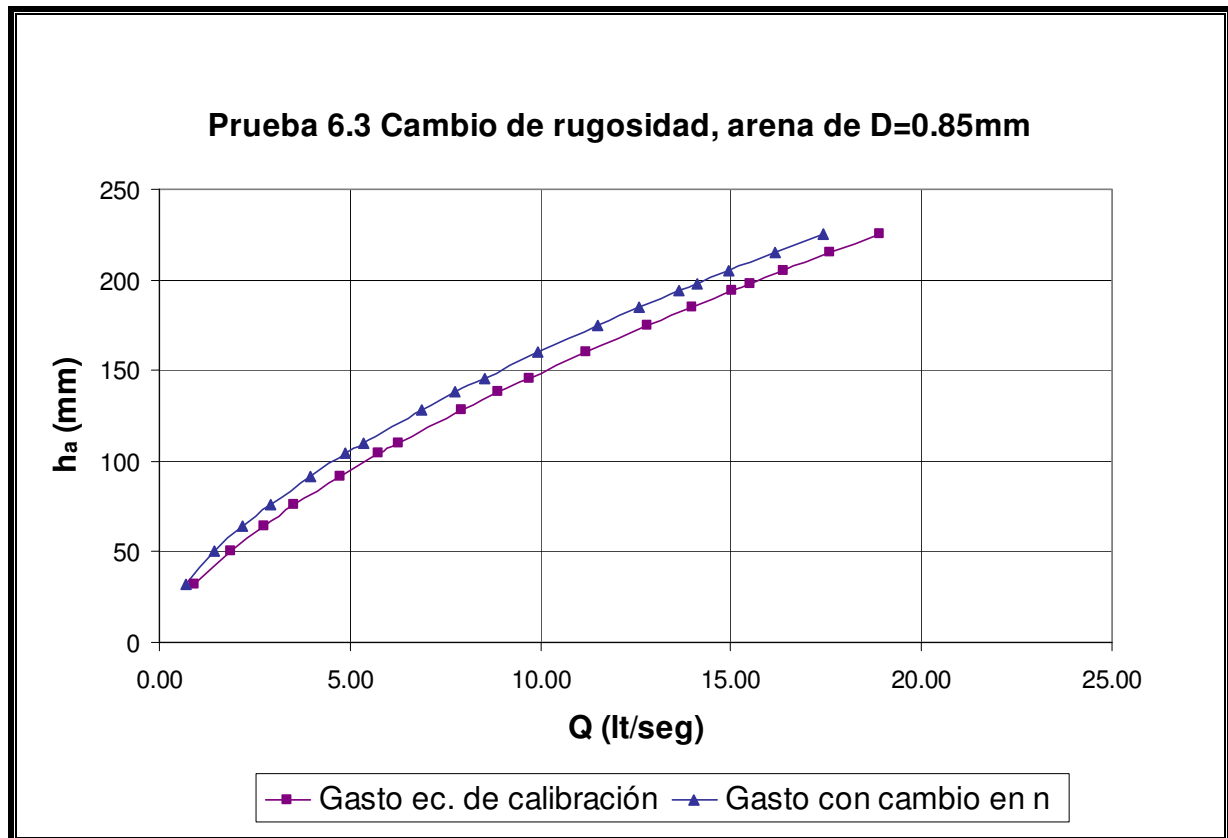


Gráfica 15. Cambio de rugosidad

6.3 Arena de D=0.85mm

Tabla 20. Resultados

Carga	Gasto real aforado	Gasto ec. de calibración	Gasto con cambio en n
h_a (mm)	Q (lt/seg)	$Q=0.004492h_a^{1.54061}$ (lt/seg)	$Q=0.0022626h_a^{1.65229}$ (lt/seg)
32	0.82	0.94	0.69
50	1.06	1.86	1.45
64	2.06	2.72	2.18
76	3.06	3.55	2.90
92	4.08	4.76	3.98
104	5.02	5.75	4.87
110	6.06	6.27	5.34
128	7.07	7.92	6.86
138	8.01	8.90	7.77
146	9.01	9.70	8.53
160	10.08	11.17	9.92
175	11.03	12.83	11.50
185	12.02	13.97	12.61
194	13.06	15.03	13.64
198	14.15	15.51	14.10
205	15.06	16.37	14.94
215	16.00	17.61	16.16
225	16.98	18.89	17.42

