



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**CIVIL – HIDRÁULICA**

**DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA PARA EL AFORO Y CONTROL DE NIVELES EN**  
**CANALES**

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

PRESENTA:  
**ING. ANTONIO ALCÁNTAR GARCÍA**

TUTOR:  
**DR. NAHÚN HAMED GARCÍA VILLANUEVA,**  
Coordinación del área de hidráulica del IMTA

Jiutepec, Morelos. Abril de 2013

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Arroyo Correa Víctor

Secretario: Dr. Alcocer Yamanaka Víctor Hugo

Vocal: Dr. García Villanueva Nahún Hamed

1<sup>er</sup>. Suplente: M.I. Valencia Vargas Juan Carlos

2<sup>d o</sup>. Suplente: Dr. Escalante Sandoval Carlos. A.

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, DEPTI – UNAM Campus Morelos

**TUTOR DE TESIS:**

DR. NAHÚN HAMED GARCÍA VILLANUEVA

-----

**FIRMA**

## DEDICATORIA

**A mi compañera de vida**

*Ing. Adacelia García Rodríguez*

*Por su apoyo, amor y comprensión para llevar a cabo esta etapa mi vida y aunque era necesario ausentarme varios días en la semana siempre estuvo conmigo a cada momento y cada regreso siempre fui recibido como héroe con una sonrisa y un abrazo.*

**A mi madre**

*Profra. Juanita García Cruz*

*Por su apoyo y cariño incondicional, por su ejemplo de empeño, fuerza y superación, por darme las armas necesarias para luchar en la vida, por motivarme y demostrarme que en la vida los verdaderos límites los ponemos nosotros y que somos nosotros los que elegimos hasta donde llegar.*

## *AGRADECIMIENTOS*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), por ser el pilar de la educación en México y permitirme cursar estudios de posgrado de gran calidad.*

*Al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), por su brillante filosofía de preparar a los futuros especialistas del agua y que sin duda me abrió las puertas de sus instalaciones para llevar a cabo el desarrollo de mis estudios.*

*A mi director de tesis el **Dr. Nahún Hamed García Villanueva**, por su confianza, paciencia y apoyo para la realización de este trabajo de tesis, pero sobre todo por su amistad.*

*A la Comisión Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico otorgado durante el periodo de estudios y que fue de gran ayuda para cumplir con el objetivo de culminar el posgrado.*

*Al Ing. Cesar Marín, por su amistad y apoyo otorgado en el laboratorio “Enzo Levy” del IMTA y que fue de gran importancia para la realización de esta tesis.*

*A la M.I. Cecilia Millan, por el apoyo importantísimo en la realización de las simulaciones con software, que ayudaron a tomar mejores decisiones en el desarrollo de esta tesis.*

### ***A mis sinodales:***

*Dr. Víctor Arroyo Correa,*

*Dr. Víctor Hugo Alcocer Yamanaka,*

*Dr. Carlos Escalante Sandoval y el*

*M.I. Juan Carlos Valencia.*

*Por el tiempo dedicado para las revisiones, sugerencias y valiosas aportaciones que hicieron a este trabajo.*

## INDICE

|  |    |
|--|----|
| <b>Introducción</b> .....  | 1  |
| <b>Justificación</b> .....   | 2  |
| <b>Objetivo</b> .....  | 4  |
| <br>   |    |
| <b>Capítulo I</b>  |    |
| <b>Características físicas e hidráulicas del aforador auto-operante</b> .....  | 5  |
| 1.1. Geometría.....  | 5  |
| 1.1.1. Canal de aguas arriba (canal de llegada).....   | 7  |
| 1.1.2. Cabal de aproximación.....  | 7  |
| 1.1.3. Transición convergente.....   | 7  |
| 1.1.4. Sección de control, cresta, resalto o garganta.....   | 8  |
| 1.1.5. Transición divergente.....  | 8  |
| 1.1.6. Estación de aforo o de medición.....  | 8  |
| 1.1.7. Canal de cola o salida.....   | 8  |
| 1.2. Instalación.....  | 9  |
| 1.2.1. La selección del sitio.....   | 9  |
| 1.3. Operación Hidráulica.....   | 10 |
| 1.3.1. Medición de caudales.....   | 10 |
| 1.3.2. Control de niveles.....   | 11 |
| 1.4. Límite modular o sumergencia.....   | 11 |
| 1.5. Ventajas respecto a otros dispositivos de aforo.....  | 13 |
| <br>   |    |
| <b>Capítulo II</b>   |    |
| <b>Diseño hidráulico del aforador auto-operante</b> .....  | 15 |
| 2.1. Sección de control de nivel y gasto para las condiciones de operación máximas permisibles.....                      | 15 |
| 2.2. Sección de control de nivel y gasto para condiciones de operación con caudales inferiores al máximo permisible..... | 18 |
| 2.3. Longitud de la zona de estrangulamiento.....  | 21 |
| 2.4. Calculo del caudal dentro de la zona de estrangulamiento.....   | 22 |
| <br>   |    |
| <b>Capítulo III</b>  |    |
| <b>Diseño del aforador y pruebas experimentales en laboratorio</b> .....   | 29 |
| 3.1. Primer diseño base del aforador experimental.....   | 30 |
| 3.1.1. Primera prueba base.....  | 32 |
| 3.1.1.1. Resultados de primera prueba.....   | 33 |
| 3.2. Segundo diseño base del modelo experimental.....  | 33 |
| 3.2.1. Segunda prueba base No.1.....   | 34 |
| 3.2.1.1. Resultados de la segunda prueba base No.1.....  | 36 |
| 3.2.2. Segunda prueba base No.2.....   | 37 |
| 3.2.2.1. Resultados segunda prueba base No.2.....  | 37 |
| 3.2.3. Tercera prueba base.....  | 38 |
| 3.2.3.1. Resultados de la tercera prueba base No.1 (rampa con 5 cm de altura).....                                       | 41 |

|  |    |
|--|----|
| 3.2.3.2. Resultados de la tercera prueba base No.2 (rampa con 7.5 cm de altura)..... | 43 |
| 3.2.3.3. Resultados de la tercera prueba base No.3 (rampa con 10 cm de altura).....  | 44 |
| 3.2.3.4. Resultados de la tercera prueba base No.4 (rampa con 15 cm de altura).....  | 46 |
| 3.2.3.5. Resultados de la tercera prueba base No.5 (rampa con 20 cm de altura).....  | 47 |
| 3.2.3.6. Resultados de la tercera prueba base No.6 (rampa con 30 cm de altura).....  | 49 |
| 3.2.3.7. Conclusiones y comentarios de resultados de tercera prueba base.....        | 50 |
| 3.2.4. Cuarta prueba base.....   | 51 |
| 3.2.4.1. Resultados de cuarta prueba base.....                                       | 56 |
| 3.2.4.2. Conclusiones y comentarios de resultados de cuarta prueba base.....         | 57 |

#### **Capítulo IV**

|   |    |
|---|----|
| <b>Revisión de aforador mediante modelos de simulación</b> .....            | 58 |
| 4.1. Descripción del modelo numérico FLOW-3D.....                           | 58 |
| 4.1.1.- Análisis de sensibilidad de la malla.....                           | 59 |
| 4.2. Prueba 1(Contracción sin rampa).....                                   | 60 |
| 4.2.1. Resultado de la Prueba 1 (Contracción sin rampa).....                | 60 |
| 4.3. Prueba 2 (Contracción con rampa de 30 cm de altura).....               | 63 |
| 4.3.1. Resultado de la Prueba 2.....  | 63 |
| 4.5. Conclusiones y comentarios de resultados de pruebas de simulación..... | 65 |

#### **Capitulo V**

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| <b>Resumen de resultados</b> ..... | 67 |
| 5.1. Agrupación de resultados..... | 67 |

|                           |    |
|---------------------------|----|
| <b>Conclusiones</b> ..... | 74 |
|---------------------------|----|

|                     |    |
|---------------------|----|
| <b>Anexos</b> ..... | 76 |
|---------------------|----|

|                           |    |
|---------------------------|----|
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b> ..... | 85 |
|---------------------------|----|

## Introducción

A lo largo del tiempo, uno de los grandes retos del hombre ha sido el de poder abastecerse de agua, tan es así que las grandes civilizaciones tuvieron su principal desarrollo a orillas de grandes ríos: la Egipticia (3,000 a.C) a orillas del Nilo, la Mesopotamia (6,000 a.C) entre el Éufrates y Tigris, La del valle del Indo (3,300 a.C.) a orillas del río del mismo nombre y la China (6,000 a.C) a orillas del Yangtsé y Amarillo entre otros. Cabe señalar que tres de ellas se llegaron a instalar en zonas desérticas lo que llevó más aun el grado de dificultad para lograr dicho objetivo.

Las cuatro civilizaciones en particular cuentan con algo en común y es que, además de haber sido reconocidas como grandes culturas por aportación a la humanidad en arte, arquitectura, entre otras, también pueden ser llamadas como grandes civilizaciones agrícolas; es en estas culturas donde el uso de riego agrícola para generar productos de la tierra tuvo su gran apogeo y crecimiento económico en aquellos años y que actualmente sigue siendo una de las practicas más importantes para la producción de alimento.

Los canales para riego han sido sin duda el mejor medio de transporte (aunque no el más eficiente) para abastecer de agua los campos agrícolas, para consumo humano y la industria.

En la actualidad el abastecimiento de agua para riego con canales no podría concebirse sin el uso de aforadores de caudal. El Water Measurement Manual, USBR (2001) señala que además de la facturación adecuada para el uso del agua, muchos beneficios se obtienen mediante la mejora de los programas en sistemas de medición. Una buena gestión del recurso requiere una medición precisa del agua. Algunos beneficios de la medición son:

- Contabilidad exacta y un buen registro que ayuda a asignar cuotas equitativas entre los usuarios.
- Buenas prácticas de medición de agua que facilita la distribución exacta y equitativa del agua dentro del distrito o parcela, lo que resulta en un menor número de problemas y fácil operación.
- Establecimiento de métodos precisos y convenientes de medición para mejorar la evaluación de las pérdidas por filtración en los canales no revestidos. Por lo tanto, la mejora de las determinaciones de los beneficios de costo de canal propuesto y las mejoras de zanjas son posibles.
- Permanentes dispositivos de medición de agua también puede servir de base para futuras mejoras, tales como el monitoreo remoto y la automatización de operación de flujo del canal.

En sistemas de riego y en forma particular en canales abiertos es prioritario contar con sistemas fijos de medición, ya que con ello se asegura un aforo continuo sobre la cantidad de agua que transita sobre su sección. La medición del agua a superficie libre se complica debido a la variabilidad que presenta el tirante de agua y, aún más cuando existen estructuras de control sobre los canales que alteran las condiciones de flujo (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [IMTA], 2010).

Dentro de las estructuras aforadoras para canales de gran capacidad los aforadores de garganta larga son los más adecuados siempre y cuando el canal mismo tenga suficiente bordo libre para que en el quede alojado la sobre elevación que experimenta la superficie libre del agua. El término Aforador de Garganta Larga describe una clase ancha de Aforadores de flujo crítico y los dispositivos del vertedero de cresta ancha usados en la medida del flujo de agua en los canales abiertos. Estos dispositivos son adaptables a una variedad de canales naturales o artificiales, por construir o existentes (USBR, 2001).

Otro parámetro importante que hay que cuidar es que el régimen de flujo sea modular o libre (flujo sobre una estructura cuando el nivel aguas arriba es independiente del nivel aguas abajo) el cual queda definido a través del límite modular (relación de sumergencia en la cual el nivel aguas arriba comienza a ser afectado por el nivel aguas abajo). Por lo tanto este límite modular a veces es sobre pasado debido a la presencia de estructuras de control, lo que origina que el aforador esté en condiciones de ahogamiento (IMTA, 2010).

Un aforador de garganta larga se diseña a través de la teoría hidráulica, para ello se considera que en la estructura aforadora se establece una sección de control, por lo tanto se puede implementar una relación única entre el gasto y la carga sobre la cresta del aforador medida aguas arriba. Esta relación será válida siempre y cuando el flujo sea modular. Cuando el flujo no es modular esta ecuación debe de afectarse a través de un coeficiente “de ahogamiento” el cual depende de la geometría del aforador así como el límite modular y la relación de sumergencia (IMTA, 2010).

## **Justificación**

En México el volumen de agua total concesionada para usos consuntivos para el ejercicio 2010 – 2011 fue de 80,300 millones de metros cúbicos, del cual 76.7% corresponde para el uso agrícola (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2012).

Uno de los objetivos específicos de la Agenda del Agua 2030 presentada en el año 2010 consiste en eficientar el uso del agua en un 61%, dicho objetivo se pretende lograr al incrementar la modernización (revistiendo canales primarios y secundarios) y la tecnificación en distritos y unidades de riego hasta nivel parcelario. Dentro de ese proceso de modernización la actualización y obligación a los usuarios sobre sus sistemas de medición tendrá que ir de la mano para primeramente contar con datos necesarios y confiables sobre el consumo real de

dicho recurso y en base a ello tomar mejores decisiones. Para lograr la modernización en sistemas de medición en canales principalmente se han venido desarrollando diversos métodos y aparatos de aforo; algunos que requieren condiciones muy estrictas para su instalación y funcionamiento, otras que generan un alto costo de instalación y mantenimiento para el usuario y otra más que solo cumplen su cometido muy específico<sup>1</sup> sin arrojar datos de manera adecuada y continua.

Por ello es necesario el desarrollo de nuevas estructuras aforadoras que permitan satisfacer las necesidades de los usuarios como de las autoridades que regulan el servicio. Generar una estructura que cumpla con facilidad en su instalación y bajo costo de mantenimiento, que cubra un rango de gastos medidos menores al mismo gasto máximo de operación ( $Q_{mo}$ ) que circule por el canal y que a su vez permita mantener niveles parecidos al máximo ( $y_{max}$ ) aún cuando los caudales sean menores y principalmente que cumpla la función de aforar de manera exacta y precisa.

---

<sup>1</sup> Que miden un solo nivel de agua y en un horario determinado.

## **Objetivo**

Con base en lo anterior se estableció el siguiente objetivo como parte fundamental de este trabajo.

***Presentar las bases y criterios técnicos para el diseño y operación de una estructura de aforo y control de niveles en canales, mediante el establecimiento de una sección de control en régimen crítico. En forma práctica ésta estructura será de fácil instalación y bajo costo de operación y mantenimiento.***

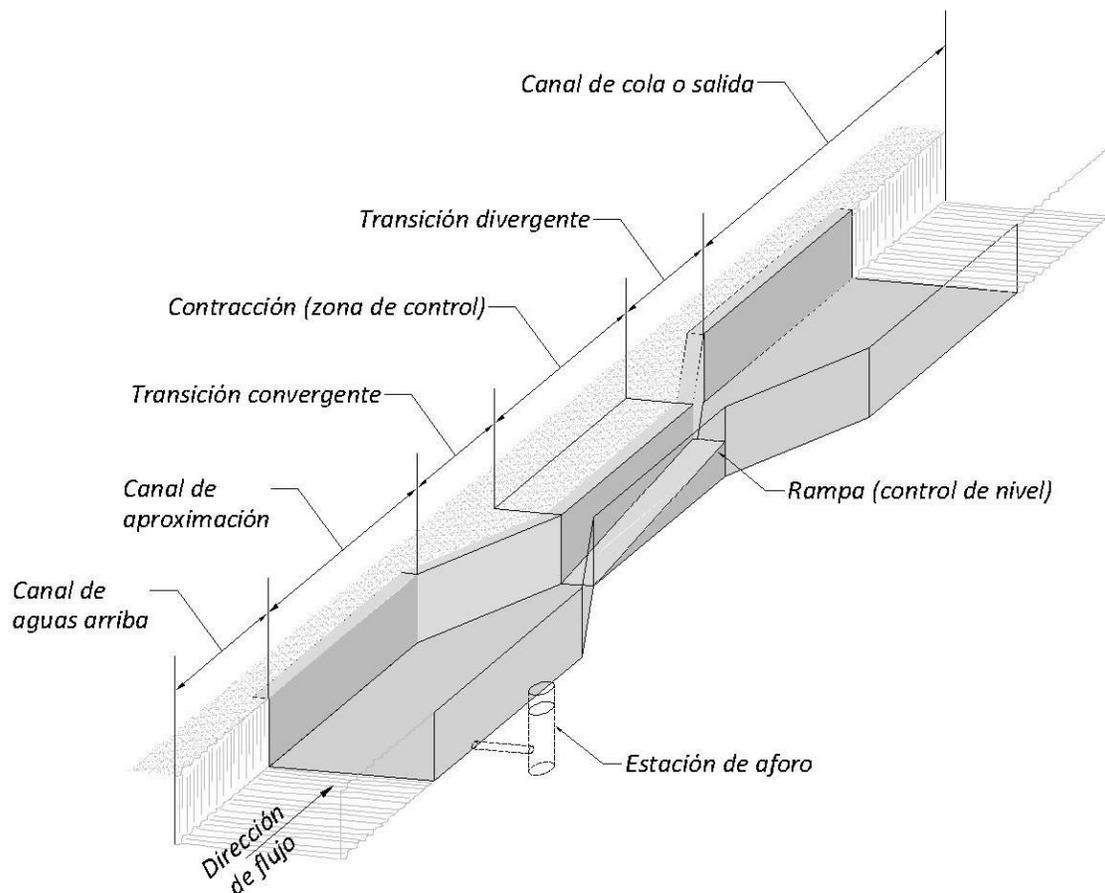
## Capítulo I

### Características físicas e hidráulicas del aforador.

#### 1.1. Geometría.

El aforador propuesto se encuentra dentro de la clasificación de los aforadores de garganta larga. Los Aforadores de Garganta Larga (AGL) son estructuras cuyo único uso es la medición y/o el control de caudales; la estructura establece las condiciones de flujo crítico mediante el estrechamiento de las paredes del canal o la elevación de la plantilla o ambos, en una sección transversal o en un tramo del canal o garganta del aforador (*Figura 1*). De esta forma y con la teoría de flujo crítico, existe una relación única entre el nivel del agua medido aguas arriba de la garganta del aforador y el gasto.

Otra condición para que el aforador sea de garganta larga es que éste tenga una longitud mínima para evitar curvaturas fuertes en el perfil hidráulico del flujo y en las líneas de corriente.



**Figura 1. Geometría general del aforador.**

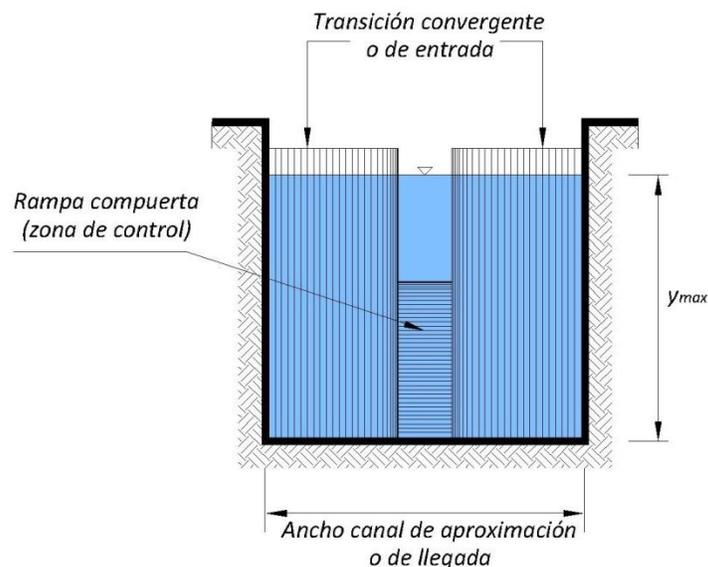
Para que las líneas de flujo sean prácticamente paralelas en la garganta, el aforador no debe tener contracciones bruscas. Así, el efecto de la curvatura en las líneas de corriente y en las pérdidas de carga será insignificante, y será posible calcular el flujo a través del aforador sin tomar en cuenta los efectos de estas curvaturas y sin incurrir en errores significativos.

Hay varios tipos de aforadores de garganta larga. Tomando en cuenta su geometría se pueden dividir en trapezoidales, rectangulares, triangulares y las combinaciones de los anteriores en el canal de aproximación y la garganta.

Es importante que el aforador cuente con una transición del canal de aproximación a la garganta (transición convergente); de otro modo podrían provocarse fuertes pérdidas de carga, además de curvaturas en las líneas de corriente del flujo que impiden el análisis y, por ende se incrementa la dificultad en el diseño.

La transición de salida (transición divergente) también desempeña un papel importante en el funcionamiento de las estructuras, por lo que es conveniente hacer un diseño cuidadoso de la misma. Es en la salida donde se presentan las mayores pérdidas de carga; aquí el flujo puede ser subcrítico o supercrítico que depende de las condiciones aguas abajo. De una transición de salida adecuada depende que la pérdida de energía sea mínima.

El aforador cuenta con varios componentes para su buen funcionamiento, entre los más importantes se pueden observar en las figuras (1) y (2):



**Figura 2. Componentes del aforador de garganta larga (sección transversal).**

### 1.1.1. Canal de aguas arriba

Es la parte correspondiente al canal de llegada (aguas arriba), que como se sabe puede contar con diferentes geometrías en sus secciones transversal según sea el caso del canal a aforar, por lo que pueden ser las secciones transversales de tipo trapecial, circular, triangular, parabólica, rectangular, etc.<sup>2</sup>

### 1.1.2. Canal de aproximación o acceso

Es la parte del aforador que se encuentra entre el canal de llegada y el inicio del tramo convergente. Esta sección es necesaria para el desarrollo de las condiciones uniformes y simétricas del flujo, además de generar una superficie libre del agua estable para poder medir la altura del agua en forma exacta, para el aforador en estudio será necesario que la sección transversal sea de tipo rectangular debido a que el desarrollo de este trabajo de tesis fue hecho para secciones rectangulares.

Si el flujo en el canal de acceso se ve perturbado por las irregularidades en sus límites (paredes y plantilla), por ejemplo rocas grandes o afloramientos de roca, por compuerta u otra característica que genere asimetría transversal del flujo en el canal, la exactitud de la medición puede verse afectada. El flujo en el canal de acceso debe tener una distribución de velocidad simétrica y esto puede conseguirse más fácilmente proporcionando un canal largo de enfoque lineal o de sección transversal constante (International Organization for Standardization [ISO], 1983).

La longitud de canal de acceso deberá ser cinco veces el ancho de la superficie del agua en el flujo máximo ( $Q_{mo}$ ), el flujo no debe circular en el canal de acceso a altas velocidades. Sin embargo, una mayor longitud de canal de aproximación uniforme es deseable si se puede proporcionar fácilmente (ISO, 1983).

### 1.1.3. Transición convergente

Esta sección conecta al canal de aproximación con la sección de control de la estructura. La sección convergente está formada por contracciones laterales. Las contracciones laterales pueden ser rectas o redondeadas. En transición convergente el flujo subcrítico debe acelerarse gradualmente hacia la sección de control, sin que se presenten discontinuidades o separación de flujo, obteniéndose así, líneas de flujo prácticamente paralelas.

Para construir una transición adecuada deben considerarse las siguientes recomendaciones para su dimensionamiento:

---

<sup>2</sup> Para las secciones transversales diferentes a la rectangular, será necesario antes de la sección del canal de aproximación colocar la transición adecuada para cambiar a rectangular, ya que el análisis de este estudio fue hecha para secciones rectangulares.

- El ángulo máximo óptimo entre el eje del canal y una línea que conecte los lados del canal entre las secciones de entrada y de salida es de  $12.5^\circ$  (Chow, 2004)<sup>3</sup>.
- Evítese los ángulos agudos en la superficie del agua o en la estructura, ya que estos inducirán ondas estacionarias extremas y turbulencia (Chow, 2004).

#### 1.1.4. Sección de control, cresta, resalto o garganta.

Es la región en la cual el flujo tiene condiciones críticas. Generalmente, este elemento se conoce como sección de control; sin embargo, algunas veces también se le denomina como cresta o garganta del aforador. La sección de control debe ser horizontal en la dirección del flujo (para gasto máximo), pero en la dirección vertical deberá usarse una rampa (con gastos menores al máximo) para forzar a la formación de las condiciones críticas.

El dimensionamiento del ancho de la sección de control (sección transversal) y la garganta (sección longitudinal) están directamente relacionadas con el gasto máximo que circule por el canal de aforo.

#### 1.1.5. Transición divergente.

La transición divergente es la sección por la cual sale un flujo supercrítico, reduce su velocidad disipando total o parcialmente su energía (IMTA, 2010). En la estructura aforadora, después de cumplir el objetivo de medición en la contracción, el flujo deberá continuar con su trayectoria, por lo que es necesario que el canal regrese nuevamente a su sección de llegada, por lo que será necesario que el aforador cuente con una sección divergente o transición que permita regresar a dicha sección de manera gradual. La sección divergente puede incluso evitarse siempre y cuando el flujo no se vea afectado al momento de la salida.

#### 1.1.6. Estación de aforo o de medición

La estación de medición se encuentra localizada tanto en el canal de aproximación como en la sección de control, ya que la relación entre altura de tirante en el canal de aproximación ( $y_{m\acute{a}x}$ ) y la altura de la rampa ( $w$ ) en la zona de control corresponderá a los datos necesarios para la obtención de los resultados que del aforador se demanda.

#### 1.1.7. Canal de cola o salida

El canal de salida, como su nombre lo indica, se encuentra aguas abajo del aforador. Dentro del canal de salida el nivel del agua es función de la operación del canal, del gasto y de las características hidráulicas aguas abajo del canal y de las estructuras de control. El rango de niveles de agua en esta sección del canal tiene fundamental importancia en el diseño del aforador ya que determina la

---

<sup>3</sup> Cabe la pena señalar que a pesar de la recomendación hecha para el ángulo de la transición convergente, para el caso del aforador en estudio se ha hecho la propuesta de trabajar con un ángulo de aproximadamente  $18^\circ$  al eje del canal.

elevación y el tamaño de la sección de control que se requieren para mantener las condiciones de régimen modular en el aforador.

## **2. Instalación.**

### *2.1. La selección del sitio*

La adecuada ubicación del aforador es importante desde el punto de vista de precisión y facilidad de operación (USBR, 2001). Por conveniencia, dicha ubicación deberá ser fácil acceso en vehículo para propósitos de instalación y mantenimiento. Todas las estructuras de medición o regulación del flujo deberán ubicarse en un tramo de canal donde sea factible medir con exactitud el valor del tirante máximo ( $y_{max}$ ) y altura de rampa ( $w$ ) ya que esto a su vez producirá una pérdida de carga suficiente para obtener una relación única entre  $Q$  y  $w$ .

El aforador debe colocarse en una sección recta del canal, evitando obstrucciones, rugosidades e irregularidades considerables que en él se encuentren, ya sea en las paredes o en la plantilla del mismo.

Es necesario realizar un estudio preliminar para identificar las características físicas e hidráulicas del sitio propuesto, para comprobar que se ajusta a los requisitos necesarios para la medición del caudal del canal. Se debe prestar especial atención a las siguientes características en la selección del sitio (ISO, 1983):

- El ajuste de la longitud del canal para la sección transversal válida.
- La uniformidad de la distribución de velocidad.
- La anulación de un canal de paso.
- Los efectos por el incremento de niveles aguas arriba debido a la estructura de medición.
- Las condiciones aguas abajo (incluyendo la influencia tal como las mareas, convergencia otras corrientes, compuertas y otros elementos de control, incluyendo el crecimiento de malezas estacional, lo que podría causar ahogamiento).
- La impermeabilidad del suelo sobre el cual la estructura debe ser instalada y lo necesario para anclar, asegurar mampostería u otros medios de control de la filtración.
- La necesidad de zonas de inundación, para almacenar el máximo gasto en el canal.
- La estabilidad de los taludes, y la necesidad para ajustar y/o revestir.
- La uniformidad de la sección del canal de acceso.
- Efecto de viento, que puede tener un repercusión considerable en el flujo sobre un río, vertedero o aforador, especialmente cuando éstas son anchas y la cabeza es pequeña, así como también cuando el viento predominante es en dirección transversal.
- El crecimiento de malezas acuáticas.
- Transporte de sedimentos.

Si el sitio no posee las características necesarias para la medición satisfactoria, o si una inspección de corriente muestra que la distribución de velocidades en el canal de acceso se aparta sensiblemente de los ejemplos que se muestran en el anexo C, el sitio no debe utilizarse a menos que las mejoras adecuadas puedan llevarse a cabo. Alternativamente, el rendimiento de la instalación debe ser comprobado por la medición de flujo independiente.

### **3. Operación hidráulica.**

El funcionamiento del aforador de garganta larga se basa en la presencia de flujo crítico en la desembocadura de la garganta. En este caso se cumple la siguiente ecuación:

$$Q = \sqrt{\frac{gA^3}{\alpha T}}$$

Dónde:

Q = Gasto que pasa por el aforador, m<sup>3</sup>/s.

g = Aceleración de la gravedad, m/s<sup>2</sup>.

A = Área hidráulica de la sección de la garganta, m<sup>2</sup>.

$\alpha$  = Coeficiente de corrección por distribución de velocidad, adimensional.

T = Ancho de la superficie libre del agua, m.