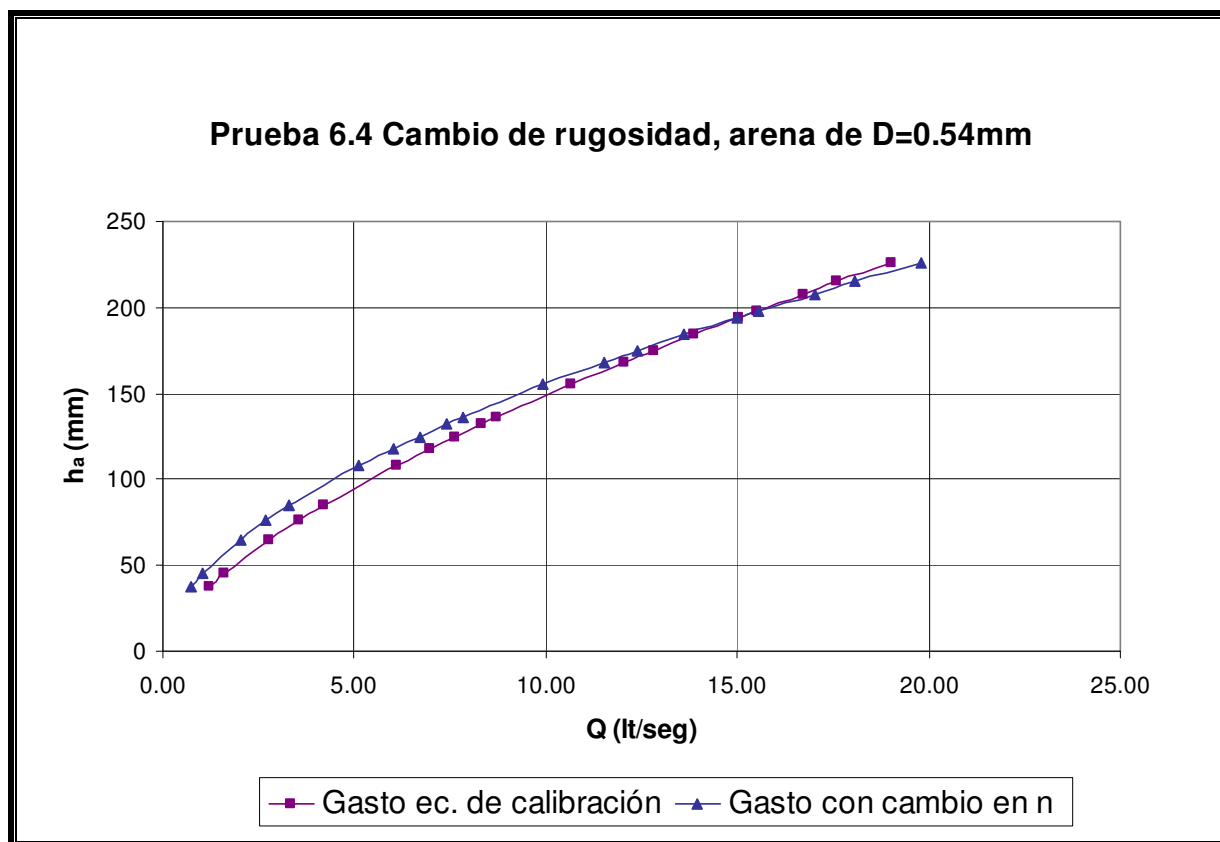


Gráfica 16. Cambio de rugosidad

6.4 Arena de D=0.54mm

Tabla 21. Resultados

Carga	Gasto real aforado	Gasto ec. de calibración	Gasto con cambio en n
h_a (mm)	Q (lt/seg)	$Q=0.004492h_a^{1.54061}$ (lt/seg)	$Q=0.0009727h_a^{1.83046}$ (lt/seg)
38	0.58	1.22	0.76
45	1.06	1.58	1.03
65	2.06	2.79	2.03
76	3.06	3.55	2.70
85	4.08	4.22	3.31
108	5.02	6.10	5.13
118	6.06	6.99	6.03
125	7.07	7.64	6.70
132	8.01	8.31	7.41
136	9.01	8.70	7.82
155	10.08	10.64	9.94
168	11.03	12.04	11.52
175	12.02	12.83	12.41
184	13.06	13.86	13.60
194	14.15	15.03	14.99
198	15.06	15.51	15.56
208	16.00	16.74	17.03
215	16.98	17.61	18.09
226	19.02	19.02	19.82