Esta ecuación establece el estado que se presenta en el flujo crítico en la desembocadura de la garganta del aforador. El flujo debe ser acelerado en la transición de entrada y desacelerado en la salida, para lo cual se requiere contar con ciertas condiciones geométricas que garanticen que se presenta el flujo crítico y además eviten que este se “ahogue” a la salida de la garganta (Sotelo Ávila, 2002).

Con el objeto de que el aforador funcione correctamente, esto es, para que tenga una relación única entre el tirante a la entrada y el caudal correspondiente, se debe presentar un tirante crítico en la sección de control. Ello se cumple siempre que la carga total de energía a la salida sea menor que el tirante crítico en la garganta (IMTA, 2010).

#### **3.1. Medición de caudales**

El aforador tendrá como función principal la medición de caudales de canales que puedan adaptarse a dicha estructura, cubriendo la mayoría de gastos que en

dicho canal circular, desde gasto máximo ( $Q_{max}$ ) hasta aproximadamente el gasto mínimo ( $Q_{min}$ )<sup>4</sup>.

### 3.2. Control de niveles

Otro de sus objetivos principales del aforador de garganta larga será el de mantener el  $y_{max}$  aguas arriba de la estructura, cuando en el canal circule el gasto máximo ( $Q_{max}$ ) hasta el gasto mínimo ( $Q_{min}$ ), ya que éste contará con una compuerta tipo rampa que podrá elevarse cuando el gasto sea el mínimo o descender en caso contrario cuando circule gasto máximo. La razón principal de mantener dicho nivel constante permitirá a los usuarios extraer de manera más eficiente el caudal necesario hacia sus parcelas, aún en temporadas de estiaje.

### 4.- Límite modular o sumergencia.

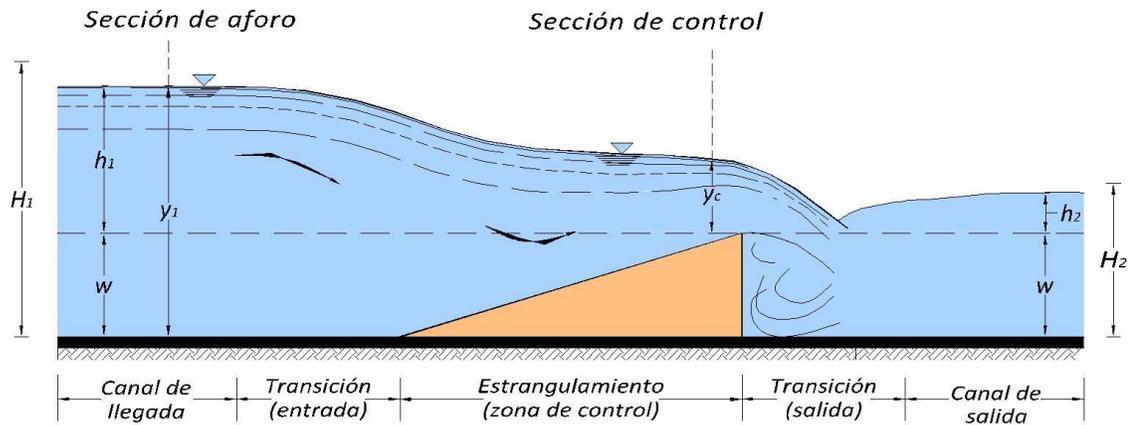
El aforador de garganta larga puede tolerar grandes tirantes sin que sean afectadas las condiciones de flujo en la sección crítica. El agua que se encuentra aguas abajo de la estructura produce un efecto de frenado en el flujo que pasa sobre el aforador. Resulta evidente que en la medida en que el nivel de aguas abajo  $H_2$  se eleva, el gasto que pasa sobre el aforador se verá afectado en mayor grado.

Se llama sumergencia a la relación entre la carga  $H_2$  que tiene el flujo inmediatamente aguas abajo del aforador y la carga  $H_1$  que se presenta justo aguas arriba del mismo. Para valores bajos de la relación  $H_2/H_1$ ; o sea, para valores menores que la unidad, el aforador no se ahoga y por consecuencia el valor de  $H_2$  no influye en la relación entre el tirante aguas arriba ( $y_1$ ) y el gasto que circula por el aforador. Bajo estas condiciones se dice que se tiene régimen modular (o flujo libre) en el aforador como se muestra (*Figura 3*).

En términos de carga, para obtener una relación única entre la altura de carga a la entrada de un aforador y el gasto correspondiente, la profundidad del agua en la sección de control debe ser crítica. Esto se cumplirá siempre que la carga total de energía a la salida de la instalación,  $H_2$  sea menor que la profundidad crítica,  $y_c$ , en la sección de control. En este caso si la pérdida de carga disponible ( $H_1 - H_2$ ) es mayor que  $H_1 - y_c$ , no es necesario transformar la energía cinética en la sección de control,  $Vc^2/2g$ , en energía potencial, aguas abajo de la transición ( $h_2$ ). Es decir no se necesita una transición gradual entre el estrechamiento y el canal de salida.

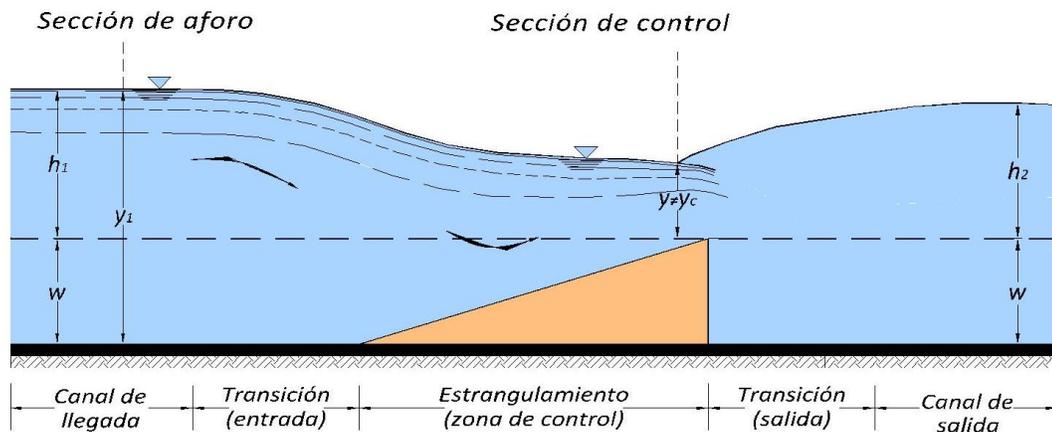
---

<sup>4</sup> El rango de gastos de medición que realizará el aforador en estudio para cualquier canal, está en función con el rango de pérdida que es igual a  $0 \leq \theta \leq -1$



**Figura 3. Diseño sin ahogamiento**

Por el contrario cuando la relación de sumergencia  $H_2/H_1$  es mayor que la unidad, el flujo en la garganta se ahoga y no se presenta el régimen crítico, de modo que el gasto que pasa por el aforador se ve influenciado por el valor de  $H_2$  y por consecuencia no hay una relación única entre el tirante aguas arriba del aforador,  $h_1$ , y el gasto ( $Q$ ) que pasa por él. Bajo estas condiciones se dice que el régimen no es modular como se muestra (Figura 4).



**Figura 4. Diseño con ahogamiento.**

La relación de sumergencia para que el régimen modular pase a ser no modular se denomina límite modular.

Límite modular, ML, se define como (Bos et Al., 1986) la relación entre las cargas de salida ( $H_2$ ) y entrada ( $H_1$ ), ambas referidas al resalto, cuando el nivel del agua a la salida del aforador comienza a afectar a la descarga,  $ML=H_2/H_1$ . La carga total referida al resalto es  $H_1 = h_1 + v_1^2/2g$ , donde  $h_1$  es la carga referida al

resalto (es decir, la profundidad del agua menos la altura del resalto),  $v_1$  = velocidad media en el canal de aproximación y  $g$  es la aceleración de la gravedad.

El límite modular debe calcularse para cada conjunto de gasto-tirante y, asimismo, se debe revisar si el tirante en el canal de salida no sobrepasa el valor marcado por el límite modular. Para salvaguardar el valor marcado por el límite modular, en muchos casos es necesario elevar la garganta del aforador, o sea, poner un escalón para provocar un remanso que aumente la energía potencial (carga  $H_1$ ) antes de entrar al aforador y lograr así, por lo menos, la pérdida de carga que marca este límite.

En tal caso se recomienda revisar que el canal tenga la capacidad de conducir el gasto máximo sin desbordarse. El diseño de la estructura de aforo implica minimizar la pérdida de carga; para esto se recomienda mantener los tirantes, que se marcan como máximos en el límite modular, lo más cerca posible de los tirantes que se dan en forma real en el canal de salida. Así se logra una pérdida de carga mínima y se garantiza el buen funcionamiento del aforador.

Es importante hacer notar que si el nivel a la salida del aforador es menor que el registrado con el tirante crítico que se presenta dentro de la garganta, entonces no será necesario construir una transición de salida.

Por otro lado, si se tiene suficiente desnivel como para absorber sin problemas la energía cinética del flujo aguas abajo de la cresta del aforador, por ejemplo una caída inmediatamente aguas abajo de la estructura, en estos casos normalmente resultará que el nivel de los tirantes que satisfacen el límite modular estará muy por encima de los que correspondan al canal de salida, Esto implica que la condición impuesta por el límite modular está más que asegurada; sin embargo, bajo estas condiciones puede llegar a ser necesario colocar alguna estructura disipadora de energía. En casos así es fácil inferir que no es necesario elevar la garganta para mantener un flujo modular o generar un remanso para ganar carga, tal vez, la garganta pueda ponerse incluso al nivel de la plantilla, lo que daría como resultado una curva de desagüe. Bajo dichas condiciones el flujo modular está prácticamente asegurado, por esta razón se puede variar la altura de la garganta y seleccionar la más conveniente.

#### ***5.- Ventaja respecto a otros dispositivos de aforo.***

El aforador en estudio de tipo garganta larga tienen, sobre todos los demás aforadores y vertedores conocidos, las siguientes ventajas principales [Bos et al., 1986]:

- A diferencia de otros tipos de aforadores como el Parshall, la estructura en estudio aparte de medir el caudal también mantendrá el nivel máximo, aun con gastos inferiores al mínimo.
- Siempre que el régimen crítico se produzca en la garganta, será posible calcular valores de los caudales, con un error menor del 3%, con una relación gasto altura de la rampa en la contracción.

- La sección de la garganta, normal a la dirección de la corriente, puede diseñarse de tal manera que sea capaz de medir con exactitud la gama completa de caudales previstos<sup>5</sup>.
- La pérdida de carga sobre el vertedor o el aforador, que debe corresponder a una relación única entre la altura de carga aguas arriba, referida al resalto, y el caudal, es mínima.
- Esta pérdida de carga necesaria puede estimarse con suficiente exactitud para cualquiera de estas obras, instalada sobre cualquier canal.
- Debido a su tramo de transición, gradualmente convergente, estos medidores tienen pocos problemas por causa de los arrastres de materiales flotantes.
- Las observaciones de campo han demostrado que estas obras pueden diseñarse para que los sedimentos transportados pasen por canales en régimen subcrítico.
- Dado que el fondo de la contracción es horizontal en la dirección de la corriente, se puede confeccionar un cuadro de valores basado en las dimensiones reales, posteriores a la construcción. Esto permite realizar una tabla exacta, que compense las desviaciones de la obra en relación con las dimensiones proyectadas. Igualmente permite, en caso necesario, variar la forma de la garganta<sup>6</sup>.
- En condiciones hidráulicas y de entorno similares estos vertederos y aforadores son, en general, el tipo más barato de construcción para medir caudales con exactitud.

Se recomienda el empleo de estos aforadores siempre que la superficie del agua en el punto de medición se mantenga libre.

---

<sup>5</sup> Las dimensiones de ancho y longitud de la garganta están directamente relacionadas con el gasto y tirante máximo en el canal a aforar.

<sup>6</sup> La forma de la garganta siempre será de tipo rectangular y contará con una rampa que forzará a la formación de la sección crítica.

## Capítulo II.

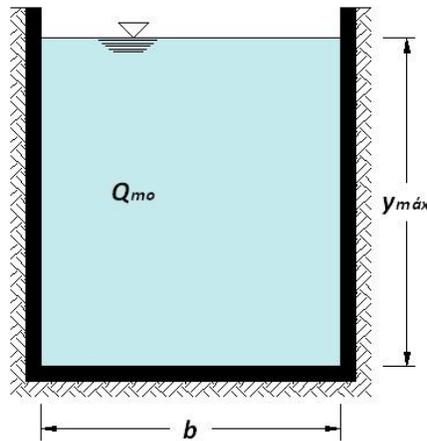
### Diseño hidráulico del aforador.

Una de las partes esenciales en el diseño hidráulico del aforador está directamente relacionada con el desarrollo matemático, el cual en conjunto con las ecuaciones básicas de la hidráulica (anexo A), dará el sustento teórico al trabajo de tesis.