Gráfica 17. Cambio de rugosidad

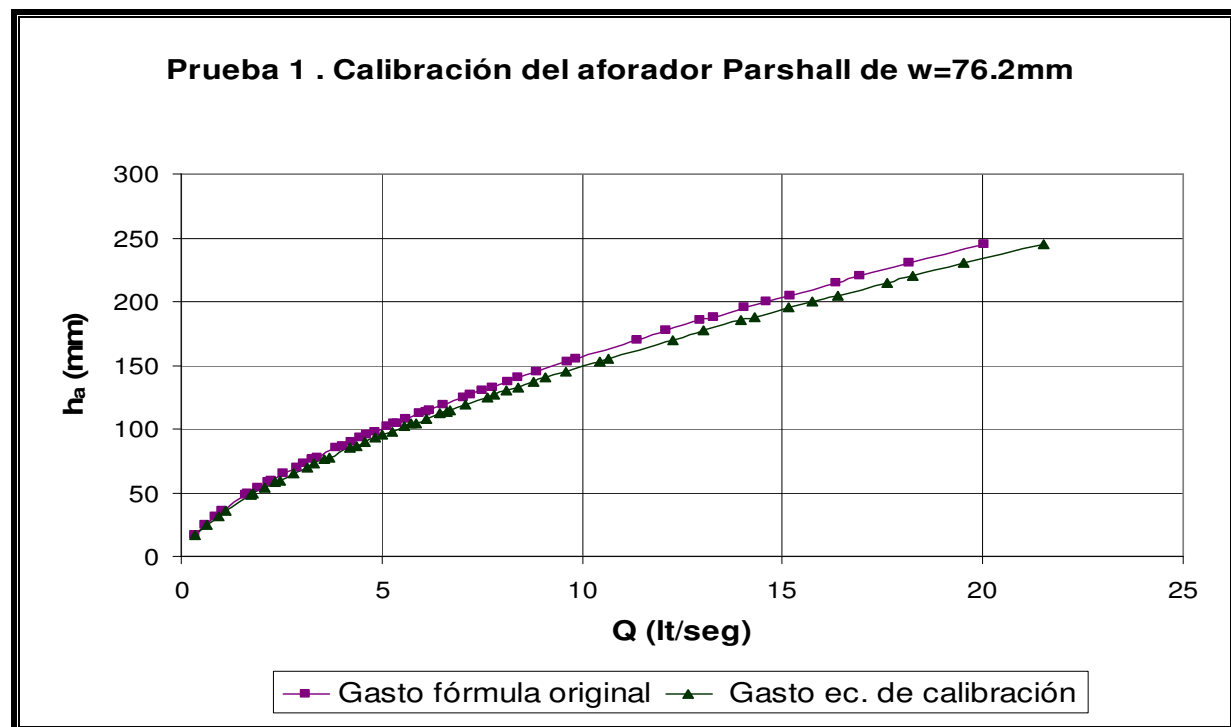
En el siguiente capítulo analizaremos e interpretaremos los resultados presentados en el presente capítulo, con la finalidad de identificar las diferencias en el funcionamiento del aforador Parshall ocasionadas por las alteraciones que pudieran existir en el procedimiento de su construcción.

CAPÍTULO 7.- ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

7.1 INTRODUCCIÓN

La interpretación y el análisis de los resultados es la parte esencial para la cual fue propuesto este trabajo de investigación, ya que mediante los resultados nos daremos cuenta de si es que el funcionamiento del aforador Parshall en condiciones originales de diseño difiere de una manera significativa de su funcionamiento con las alteraciones, así mismo identificaremos los factores que más afectan a las mediciones.