#### **2.1. Sección de control de nivel y gasto para las condiciones de operación máximas permisibles**

Dado un caudal ( $Q_{mo}$ ) y un tirante ( $y_{max}$ ) máximos de operación en un canal rectangular de ancho  $b$  (figura 5); el gasto unitario ( $q_{mo}$ ) que circula por el canal se determina por:

$$q_{mo} = \frac{Q_{mo}}{b} \quad \dots(1)$$



**Figura 5. Canal rectangular de llegada (sección transversal)**

La energía específica disponible ( $E_{mo}$ ) está dada por:

$$E_{mo} = y_{max} + \frac{q_{mo}^2}{2g y_{max}^2} \quad \dots(2)$$

La cual tiene un tirante crítico asociado ( $y_{c_{mo}}$ ):

$$y_{c_{mo}} = \frac{2}{3} E_{mo} \quad \dots(3)$$

Bajo estas condiciones el gasto máximo unitario ( $q_{max}$ ) en la zona de control que puede circular con la energía disponible es igual a:

$$q_{max} = [2gy_{c_{mo}}^2(E_{mo} - y_{c_{mo}}^2)]^{1/2} \quad \dots(4)$$

Sustituyendo (3) en (4)

$$q_{max} = \left[ 2g \left( \frac{2}{3} \right)^2 E_{mo}^2 (E_{mo} - \frac{2}{3} E_{mo}) \right]^{1/2}$$

$$q_{max} = \left[ g \frac{2^3}{3^2} E_{mo}^2 (E_{mo} - \frac{2}{3} E_{mo}) \right]^{1/2}$$

$$q_{max} = \left[ g \frac{2^3}{3^2} E_{mo}^2 \left( \frac{1}{3} E_{mo} \right) \right]^{1/2}$$

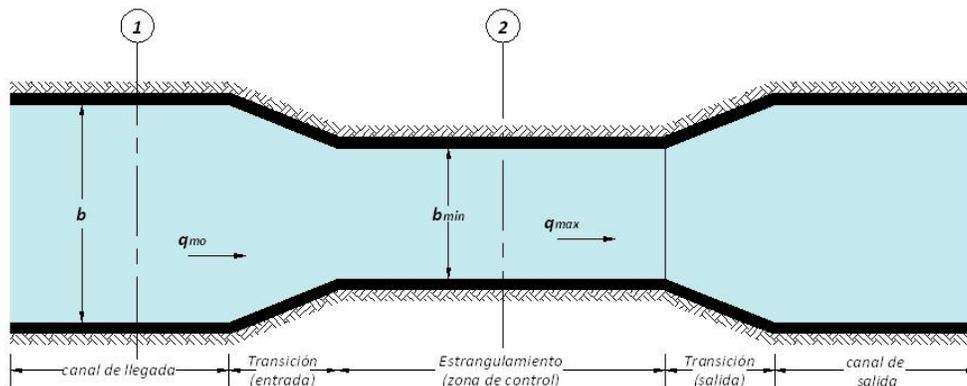
$$q_{max} = \left[ g \left( \frac{2}{3} E_{mo} \right)^3 \right]^{1/2}$$

$$q_{max} = g^{1/2} \left( \frac{2}{3} E_{mo} \right)^{3/2}$$

$$q_{max} = \sqrt{g} (y_{c_{mo}})^{3/2} \quad \dots(5)$$

De aquí y de acuerdo con la ecuación de continuidad, se desprende que existe una relación máxima de estrangulamiento admisible para que circule el caudal máximo de operación con la energía total disponible (figura 6), siendo esta:

$$q_{mo} b = q_{max} b_{min} \quad \dots(6)$$



**Figura 6. Canal rectangular con estrangulamiento mínimo (vista en planta).**

Por lo que el estrangulamiento mínimo permisible  $b_{mín}$  debe satisfacer la relación:

$$b_{mín} = b \frac{q_{mo}}{q_{max}}$$

O bien, considerando la ecuación (1) que establece que,  $q_{mo} = \frac{Q_{mo}}{b}$  tenemos:

$$b_{mín} = \frac{Q_{mo}}{q_{máx}} \quad \dots(7)$$

Sustituyendo (5) en (7) resulta:

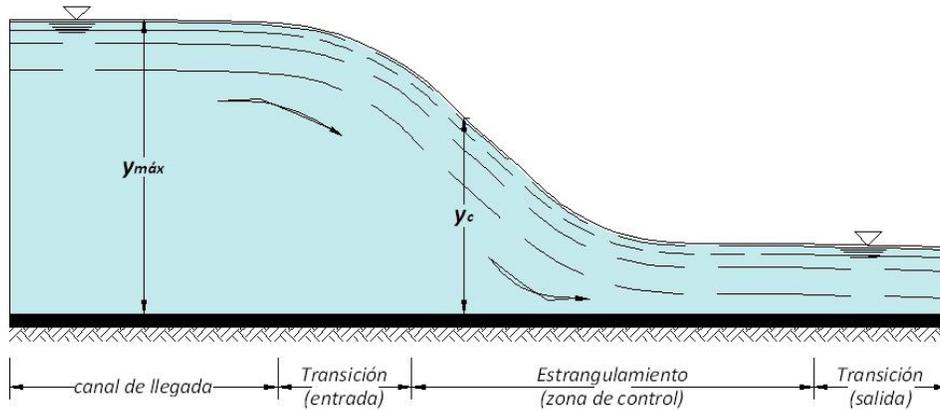
$$b_{mín} = \frac{Q_{mo}}{\sqrt{g}(y_{c_{mo}})^{3/2}} \quad \dots(8)$$

La cual, al sustituir (2) y (1) secuencialmente en (8), se puede expresar en función de  $Q_{mo}$  y  $y_{máx}$ , como sigue:

$$b_{mín} = \frac{Q_{mo}}{\sqrt{g}\left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \left(y_{máx} + \frac{Q_{mo}^2}{2gb^2y_{máx}^2}\right)^{3/2}} \quad \dots(9)$$

Las expresiones (8) y (9) representan el ancho mínimo al que se puede estrangular un canal sin que afecte las condiciones de operación aguas arriba. En el primer caso (ecuación 8) se expresa en función de la energía específica disponible y en el segundo en función del gasto y el tirante máximos de operación (ecuación 9). Bajo estas condiciones es de esperarse que se presente el tirante crítico en el interior del estrangulamiento (figura 7), cuya magnitud será igual a:

$$y_{c_{min}} = \left(\frac{Q_{mo}^2}{gb_{mín}^2}\right)^{1/3} \quad \dots(10)$$



**Figura 7. Perfil canal rectangular con estrangulamiento ( $b_{min}$ ) y  $y_{max}$ .**

Este planteamiento deberá satisfacer las siguientes condiciones:

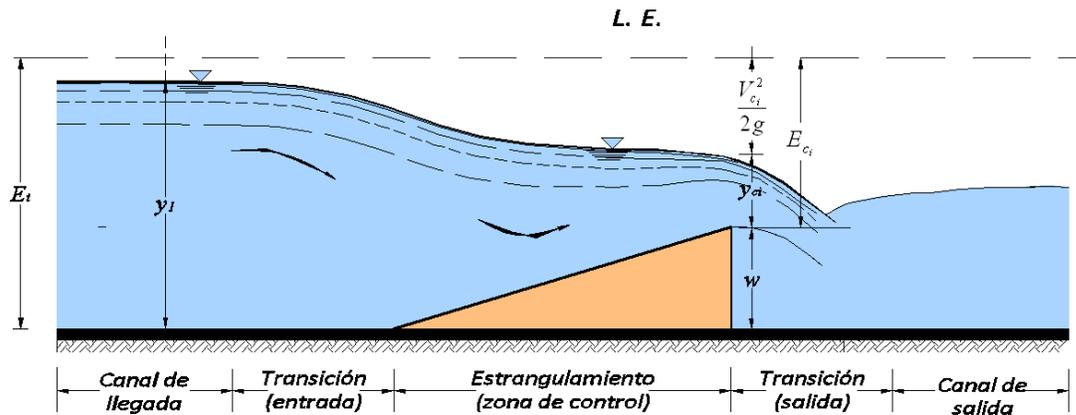
$$y_{c_{mo}} \leq y_{c_{min}} \leq y_{max} \quad \dots(11)$$

$$0 \leq b_{min} \leq b \quad \dots(12)$$

## 2.2.- Sección de control de nivel y gasto para condiciones de operación con caudales inferiores al máximo permisible.

El balance energético entre una sección inmediatamente antes del estrangulamiento y la sección de control –sección con régimen crítico- (figura 8), sin considerar las pérdidas en el sistema, se puede expresar de la siguiente manera:

$$E_i = E_{c_i} + w_i \quad \dots(13)$$



**Figura 8. Balance energético antes y después del estrangulamiento con sobreelevación al final del mismo.**

$$E_i = y_i + \frac{V_i^2}{2g}$$

Desarrollando las expresiones de energía específica en función del caudal y asumiendo sección rectangular, la ecuación (13) resulta:

$$y_i + \frac{Q_i^2}{2gA_i^2} = y_{c_i} + \frac{Q_i^2}{2gb_{min}^2 y_{c_i}^2} + w_i \quad \dots(14)$$

Sustituyendo (7) en (14)

$$y_i + \frac{Q_i^2}{2gA_i^2} = y_{c_i} + \frac{Q_i^2}{2g\left(\frac{Q_{mo}}{q_{max}}\right)^2 y_{c_i}^2} + w_i \quad \dots(15)$$

Si de acuerdo con la ecuación de régimen crítico, aplicada a una sección rectangular (estrangulamiento o zona de control), se satisface la siguiente relación:

$$y_{c_i} = \left(\frac{Q_i^2}{gb_{min}^2}\right)^{1/3} \quad \dots(16)$$

Al sustituir (16) en (15) resulta:

$$y_i + \frac{Q_i^2}{2gA_i^2} = \left(\frac{Q_i^2}{gb_{min}^2}\right)^{1/3} + \frac{Q_i^2}{2g\left(\frac{Q_{mo}}{q_{max}}\right)^2 \left(\frac{Q_i^2}{gb_{min}^2}\right)^{2/3}} + w_i \quad \dots(17)$$

Reemplazando (7) en (17) y reordenando la expresión resultante:

$$\left(y_i + \frac{Q_i^2}{2gA_i^2} - w_i\right) = \frac{3}{2} \left(\frac{Q_i^2 q_{max}^2}{gQ_{mo}^2}\right)^{1/3} \quad \dots(18)$$

Considerando que  $E_i = y_i + \frac{Q_i^2}{2gA_i^2}$ , tomando en cuenta la ecuación (5) y asignando

$$f_{qi} = \frac{Q_i}{Q_{mo}} \quad \dots(19)$$

La ecuación (18) se puede expresar de la siguiente manera:

$$\frac{w_i}{E_i} = 1 - \frac{E_{mo}}{E_i} f_{qi}^{2/3} \quad \dots(20)$$

Despejando  $w_i$

$$w_i = E_i - E_{mo} f_{qi}^{2/3} \quad \dots(21)$$

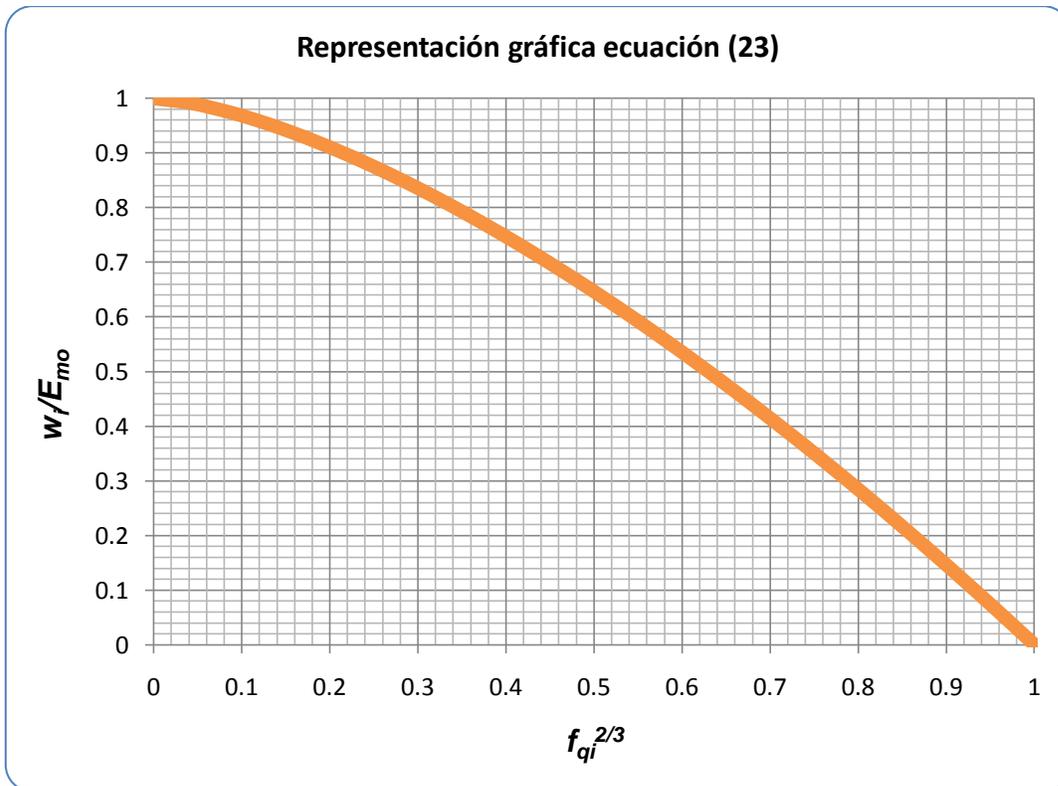
Dado que con la estructura de control se pretende mantener  $y_i$  constante (con un valor  $y_{max}$ ), esto independientemente del caudal, y suponiendo que tanto la magnitud como la diferencia de las cargas de velocidad son -para fines prácticos- despreciables en comparación con el valor de  $y_{max}$ , resulta entonces que  $E_i \approx E_{mo}$ ; por lo que al aplicar esta suposición en el segundo miembro de la ecuación (20) resulta:

$$\frac{w_i}{E_i} = 1 - f_{qi}^{2/3} \quad \dots(22)$$

Por cuestiones de diseño, en los canales que trabajan a flujo subcrítico la magnitud de la carga de velocidad es pequeña en comparación con la del tirante, bajo este supuesto se puede asumir que  $E_i \approx y_{max}$  y a su vez  $y_{max} \approx E_{mo}$ , de aquí que  $E_i \approx E_{mo}$  y en consecuencia la ecuación (22) se pueda expresar como:

$$\frac{w_i}{E_{mo}} = 1 - f_{qi}^{2/3} \quad \dots(23)$$

La ecuación (23) se desarrolla entre 0 y 1, y su gráfica se visualiza de la siguiente manera:



**Gráfica 1. Representación de ecuación (23).**

A través de la ecuación (23) o de la (figura 8) se puede determinar la sobreelevación mínima que se requiere en la plantilla del canal para garantizar, ante un gasto  $Q_i$  menor a  $Q_{m0}$ , la formación de una sección de control en el interior de la zona estrangulada. Vale la pena hacer notar que la  $w_i$  así obtenida será ligeramente superior o igual a la derivada de la ecuación (20), lo que asegura la formación del tirante crítico.

### **2.3.- Longitud de la zona de estrangulamiento**

Dentro de la zona de estrangulamiento se debe garantizar la formación de una sección de control, o sea una sección trabajando con energía específica mínima en la cual se presente el tirante crítico; para tal fin y considerando que en el último de los casos de presentará una condición de operación semejante a la que ocurre cuando existe la presencia de un escalón; resulta apropiado adoptar las recomendaciones existentes para tal fin. Al respecto y de acuerdo con la literatura especializada la longitud mínima  $L_{min}$  del estrangulamiento se puede determinar a partir de la siguiente expresión:

$$3y_{cmin} < L_{min} < 4y_{cmin}$$

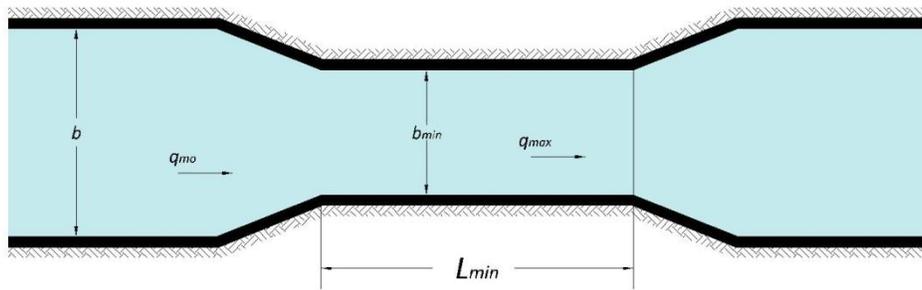


Figura 9. Longitud mínima ( $L_{min}$ ) del estrangulamiento.

#### 2.4.- Cálculo del caudal dentro de la zona de estrangulamiento

Asumiendo la presencia de una sobreelevación en el fondo del canal como la que se aprecia en la figura (10), aplicando la ecuación de energía en el volumen de control que se encuentra acotado por las secciones (1) y (2), y suponiendo que en (2) se presenta régimen crítico ( $y_2 = y_{c_{min}}$ ) se puede obtener la ecuación general para determinar el caudal.

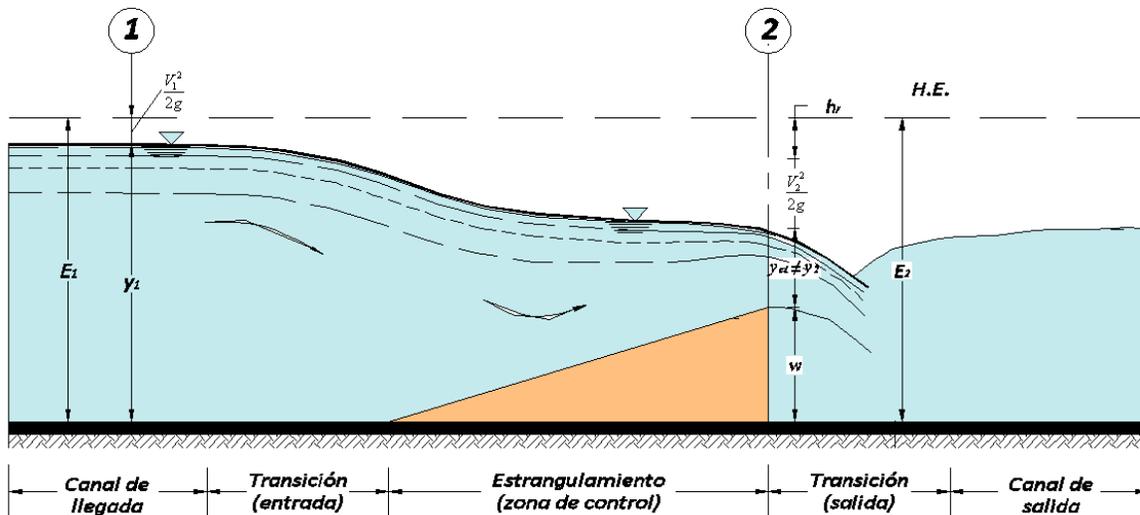


Figura 10. Volumen de control.

A. Establecimiento de la ecuación para determinar el caudal.

De acuerdo con la ecuación de la energía

$$E_1 = E_2 + h_r \quad \dots(24)$$

Donde

$$E_1 = y_1 + \frac{v_1^2}{2g} \quad \dots (25)$$

$$E_2 = y_2 + \frac{v_2^2}{2g} + w \quad \dots(26)$$

Asumiendo como hipótesis de partida que la pérdida local  $h_r$  es una función de la carga de velocidad entre las secciones 1 y 2, del siguiente tipo:

$$h_r = \frac{v_1^2}{2g} + \theta \frac{v_2^2}{2g} \quad \dots(27)$$

Donde  $\theta$  es un coeficiente de pérdida.

Sustituyendo (25), (26) y (27) en (24), resulta:

$$y_1 + \frac{v_1^2}{2g} = y_2 + \frac{v_2^2}{2g} + w + \frac{v_1^2}{2g} + \theta \frac{v_2^2}{2g}$$

$$y_1 - y_2 = w + (1 + \theta) \frac{v_2^2}{2g} \quad \dots(28)$$

Suponiendo que en la sección (25) se presenta régimen crítico, se cumple

$$V_2^2 = gy_2 \quad \dots (29)$$

Sustituyendo (29) en (28)

$$y_1 - y_2 = w + (1 + \theta) \frac{gy_2}{2g}$$

$$y_1 - y_2 = w + (1 + \theta) \frac{y_2}{2}$$

$$y_1 - y_2 = w + \left(\frac{1+\theta}{2}\right)y_2$$

$$y_1 = w + y_2 + \frac{y_2}{2} + \theta \frac{y_2}{2}$$

$$y_1 = w + \left(1 + \frac{1+\theta}{2}\right)y_2$$

$$y_1 = w + \left(\frac{3+\theta}{2}\right)y_2$$

$$y_1 = w + \left(1.5 + \frac{\theta}{2}\right)y_2 \quad \dots(30)$$

$$\text{Asignando } \varphi = 1.5 + \frac{\theta}{2} \quad \dots(31)$$

Sustituyendo (31) en (30)

$$y_1 = w + \varphi y_2 \quad \dots(32)$$

Despejando  $w$

$$w = y_1 - \varphi y_2 \quad \dots(33)$$

De aquí se deduce que  $\varphi$  debe ser positivo ya que a su vez  $w$  debe ser menor que  $y_1$  para que exista flujo.

Por otra parte y bajo la hipótesis de que las pérdidas entre las secciones 1 y 2 son despreciables, se tiene:

$$y_1 + \frac{Q_1^2}{2gA_1^2} = y_2 + \frac{Q_2^2}{2gA_2^2} + w$$

$$y_1 + \frac{Q_1^2}{2gb_1^2y_1^2} = y_2 + \frac{Q_2^2}{2gb_2^2y_2^2} + w$$

Con  $Q_1 = Q_2$  se tiene

$$q_1 b_1 = q_2 b_2 \quad \text{y} \quad q_1 = \frac{b_2}{b_1} q_2$$

$$y_1 + \frac{q_1^2 b_1^2}{2gb_1^2y_1^2} = y_2 + \frac{q_2^2 b_2^2}{2gb_2^2y_2^2} + w$$

$$y_1 + \frac{q_1^2}{2gy_1^2} = y_2 + \frac{q_2^2}{2gy_2^2} + w$$

Con  $q_1 = \frac{b_2}{b_1} q_2$

$$y_1 + \frac{q_2^2 b_2^2}{2gb_1^2y_1^2} = y_2 + \frac{q_2^2}{2gy_2^2} + w$$

y asignando por simplificación  $\beta = \left(\frac{b_2}{b_1}\right)^2$  y  $q = q_2$ , se tiene

$$y_1 + \frac{\beta q_2^2}{2g b_1^2 y_1^2} = y_2 + \frac{q_2^2}{2g y_2^2} + w$$

$$y_1 - y_2 + \frac{q^2}{2g} \left( \frac{\beta}{y_1^2} - \frac{1}{y_2^2} \right) = w$$

$$y_1 - y_2 + \frac{q^2}{2g} \left( \frac{\beta y_2^2 - y_1^2}{y_1^2 y_2^2} \right) = w$$

Multiplicando todo por  $y_1^2 y_2^2$

$$y_1^3 y_2^2 - y_1^2 y_2^3 + y_1^2 y_2^2 \frac{q^2}{2g} \left( \frac{\beta y_2^2 - y_1^2}{y_1^2 y_2^2} \right) = w (y_1^2 y_2^2)$$

$$y_1^3 y_2^2 - y_1^2 y_2^3 + \frac{q^2}{2g} (\beta y_2^2 - y_1^2) = w (y_1^2 y_2^2)$$

$$y_c^3 = \frac{q^2}{2g}$$

$$y_1^3 y_2^2 - y_1^2 y_2^3 + \frac{y_c^2}{2} (\beta y_2^2 - y_1^2) = w (y_1^2 y_2^2)$$

$$y_c = y_2$$

$$y_1^3 y_2^2 - y_1^2 y_2^3 + \frac{y_2^3}{2} (\beta y_2^2 - y_1^2) = w (y_1^2 y_2^2)$$

$$y_1^3 y_2^2 - y_1^2 y_2^3 + \frac{\beta y_2^3 y_2^2}{2} - \frac{y_2^3 y_1^2}{2} = w (y_1^2 y_2^2)$$

Multiplicando todo por  $y_2$

$$y_1^3 y_2^3 - y_1^2 y_2^3 y_2 + \frac{\beta y_2^3 y_2^3}{2} - \frac{y_2^3 y_1^2 y_2}{2} = w (y_1^2 y_2^3)$$

$$y_2^3(y_1^3 - y_1^2 y_2) + \frac{\beta(y_2^3)^2}{2} - y_2^3 \left( \frac{y_1^2 y_2}{2} \right) = w y_1^2 y_2^3$$

Dividiendo entre  $y_2^3$

$$(y_1^3 - y_1^2 y_2) + \frac{\beta y_2^3}{2} - \left( \frac{y_1^2 y_2}{2} \right) = w y_1^2$$

$$y_1^2(y_1 - y_2) + \frac{y_2^3}{2} - y_1^2 \left( \frac{y_2}{2} \right) = w y_1^2$$

Todo entre  $y_1^2$

$$y_1 - y_2 + \frac{\beta y_2^3}{2 y_1^2} - \frac{y_2}{2} = w$$

$$y_1 + \frac{\beta y_2^3}{2 y_1^2} = w + \frac{3 y_2}{2}$$

$$y_1 + \frac{\beta y_2}{2} \frac{y_2^2}{y_1^2} = w + \frac{3 y_2}{2}$$

$$y_1 + 0.5 \left( \frac{y_2^2}{y_1^2} \right) \beta = w + 1.5 y_2 \quad \dots(34)$$

Asignando  $\alpha = 0.5 \left( \frac{y_2^2}{y_1^2} \right) \beta = 0.5 \left( \frac{y_2^2}{y_1^2} \right) \left( \frac{b_2^2}{b_1^2} \right) = 0.5 \frac{A_2^2}{A_1^2}$

$$y_1 + \alpha y_2 = w + 1.5 y_2$$

Y dado que  $A_2 \leq A_1$ , se establece la siguiente condición física:

$$0 \leq \alpha \leq 0.5$$

Suponiendo que  $\alpha = 0.5$

$$y_1 = w + y_2$$

Con  $\alpha = 0$

$$y_1 = w + 1.5y_2$$

De lo anterior se puede establecer

$$y_1 = w + (1.5 - \alpha)y_2 \quad \dots(35)$$

Dado que para llegar a la ecuación (35) se consideró que las pérdidas son despreciables, para incluir su efecto se debe cumplir  $\alpha < 0.5$ , con lo que las pérdidas se consideran como una proporción del tirante en la sección (2) en el cual se supone que se presenta el tirante crítico y en consecuencia existe una correlación directa entre este tirante y el caudal circulante la cual está dada por:

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$$

O sea que está correlacionado indirectamente con la carga de velocidad lo que le da congruencia física al supuesto que aquí se establece.

Por otra parte al despeja  $y_1$  tanto de la ecuación (33) como de la (35) e igualar resulta:

$$w + \varphi y_2 = w + (1.5 - \alpha)y_2$$

De donde  $\varphi = 1.5 - \alpha$

De aquí que  $1 < \varphi \leq 1.5$  dado que  $0 \leq \alpha < 0.5$

Recordando que  $\varphi = 1.5 + \frac{\theta}{2}$

Resulta que  $1.5 + \frac{\theta}{2} = 1.5 - \alpha$

De donde  $\theta = -2\alpha$  y por tanto  $\alpha = -\frac{\theta}{2} \therefore 0 \leq -\frac{\theta}{2} < 0.5$

$0 \leq -\theta < 1$  ,  $-1 < \theta \leq 0$

Despejando  $y_2$  de (10) resulta

$$y_2 = \frac{y_1 - w}{1.5 + \frac{\theta}{2}}$$

Recordando que  $y_2 = \left(\frac{q^2}{g}\right)^{1/3}$ , resulta

$$\left(\frac{q^2}{g}\right)^{1/3} = \frac{y_1 - w}{1.5 + \frac{\theta}{2}}$$

$$q = g^{1/2} \left(\frac{y_1 - w}{1.5 + \frac{\theta}{2}}\right)^{3/2} \quad \dots(36)$$

Que es gasto unitario en la zona de estrangulamiento

Al multiplicar (36) por  $b_{min}$ , tenemos

$$Q = \sqrt{g} \left(\frac{y_1 - w}{1.5 + \frac{\theta}{2}}\right)^{3/2} b_{min} \quad \dots(37)$$

Y dado que la ecuación (37) anterior cubrirá los valores de caudal que, en cualquier canal se desee aplicar, ésta la podemos representar como

$$Q_i = \sqrt{g} \left(\frac{y_1 - w}{1.5 + \frac{\theta}{2}}\right)^{3/2} b_{min} \quad \dots(38)$$

Donde  $i$  representa la variación de gastos a través del canal.

## Capítulo III

### Diseño del aforador y pruebas experimentales en laboratorio.

Cuando se busca llevar a cabo un estudio, es indispensable conocer lo que buscamos desarrollar y obtener, cómo lo vamos a hacer y hacia dónde deseamos llegar; por ello, debemos plantearnos un interrogante: ¿Qué se entiende por "diseño" de un experimento?: Significa "Planificar" un proceso de repetición de mediciones bajo situaciones y condiciones que podamos o no controlar, de modo que se pueda coleccionar o reunir información que obedece al resultado del problema planteado bajo la investigación (Rodríguez y Martínez, 2009).

Cuando se diseña un experimento, presentamos la metodología de lo que buscamos demostrar, sea una idea, una hipótesis, una conjetura o una tesis o, en su defecto, una teoría. Para ello, se planifica la secuencia completa de los pasos que desarrollaremos a lo largo del ensayo. Teniendo los datos, podremos iniciar el análisis de éstos desde el punto de vista objetivo, conducirá ello a las deducciones lógicas y válidas con respecto al problema previamente establecido (Rodríguez et. al).

Para ello con base en los resultados obtenidos en el diseño hidráulico del aforador del capítulo anterior, se procede a construir el modelo físico e instalarlo en el canal de pendiente variable (anexo C, plano No. 1) el cual cuenta con dimensiones de 60 cm y 70 cm de ancho y alto respectivamente, el cual se encuentra ubicado en el laboratorio "Enzo Levi" del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.