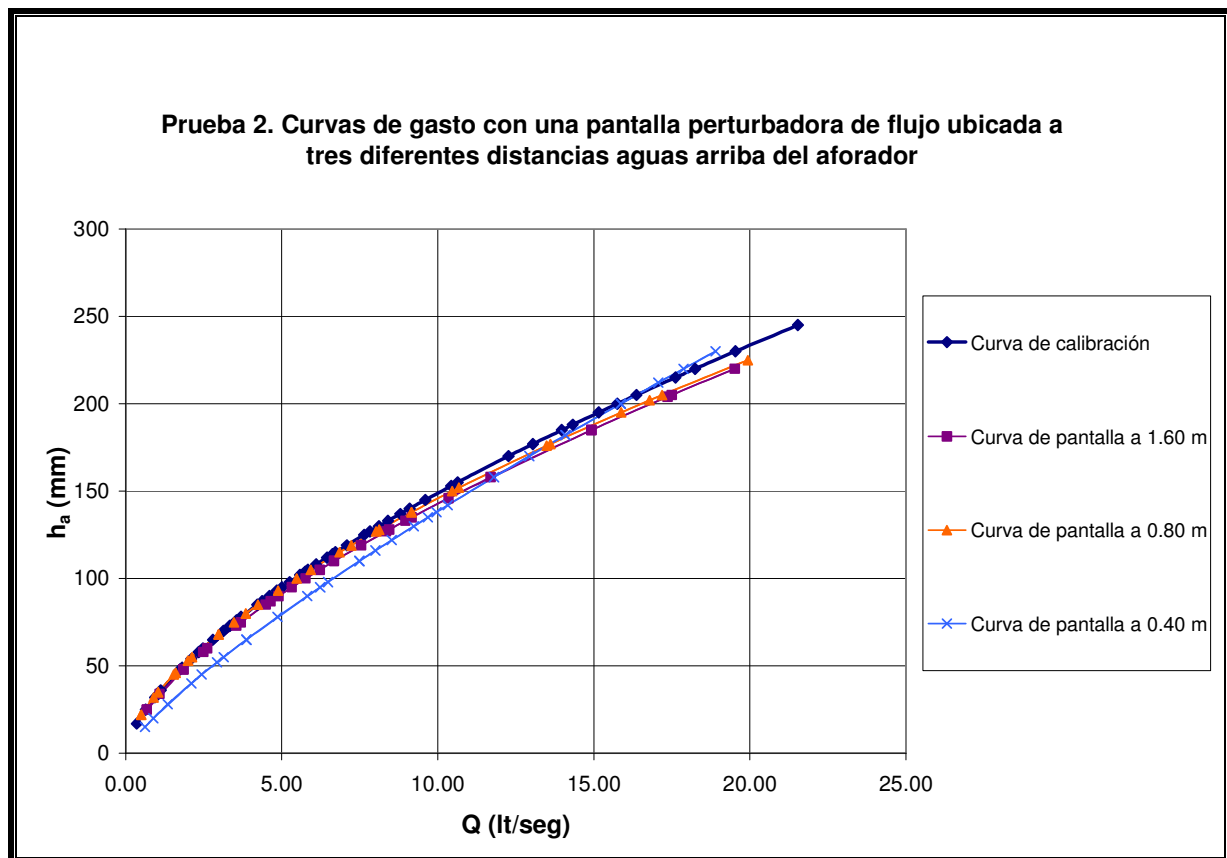
7.2 Resultados



Gráfica 18. Calibración

Esta prueba fue la base para las demás pruebas a realizar; como podemos observar en los resultados presentados en las tablas del capítulo anterior y en la gráfica, la curva característica de nuestro modelo experimental pasa debajo de la curva de gasto obtenido con la ecuación que marcan los estándares internacionales, por lo que podemos identificar que, en nuestro modelo existe un mayor gasto circulante que el gasto determinado con la ecuación original para la misma carga. Lo cual se hace más notable en función del crecimiento del gasto que pasa a través del aforador.

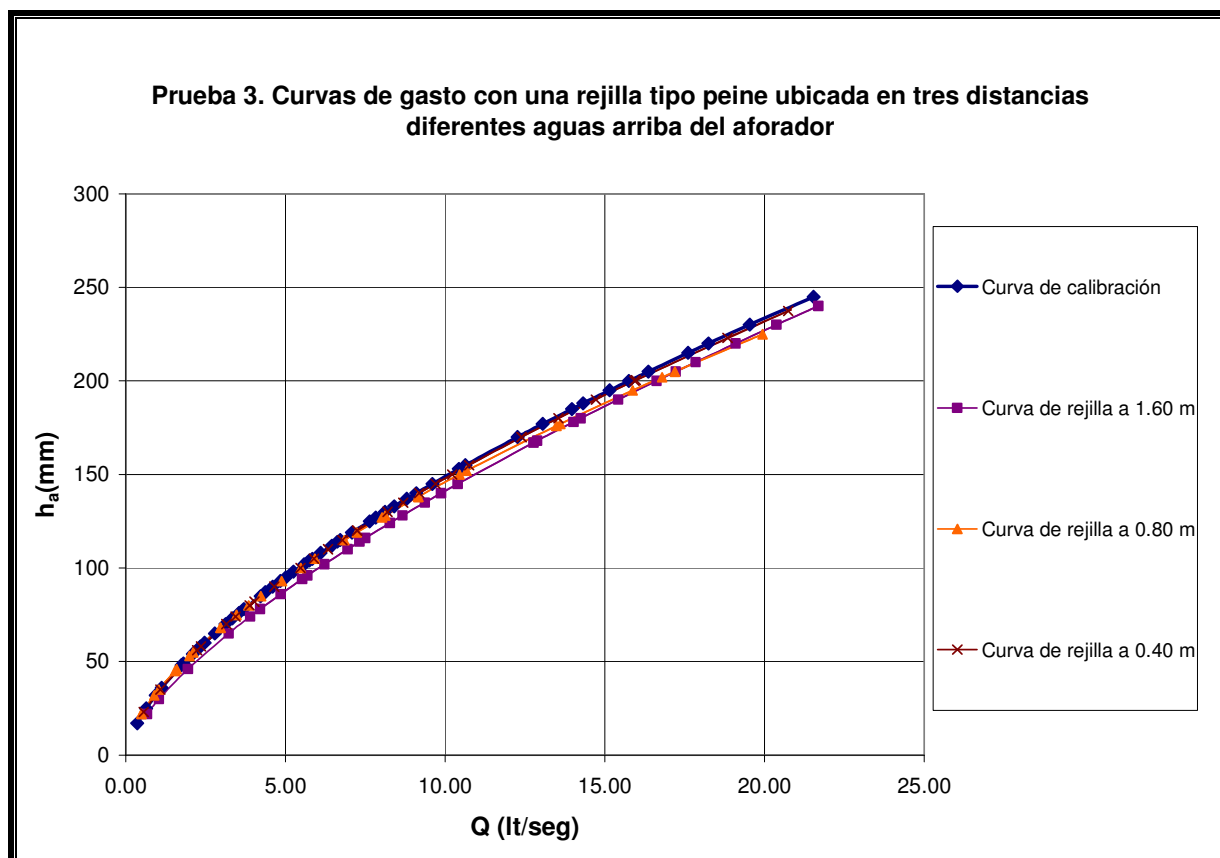
Prueba 2. Perturbación del flujo de llegada con una pantalla plana normal al flujo.