### 3.1.- Primer diseño base del modelo experimental.

Para la construcción de este primer modelo fue necesario el uso de la ecuación (9) obtenida en el capítulo anterior, para el cual se propuso un gasto máximo de operación ( $Q_{mo}$ ) igual a 73 l/s, y este a su vez generaba un tirante máximo ( $y_{max}$ ) equivalente a 56.5 cm en el canal de llegada, el proceso de cálculo y los resultados se muestran como sigue:

Datos:

$$Q_{mo} = 73 \text{ l/s}; \quad b = 60 \text{ cm}; \quad y_{max} = 56.5 \text{ cm}$$

$$b_{mín} = \frac{Q_{mo}}{g^{1/2} \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \left(y_{máx} + \frac{Q_{mo}^2}{2gb^2y_{máx}^2}\right)^{3/2}}$$

Sustituyendo datos:

$$b_{mín} = \frac{0.073}{(9.81)^{1/2} \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \left(0.565 + \frac{0.073^2}{2(9.81)(0.60)^2(0.565)^2}\right)^{3/2}}$$

$$b_{mín} = 0.10 \text{ m}$$

Determinando entonces el tirante crítico en la zona de control con la ecuación no. (10), tenemos:

$$y_{c_{mín}} = \left(\frac{Q_{mo}^2}{gb_{mín}^2}\right)^{1/3}$$

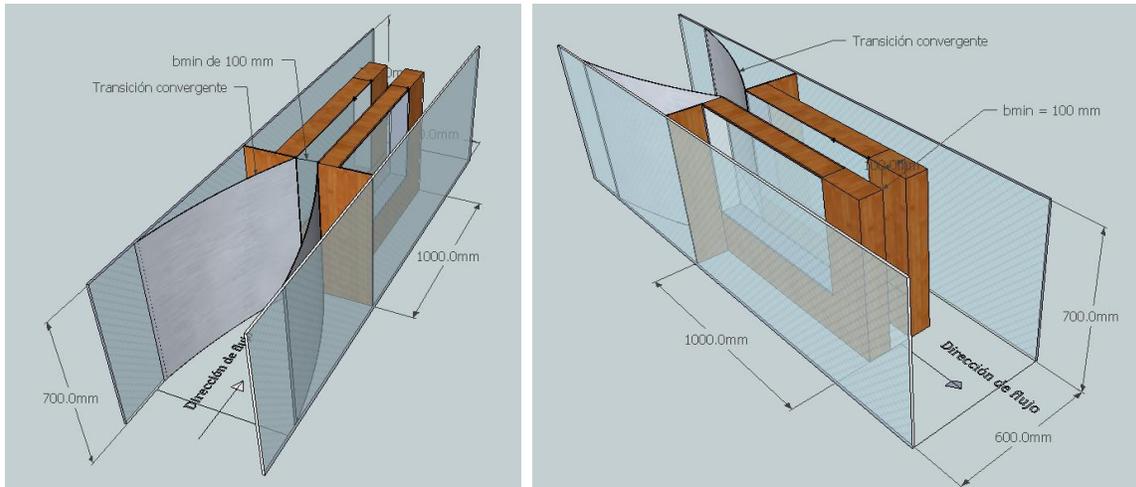
Sustituyendo datos

$$y_{c_{mín}} = \left(\frac{0.073^2}{19.62(0.10)^2}\right)^{1/3} = 0.301 \text{ m}$$

Se observa que con los datos del canal y los propuestos para el análisis, se obtiene el ancho mínimo ( $b_{mín}$ ) correspondiente a la zona de estrangulamiento o control igual a 10 cm y a su vez un tirante crítico de 30.1 cm.

Con estos resultados, se procede a construir el prototipo del primer diseño. El modelo fue proyectado por software como AutoCAD<sup>7</sup> (Diseño 2D), SketchUp<sup>8</sup> (Diseño 3D) y posteriormente construido como se puede apreciar en el plano 1 (anexo C) y las figuras 11:

### Modelo en 3D



**Figura 11. Modelo 3D de prototipo 1.**

Se puede observar que con base en los cálculos previos se llevo a cabo en su construcción en laboratorio. Vale la pena mencionar que para la longitud de contracción la norma ISO 4359 para secciones rectangulares, ésta no indica ningún tipo de recomendación y restricción, la longitud que se eligió de 1.0 m fue debido a que existía un prototipo en laboratorio ya instalado con dichas dimensiones.



<sup>7</sup> La versión de AutoCAD® 2009

<sup>8</sup> Programa de diseño 3D de acceso libre SketchUp perteneciente a la compañía Google®



**Imagen 1. Prototipo 1 instalado en laboratorio.**

Por lo que se procede a realizar la 1er prueba base que permitirá corroborar resultados obtenidos por medio de las ecuaciones.

### **3.1.1. Primera prueba base.**

Al contar con el primer prototipo base, instalado en el canal de pendiente variable del laboratorio, se procede a revisar y seguir los siguientes puntos para garantizar el correcto funcionamiento y obtención de resultados. Los puntos en consideración son los siguientes:

- Se asegura el modelo perfectamente a las paredes del canal de prueba, así como también se garantiza la hermeticidad entre las uniones por donde podría filtrarse el agua.
- Se establecen y marcan las dimensiones necesarias de separación de las paredes de acrílico y madera, de tal manera que cumplan las medidas de ancho y largo mínimo en la zona de control, longitud de transición y altura de la misma, que para efecto de prueba se ha elegido la máxima del canal de pendiente variable que es igual a 70 cm como puede observarse en el plano del prototipo No.1 (anexo C).
- Se colocan escalas en el canal de llegada y centro de la zona de estrangulamiento.
- Debido a que el sistema de abastecimiento de agua en el laboratorio cuenta con un medidor de tipo electromagnético, se recurre a dicho medidor para establecer el límite de gasto con el que habrá de probarse el modelo, que para efectos de prueba éste será de 73 l/s.

Contando con todos los puntos en consideración para el correcto funcionamiento, se realiza la prueba y se obtienen los siguientes resultados.

### 3.1.1.1. Resultados de primera prueba base

Los resultados de la primera prueba base con el prototipo No.1

|                               |  |                |  |  |                       |
|-------------------------------|--|----------------|--|--|-----------------------|
| Nombre de prueba:             |  | 1a PRUEBA BASE |  |  | Fecha                 |
| No. De prueba:                |  | 1              |  |  | 28 de Octubre de 2010 |
| Clave Geometría del Aforador: |  | A1             |  |  |                       |

| Punto a medir (sección)                 | Distancia (z)<br>m | Distancia (y)<br>m | Distancia (x)<br>m | Observaciones   |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|---|
| 1 Tirante aguas arriba<br>( $y_{max}$ ) | 0.565 ±<br>0.001   | 0.595 ±<br>0.001   | 8.55               | Se ajusta el tirante de prueba al obtenido de la ecuaciones, el cual corresponde a 0.565 m. |

|                   |                   |
|-------------------|-------------------|
| Gasto en medidor: | 80 lps ± 3.5 lps. |
|-------------------|-------------------|

**Tabla 1. Resultados primera prueba base**

Después de realizar la primera prueba base, se obtienen los siguientes resultados:

- Se observa que al mantener el tirante máximo ( $y_{max}$ ) en la zona del canal nombrada como canal de llegada, el medidor electromagnético arroja un resultado de caudal igual a 80 lps ± 3.5 lps, mayor al calculado y esperado en la prueba (73 l/s).
- El ancho mínimo ( $b_{min}$ ), en dimensiones es igual a 10.5 cm con 0.5 cm de variación con respecto al calculado previamente, se observa que el desajuste se lleva a cabo debido a la falla en los soportes laterales que contienen a las paredes de acrílico y madera.
- El tirante crítico ( $y_c$ ), en la contracción es difícil de apreciar a consecuencia de la turbulencia del flujo producto de la forma en arco de la transición de entrada y la corta distancia longitudinal de la zona de control.

Por lo que se consideran inadecuados los resultados obtenidos y se procede a preparar la prueba base No. 2.

### 3.2.- Segundo diseño base del modelo experimental.

Para la construcción de este segundo modelo fue necesario tomar en consideración los resultados obtenidos en la primera prueba y corregir los errores que de ella resultaron.

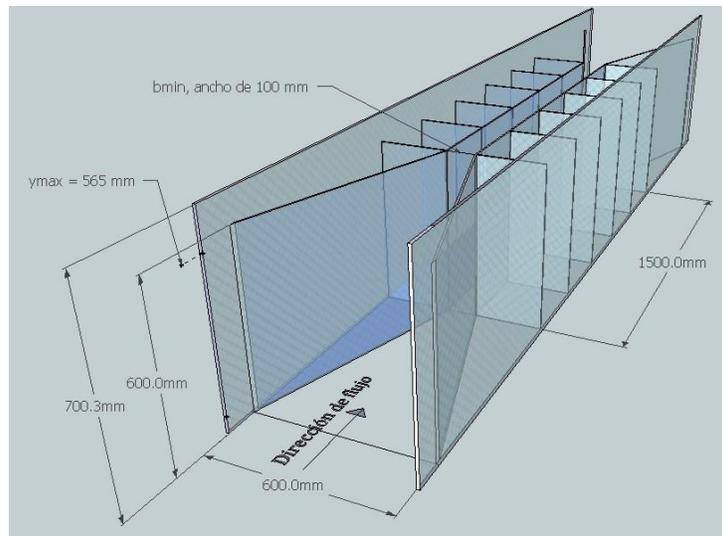
### **3.2.1. Segunda prueba base No.1.**

Algunas de los puntos que se tomaron en consideración se enlistan a continuación:

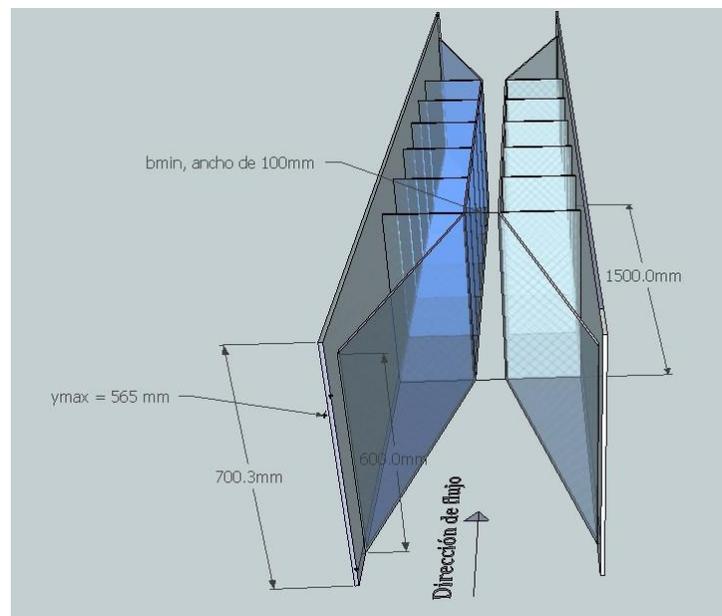
- Primero, se decide construir un nuevo modelo en cual será nombrado como prototipo No. 2, dicho prototipo incluirá una nueva geometría la B1, la cual puede apreciarse en el plano del prototipo No. 2 (Anexo C) y en las figuras 12 y 13.
- Los cambios significativos que ahora se presentan en el prototipo No.2 con respecto al No. 1 son los siguientes:
  - La transición de entrada o sección convergente establece un ángulo igual a  $17^\circ$  de cada pared con respecto a las paredes del canal de prueba, dicha transición también se agregó a la salida para dirigir de mejor manera el flujo y evitar regresión de agua en la estructura.
  - El material del modelo corresponde en su totalidad a acrílico con espesor de 6mm, el cual se obtuvo en hojas y se trabajó en taller para posteriormente instalarlo por partes en el canal de prueba como se aprecia en la imagen 2.
  - La longitud de contracción se incremento de 1.0 m a 1.5 m para permitir la apreciación más adecuada de la formación de la sección crítica.
  - La estructura del modelo se reforzó en su totalidad, tanto horizontal como verticalmente para evitar que el empuje del agua no deformara las paredes o se generaran filtraciones entre las juntas.
  - Se colocaron escalas milimétricas en el canal de llegada y contracción.
- Se decide ajustar nuevamente el ancho del canal de prueba lo más cercano equivalente a 60 cm.

Contando con todos los puntos en consideración para el correcto funcionamiento, se realiza la prueba y se obtienen resultados.

Modelo 3D



**Figura 12. Representación isométrica del prototipo No. 2 en 3D con el programa de diseño SketchUp 8.**



**Figura 13. Representación frontal del prototipo No.2 en 3D con el programa de diseño SketchUp 8.**



**Imagen 2. Prototipo 2 instalado en laboratorio.**

### **3.2.1.1. Resultados de la segunda prueba base No.1.**

Los resultados de la segunda prueba base con el prototipo No.2

| Nombre de prueba:                    |                    | 2a PRUEBA BASE     |                    |  | Fecha                   |
|--------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--|-------------------------|
| No. De prueba:                       |                    | 1                  |                    |  | 16 de Noviembre de 2011 |
| Clave Geometría del Aforador:        |                    | B1                 |                    |  |                         |
| Punto a medir (sección)              | Distancia (z)<br>m | Distancia (y)<br>m | Distancia (x)<br>m | Observaciones  |                         |
| 1 Tirante aguas arriba ( $y_{max}$ ) | 0.565 ± 0.001      | 0.595 ± 0.001      | 8.55m              | Se ajusta el tirante de prueba al obtenido de la ecuaciones, el cual corresponde a 0.565 m.                                    |                         |
| 2 Tirante crítico ( $y_c$ )          | 0.355 ± 0.001      | 0.260 ± 0.0005     | -                  | Se observa que el tirante crítico se presenta a lo largo de la zona de control sin identificar el punto exacto de su formación |                         |

|                   |                    |
|-------------------|--------------------|
| Gasto en medidor: | 78.2 lps ± 10 lps. |
|-------------------|--------------------|

**Tabla 2. Resultados segunda prueba base no. 1.**

Después de realizar la segunda prueba base, con el prototipo No.2 se obtienen los siguientes resultados:

- Se observa que al mantener el tirante máximo ( $y_{max}$ ) en la zona del canal nombrada como canal de llegada, éste tarda demasiado en estabilizarse y en llegar a la medida adecuada incluso el medidor electromagnético arroja

una resultado de caudal igual a  $78.2 \pm 10$  lps, menor y su a vez mayor al calculado. La variación es muy grande por lo que será necesario revisar la razón de dichos resultados.

- El ancho mínimo ( $b_{\min}$ ), en dimensiones es igual a  $10 \pm 0.3$  cm de variación con respecto al calculado previamente, dicha variación como resultado del propio error de instalación.
- El tirante crítico ( $y_{C_{\min}}$ ), en la contracción se aprecia esta vez, pero, debido a la variación del perfil a lo largo de la contracción, es complicado definir su posición exacta en la zona de control.
- Se presenta entrada de agua entre las juntas de las paredes de la estructura.

Por lo que se consideran inadecuados los resultados obtenidos y se procede a corregir los detalles y nuevamente realizar la prueba que llevará como numero consecuente la No.2, con el prototipo No.2.