Gráfica 19. Curvas de gasto con pantalla perturbadora de flujo

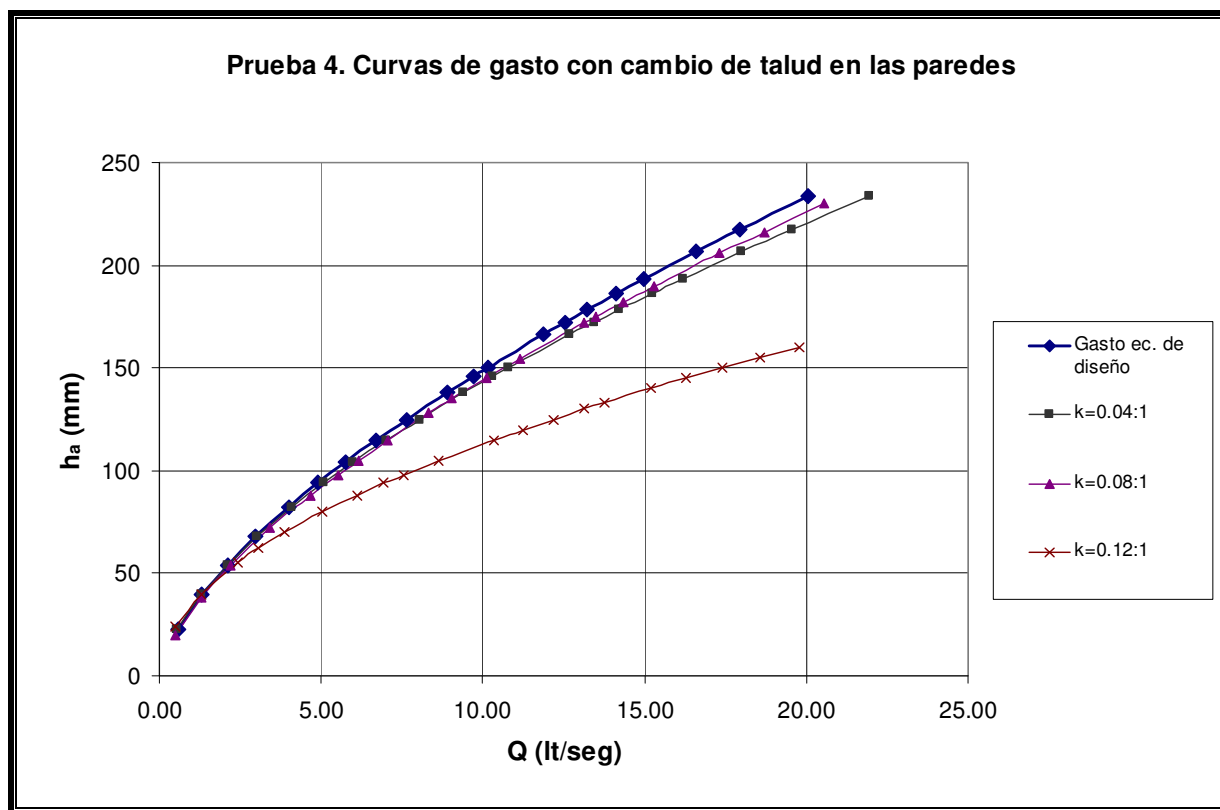
Observando la gráfica y habiendo observado en el capítulo anterior los datos resultantes del procedimiento de prueba, podemos ver que los gastos que pasan por el aforador con este tipo de perturbación en el flujo son mayores en cada medición de carga, lo cual se observa claramente en la gráfica donde están representadas las curvas tanto la de calibración como el grupo de curvas correspondientes a las pruebas de las distancias en que fue colocada la pantalla. También observamos que disminuyó el gasto máximo circulante a través del aforador.

Prueba 3. Desviación de las líneas de corriente con una rejilla tipo peine con esviajamientos de 30°.



Gráfica 20. Curvas de gasto con rejilla tipo peine

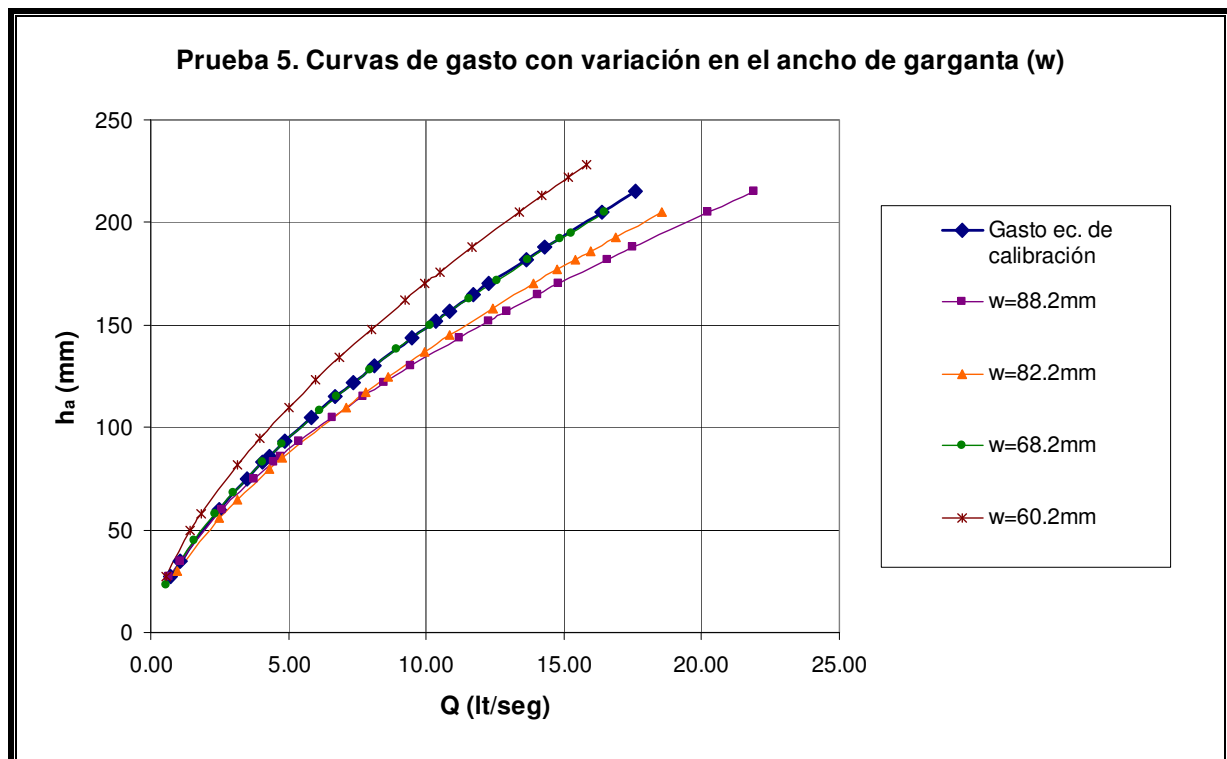
En esta prueba observamos que el efecto que causa la alteración en las líneas de corriente de llegada al dispositivo aforador no cambia significativamente el comportamiento del aforador Parshall; como se observa en la gráfica, el grupo de curvas correspondientes a cada una de las distancias de prueba de la rejilla, sigue un comportamiento muy similar al de la curva de calibración del dispositivo, con lo cual suponemos que el funcionamiento del aforador es insensible a este tipo de alteración en el flujo.

Prueba 4. Cambio de talud (k).

Gráfica 21. Variación en el talud de las paredes del aforador

En esta prueba se pudo verificar experimentalmente el efecto que causa el desplome en las paredes del aforador Parshall, mediante las pruebas nos dimos cuenta de que al modificar los taludes de las paredes aumentaba el área hidráulica de la sección transversal de cada sección del aforador, lo cuál nos trajo como consecuencia lo que se observa en la gráfica, teniendo que para las primeras dos condiciones la alteración en la medición se puede decir que es razonable, pero en la tercera condición se sale totalmente de contexto con respecto a la curva de calibración. Por lo que debemos recomendar que se tenga un especial cuidado en este aspecto.