### **3.2.2. Segunda prueba base No.2.**

Para la prueba No 2, de la segunda prueba base, se decide hacer las correcciones pertinentes que garanticen los resultados esperados, ya que, como puede apreciarse, dichos resultados se empiezan a ser consistentes con los obtenidos mediante las ecuaciones. Los puntos a corregir para esta prueba son los siguientes:

- Debido a que el abastecimiento de agua hacia el canal de prueba se realiza mediante un circuito cerrado, el cual se encarga a su vez de proveer a cada modelo del laboratorio Enzo Levi. Es necesario que, para evitar variaciones excesivas en la medición de caudal, se cierren adecuadamente las válvulas que seccionan el abastecimiento de líquido hacia otros puntos durante el proceso de prueba del aforador en estudio.
- Sellar las juntas lo mayor posible para impedir el paso de agua entre ellas y así evitar problemas por el estancamiento del agua.

Contando con todos los puntos en consideración para el correcto funcionamiento, se realiza la prueba y se obtienen resultados.

#### **3.2.2.1. Resultados de la segunda prueba base No.2.**

Los resultados de la segunda prueba base (prueba No.2) con el prototipo No.2 resulta:

|                               |                |       |                         |
|-------------------------------|----------------|-------|-------------------------|
| Nombre de prueba:             | 2a PRUEBA BASE | Fecha | 21 de Noviembre de 2011 |
| No. De prueba:                | 2              |       |                         |
| Clave Geometría del Aforador: | B1             |       |                         |

| Punto a medir (sección)              | Distancia (z)<br>m | Distancia (y)<br>m | Distancia (x)<br>m | Observaciones  |
|--------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--|
| 1 Tirante aguas arriba ( $y_{max}$ ) | $0.565 \pm 0.001$  | $0.595 \pm 0.001$  | 8.55m              | Se ajusta el tirante de prueba al obtenido de la ecuaciones, el cual corresponde a 0.565 m.                                    |
| 2 Tirante crítico ( $y_c$ )          | $0.355 \pm 0.001$  | $0.260 \pm 0.0005$ | -                  | Se observa que el tirante crítico se presenta a lo largo de la zona de control sin identificar el punto exacto de su formación |

|                   |                     |
|-------------------|---------------------|
| Gasto en medidor: | 69 lps $\pm$ 2 lps. |
|-------------------|---------------------|

**Tabla 3. Resultados segunda prueba base no. 2.**

Después de realizar la segunda prueba base (prueba No.2), con el prototipo No.2 se obtienen los siguientes resultados:

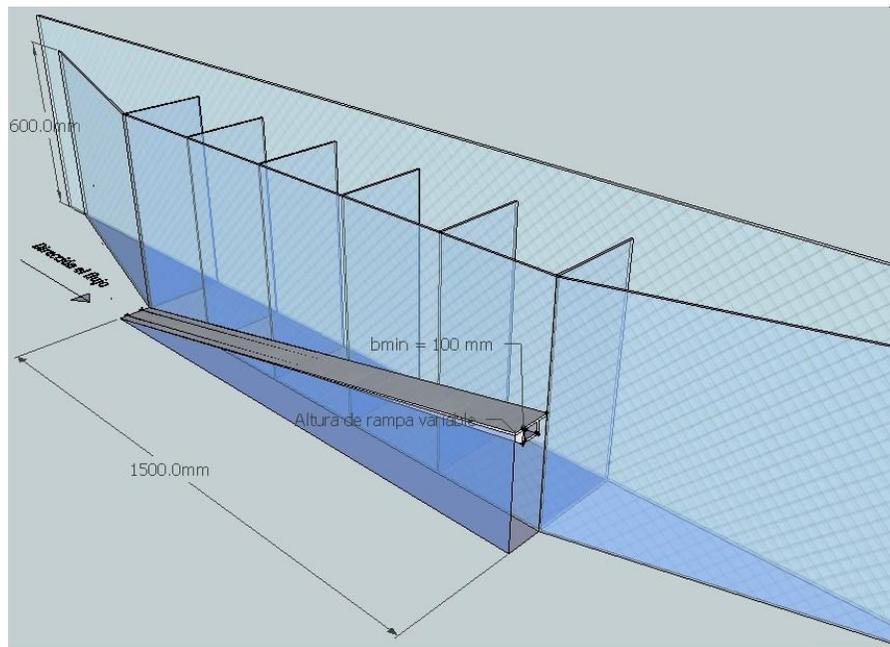
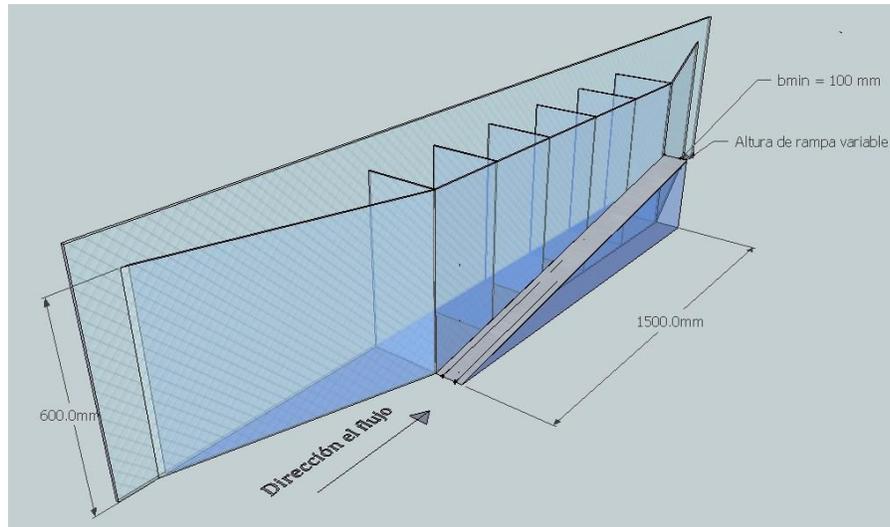
- Se observa que al mantener el tirante máximo ( $y_{max}$ ) en la zona del canal nombrado como canal de llegada, el medidor electromagnético arroja un resultado de caudal igual a  $69 \pm 2$  lps, muy cercano al calculado y esperado en la prueba (73 l/s).
- El ancho mínimo ( $b_{min}$ ), en dimensiones es igual a 10 cm con 0.2 cm de variación con respecto al calculado previamente, dicha variación como resultado del propio error de instalación.
- El tirante crítico ( $y_c$ ), en la contracción nuevamente se vuelve inapreciable y es complicado definir su posición exacta en la zona de control.
- Se sigue presentando ligera entrada de agua entre las paredes de la estructura.

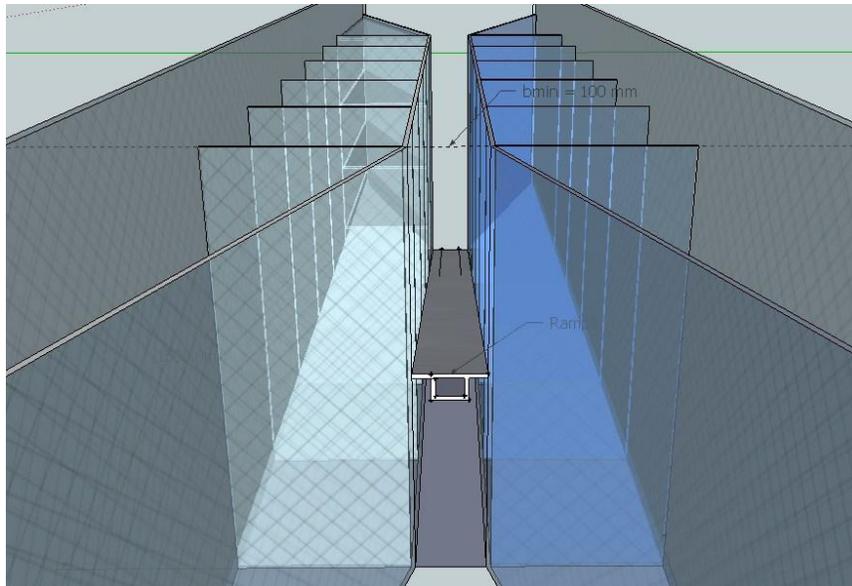
Por lo que se consideran inadecuados los resultados obtenidos y se procede a realizar la prueba base No. 3 con el prototipo No.2., pero en esta ocasión agregando una rampa que permitirá trabajar con gastos mínimos al máximo y revisar si, existen condiciones críticas en la contracción.

### **3.2.3. Tercera prueba base.**

Para la tercera prueba base, se decide agregar al prototipo No.2 una compuerta tipo rampa, que permitirá elevar o disminuir la altura de la contracción en el canal cuando éste cuente con gastos menores al máximo y, seguir manteniendo las condiciones críticas que garanticen el funcionamiento como aforador de dicha estructura en estudio.

El proceso a realizar consta de varias pruebas con variación de altura de la rampa (5, 7.5, 10, 15, 20 y 30 cm).

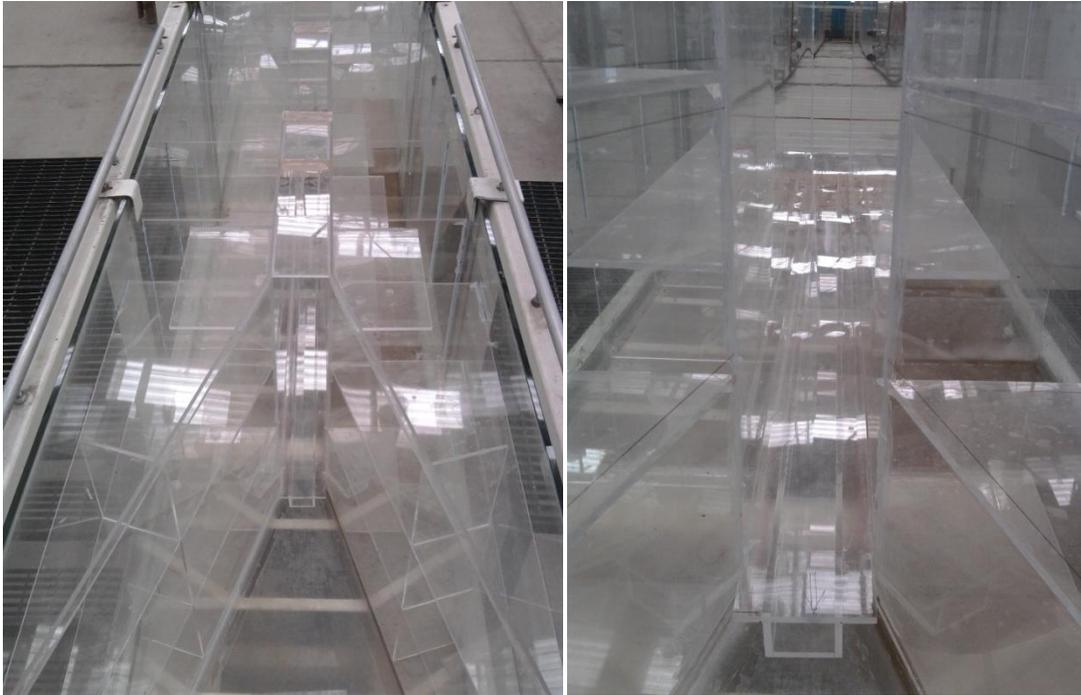




**Figura 14. Representación en corte isométrico del prototipo No.2, con rampa de variación de altura, en 3D con el programa de diseño SketchUp 8.**

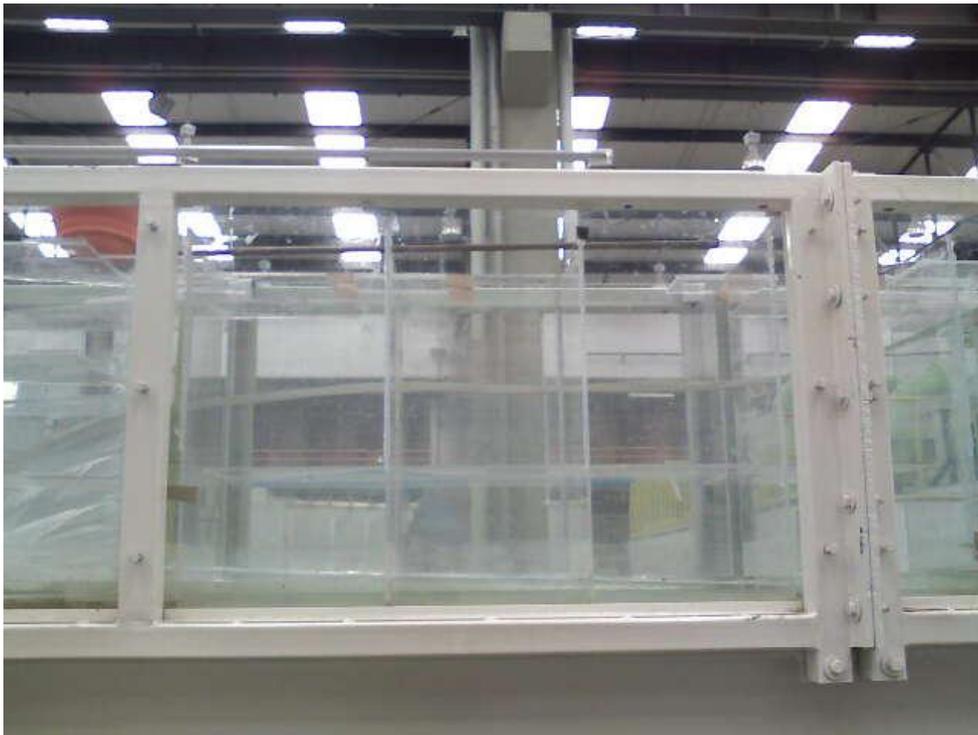
Para iniciar la sesión de pruebas se decide revisar puntos clave que permitan generar resultados adecuados:

- Nuevamente se asegura que las válvulas del circuito se encuentren completamente cerradas y que a su vez el display del medidor electromagnético marque el valor de gasto igual a cero, aunque se vuelve imposible debido a una ligera fuga.
- Se instala la rampa con altura 5 cm y se sellan las juntas, ya que durante toda la longitud de la contracción la cual cuenta con variación de ancho lo que podría generar la filtración de agua y por ende la toma de datos incorrecta.
- Al colocar la primera altura de rampa, se cuida que ésta se encuentre completamente alineada y no presente deflexión a lo largo de la contracción. Para ello se colocan pequeñas placas de acrílico producto del proceso de corte del modelo realizado con anterioridad, con lo que se asegura la rigidez longitudinal.
- Los pasos anteriores se realizan para las alturas correspondientes de 7.5, 10, 15, 20 y 30 cm.
- Se toman datos y se interpretan los resultados.