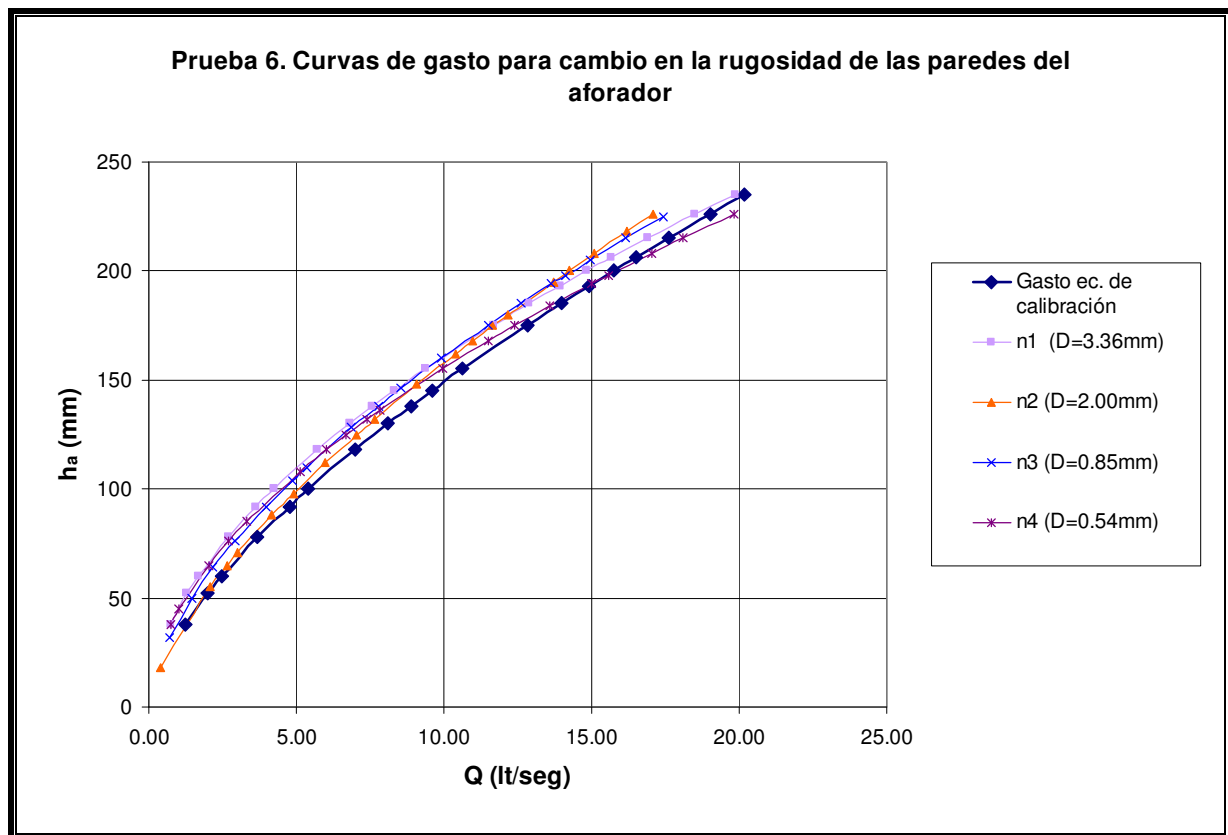
Prueba 5. Variación del ancho de la garganta (w).



Gráfica 22. Variación del ancho de garganta (w)

La presente prueba arrojó los siguientes resultados experimentales; tal como era de suponerse, al alterar la sección transversal de cada sección del aforador Parshall cambió el funcionamiento del mismo, en la gráfica se muestran las cuatro condiciones de alteración en el ancho de garganta, de tales curvas representativas observamos que los anchos de garganta mayores que el ancho de diseño funcionan de manera tal que permiten circular un mayor gasto a través del aforador que el gasto que circula en condiciones normales de operación para un mismo valor de la carga; por lo que respecta a la curva de gasto de $w=68.2\text{mm}$ se observa que prácticamente sigue la misma tendencia que la curva de calibración, no así la curva de $w=60.2\text{mm}$ la cual podemos observar se encuentra arriba de la curva de calibración, indicando de esta manera que al disminuir el área hidráulica del aforador el gasto circulante a través del aforador es menor que el gasto que circula por él en condiciones normales de operación para una misma carga. Así pues debemos de hacer énfasis y tener especial cuidado en las dimensiones originales de diseño para la construcción del aforador.

Prueba 6. Cambio de rugosidad



Gráfica 23. Cambio en la rugosidad

Para tal prueba, identificamos gracias a los resultados obtenidos y presentados en el capítulo 6, las alteraciones producidas por el cambio de rugosidad en las paredes de nuestro aforador; por lo cual al observar el grupo de curvas correspondientes a las diferentes rugosidades colocadas en el aforador para la verificación experimental de su funcionamiento, nos damos cuenta de que se encuentran ubicadas por arriba de la curva de calibración de nuestro dispositivo, lo cual indica que los gastos son menores que los que pasan estando el aforador en sus condiciones originales de funcionamiento, esto para un mismo valor de la carga; sin embargo el aforador Parshall mostró un buen funcionamiento en el transcurso de las pruebas.

Es así como hemos llegado al final del presente capítulo, y sólo nos resta presentar las conclusiones a las cuales llegamos al estudiar cada caso de alteración, ya sea en el flujo o en las medidas geométricas del aforador Parshall.

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Conclusiones

El trabajo de investigación que dio origen a la presente tesis profesional “Verificación experimental del funcionamiento de aforadores tipo Parshall”, nos ha llevado al objetivo principal de este trabajo, el cual fue verificar el funcionamiento de los aforadores Parshall ante diversos tipos de condiciones que pueden presentarse en campo, pudiendo ser errores en su construcción o alteraciones en el flujo aguas arriba del aforador.

Una vez conjuntados, procesados y analizados todos los datos, tenemos como resultado general que, aunque existen diferencias en la forma de trabajar del aforador entre su condición original y las condiciones que se propusieron para observar su respuesta ante complicaciones existentes en campo, la forma de trabajar de nuestro aforador sigue siendo confiable, por lo que podemos decir que las diferencias entre la condición original de funcionamiento y otra condición que pueda alterar de alguna manera el trabajo del aforador, no son un impedimento para que los aforadores que no son construidos exactamente como lo marcan las Normas Internacionales que rigen la construcción y operación de los aforadores Parshall, tal como lo es la Norma ISO 9826, continúen su trabajo aforando los caudales ya sea de un sistema de riego, de aguas negras, etcétera.

El presente trabajo fue de utilidad para conocer las condiciones que podrían representar un poco la alteración en las mediciones de caudales, dichas alteraciones se presentarían si el cambio en las condiciones originales del aforador fuera demasiado drástico, lo cual pensamos puede evitarse al estar pendientes del diseño, construcción y operación correcta del dispositivo; y si llegasen a existir las alteraciones expuestas a lo largo de la tesis, podemos estar confiados en que el dispositivo aforador tendrá una buena respuesta en su funcionamiento.

8.2 Recomendaciones

Primeramente mencionamos que, no hay cosa alguna que esté exenta de errores; como descubrimos en capítulos anteriores, el error puede venir de diferentes fuentes y una de las más importantes es el error en la lectura de la carga, pueden existir varias lecturas para la misma carga si una persona diferente leyera esa misma lectura en el mismo instante.

Ahora habiendo aclarado el punto anterior, procedemos a exponer las siguientes recomendaciones:

1. Verificar que el diseño y tamaño del dispositivo a utilizar sea el adecuado para el sitio que se eligió para su colocación.
2. Seguir paso a paso el procedimiento de construcción del aforador, es decir verificar que las medidas sean las correctas, y en su defecto si existe algún error, que este no sobrepase los márgenes de error permitidos.
3. Tratar de ser lo más exactos en la lectura de las cargas en el aforador.
4. Si el flujo llega a tornarse muy turbulento y dificulta tomar la lectura de la carga, hacer mínimo dos o tres lecturas y obtener un promedio.

Finalmente concluimos que el presente trabajo de investigación, demostró que los estándares internacionales aunque son muy restrictivos en cuanto a las especificaciones de construcción y operación de los aforadores Parshall no son un impedimento para que operen los aforadores Parshall que no cumplen con el 100% de las condiciones descritas en capítulos anteriores, por lo que la presente tesis profesional marcará una pauta a seguir y abrirá distintos campos de investigación en cuanto al funcionamiento de los aforadores tipo Parshall.

Esperamos que dicho trabajo sea de utilidad para resolver los distintos aspectos que se puedan presentar en la verificación del funcionamiento de un dispositivo aforador tipo Parshall.

BIBLIOGRAFÍA

1. Pedroza González Edmundo. Serie autodidáctica de medición "Canal Parshall". Coordinación de Tecnología Hidráulica (IMTA), CNA.
2. Ackers, W. R., Perkins J. A. y Harrison A. J. M. 1978. "Weirs and Flumes for Flow Measurement". Nueva York: Ed. John Wiley & Sons.
3. ISO 9826. "Measurement of liquid flow in open channels Parshall and SANIIRI flumes".
4. Sotelo Ávila Gilberto. "Hidráulica General volumen 1. Fundamentos". LIMUSA
5. "Water Measurement Manual". U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation.
6. Marinus G. Bos, John A. Roplog, Albert J. Clemmens. "Aforadores de caudal para canales abiertos". International Institute for Land Reclamation and Improvement / ILRI, 1986.
7. Aparicio Mijares Javier. "Fundamentos de Hidrología de Superficie". Editoria Megabyte.