***Imagen 3. Prototipo No.2, con rampa de variación de altura, instalado canal de prueba.***

***3.2.3.1. Resultados de la Tercera prueba base No.1 (Rampa con 5 cm de altura).***





**Imagen 4. Perfil de flujo del Prototipo No.2, con rampa de variación de altura igual a 5 cm, instalado canal de prueba.**

Tabla de resultados:

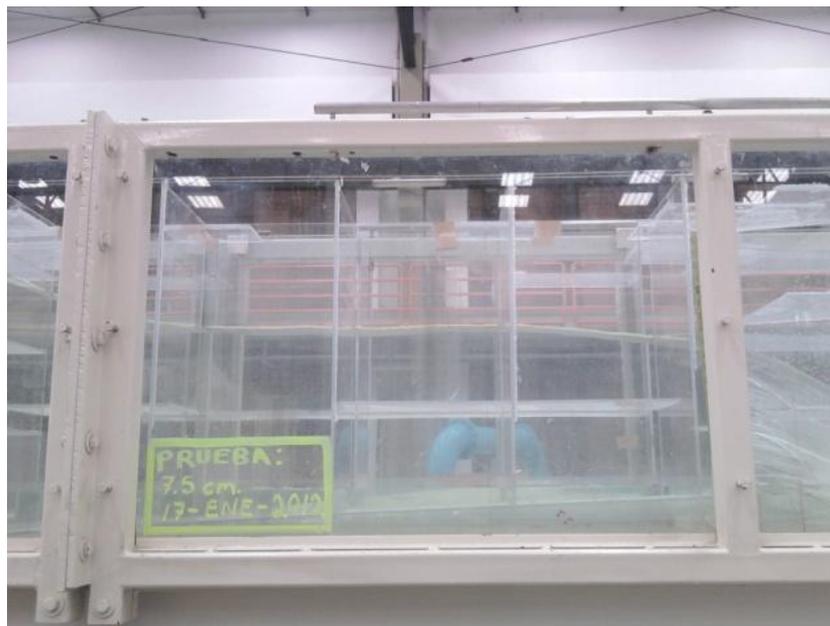
| Nombre de prueba:             |                                       | 3a PRUEBA BASE     |                    |                    | Fecha  |
|-------------------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--|
| No. De prueba:                |                                       | 1 (Escalón 5 cm)   |                    |                    | 10 de Enero de 2012  |
| Clave Geometría del Aforador: |                                       | B2                 |                    |                    |  |
| Punto a medir (sección)       |                                       | Distancia (z)<br>m | Distancia (y)<br>m | Distancia (x)<br>m | Observaciones  |
| 1                             | Tirante aguas arriba<br>( $y_{max}$ ) | $0.565 \pm 0.001$  | $0.595 \pm 0.001$  | 8.55m              | Se ajusta el tirante de prueba al obtenido de la ecuaciones, el cual corresponde a 0.565 m.  |
| 2                             | Rampa                                 | $0.05 \pm 0.002$   | $0.260 \pm 0.0005$ | 13.11              | La rampa se fija perfectamente a las paredes de la contracción y se sella para evitar filtraciones, pero aún así existen filtraciones en los costados de la rampa. |

|                   |                     |
|-------------------|---------------------|
| Gasto en medidor: | 67 lps $\pm$ 3 lps. |
|-------------------|---------------------|

**Tabla 4. Resultado tercera prueba base no. 1 (escalón de 5 cm).**

**3.2.3.2. Resultados de la tercera prueba base No.2 (Rampa con 7.5 cm de altura).**



**Imagen 5. Perfil de flujo del Prototipo No.2, con rampa de variación de altura igual a 7.5 cm, instalado canal de prueba.**

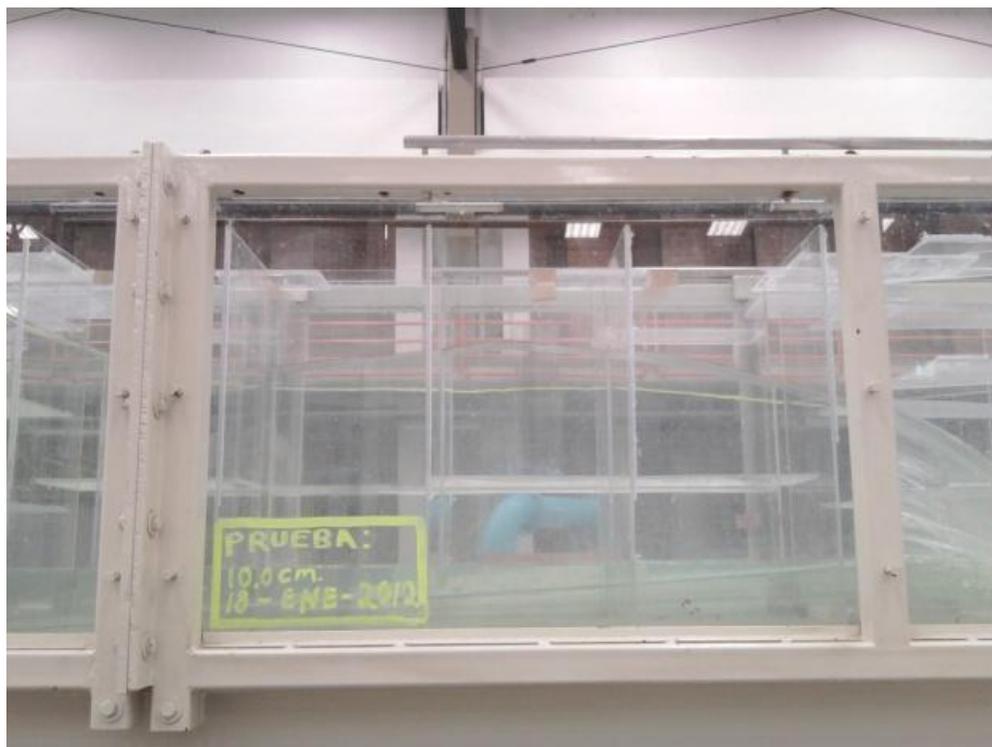
## Tabla de resultados:

| Nombre de prueba:             |                                       | 3a PRUEBA BASE     |                    |                    | Fecha  |
|-------------------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--|
| No. De prueba:                |                                       | 2 (Escalón 7.5 cm) |                    |                    | 17 de Enero de 2012  |
| Clave Geometría del Aforador: |                                       | B2                 |                    |                    |  |
| Punto a medir (sección)       |                                       | Distancia (z)<br>m | Distancia (y)<br>m | Distancia (x)<br>m | Observaciones  |
| 1                             | Tirante aguas arriba<br>( $y_{max}$ ) | 0.565 ±<br>0.001   | 0.595 ±<br>0.001   | 8.55               | Se ajusta el tirante de prueba al obtenido de la ecuación, el cual corresponde a 0.565 m.  |
| 2                             | Rampa                                 | 0.075 ±<br>0.002   | 0.260 ±<br>0.0005  | 13.11              | La rampa se fija perfectamente a las paredes de la contracción y se sella para evitar filtraciones, pero aún así existen filtraciones en los costados de la rampa. |

|                   |                 |
|-------------------|-----------------|
| Gasto en medidor: | 65 lps ± 3 lps. |
|-------------------|-----------------|

**Tabla 5. Resultado tercera prueba base no. 2 (escalón de 7.5 cm).**

### 3.2.3.3. Resultados de la tercera prueba base No.3 (Rampa con 10 cm de altura).





**Imagen 6. Perfil de flujo del Prototipo No.2, con rampa de variación de altura igual a 10 cm, instalado canal de prueba.**

**Tabla de resultados:**

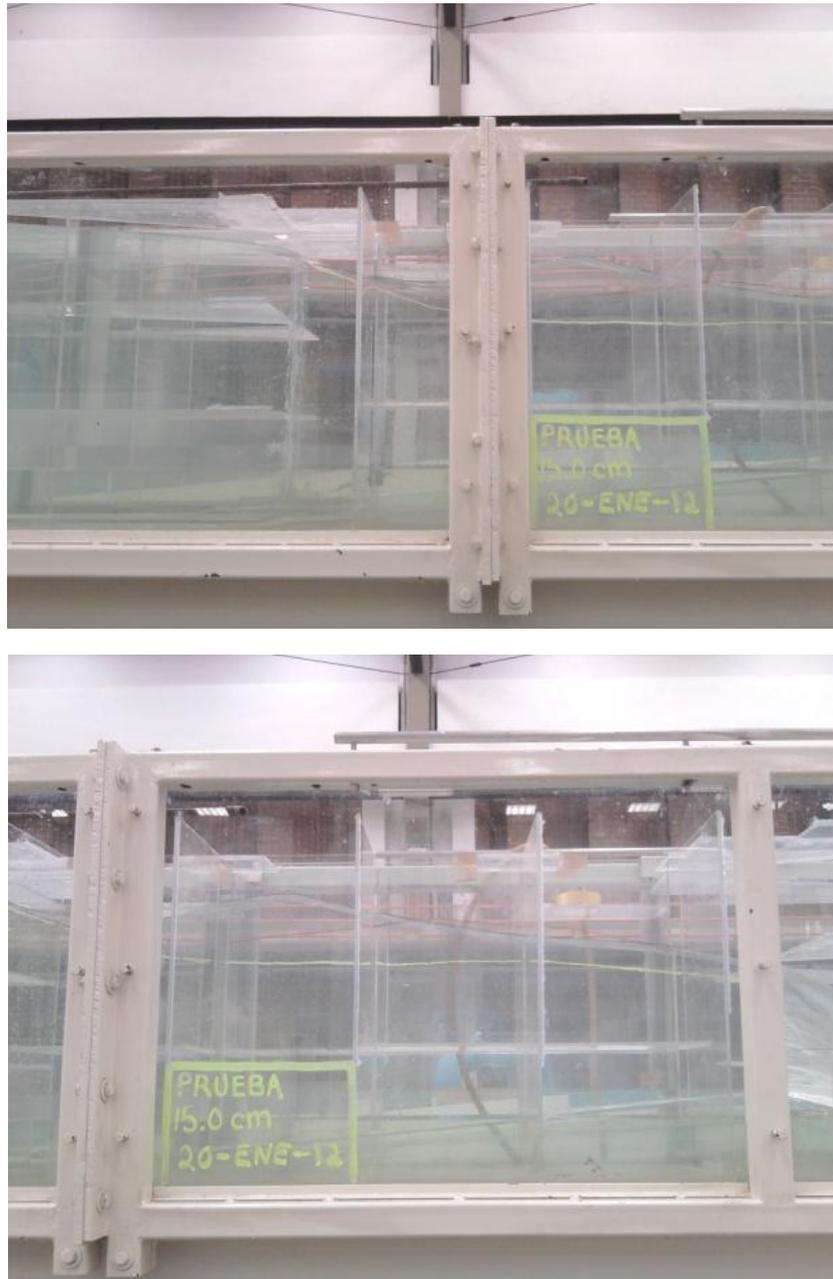
| Nombre de prueba:                          |                    | 3a PRUEBA BASE     |                    |  | Fecha               |
|--|--------------------|--------------------|--------------------|--|---------------------|
| No. De prueba:                             |                    | 3 (Escalón 10 cm)  |                    |  | 18 de Enero de 2012 |
| Clave Geometría del Aforador:              |                    | B2                 |                    |  |                     |
| Punto a medir (sección)                    | Distancia (z)<br>m | Distancia (y)<br>m | Distancia (x)<br>m | Observaciones  |                     |
| 1<br>Tirante aguas arriba<br>( $y_{max}$ ) | 0.565 ±<br>0.001   | 0.595 ±<br>0.001   | 8.55               | Se ajusta el tirante de prueba al obtenido de la ecuaciones, el cual corresponde a 0.565 m.  |                     |
| 2<br>Rampa                                 | 0.100 ±<br>0.002   | 0.260 ±<br>0.0005  | 13.11              | La rampa se fija perfectamente a las paredes de la contracción y se sella para evitar filtraciones, pero aún así existen filtraciones en los costados de la rampa. |                     |

|                   |                 |
|-------------------|-----------------|
| Gasto en medidor: | 61 lps ± 3 lps. |
|-------------------|-----------------|

**Tabla 6. Resultado tercera prueba base no. 3 (escalón de 10 cm).**

**3.2.3.4. Resultados de la tercera prueba base No.4 (Rampa con 15 cm de altura).**



**Imagen 7. Perfil de flujo del Prototipo No.2, con rampa de variación de altura igual a 15 cm, instalado canal de prueba.**

## Tabla de resultados:

|                               |                   |  |  |                     |
|-------------------------------|-------------------|--|--|---------------------|
| Nombre de prueba:             | 3a PRUEBA BASE    |  |  | Fecha               |
| No. De prueba:                | 4 (Escalón 15 cm) |  |  | 20 de Enero de 2012 |
| Clave Geometría del Aforador: | B2                |  |  |                     |

| Punto a medir (sección)                 | Distancia (z)<br>m | Distancia (y)<br>m | Distancia (x)<br>m | Observaciones  |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|--|
| 1 Tirante aguas arriba<br>( $y_{max}$ ) | 0.565 ±<br>0.001   | 0.595 ±<br>0.001   | 8.55               | Se ajusta el tirante de prueba al obtenido de la ecuaciones, el cual corresponde a 0.565 m.  |
| 2 Rampa                                 | 0.150 ±<br>0.002   | 0.260 ±<br>0.0005  | 13.11              | La rampa se fija perfectamente a las paredes de la contracción y se sella para evitar filtraciones, pero aún así existen filtraciones en los costados de la rampa. |

|                   |                 |
|-------------------|-----------------|
| Gasto en medidor: | 54 lps ± 3 lps. |
|-------------------|-----------------|

**Tabla 8. Resultado tercera prueba base no. 4 (escalón de 15 cm).**

### 3.2.3.5. Resultados de la tercera prueba base No.5 (Rampa con 20 cm de altura).





**Imagen 8. Perfil de flujo del Prototipo No.2, con rampa de variación de altura igual a 20 cm, instalado canal de prueba.**

**Tabla de resultados:**

| Nombre de prueba:                       |                    | 3a PRUEBA BASE     |                    |  | Fecha               |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|--|---------------------|
| No. De prueba:                          |                    | 5 (Escalón 20 cm)  |                    |  | 23 de Enero de 2012 |
| Clave Geometría del Aforador:           |                    | B2                 |                    |  |                     |
| Punto a medir (sección)                 | Distancia (z)<br>m | Distancia (y)<br>m | Distancia (x)<br>m | Observaciones  |                     |
| 1 Tirante aguas arriba<br>( $y_{max}$ ) | 0.565 ±<br>0.001   | 0.595 ±<br>0.001   | 8.55               | Se ajusta el tirante de prueba al obtenido de la ecuaciones, el cual corresponde a 0.565 m.  |                     |
| 2 Rampa                                 | 0.200 ±<br>0.002   | 0.260 ±<br>0.0005  | 13.11              | La rampa se fija perfectamente a las paredes de la contracción y se sella para evitar filtraciones, pero aún así existen filtraciones en los costados de la rampa. |                     |

| Gasto en medidor: | 46 lps ± 3 lps. |
|-------------------|-----------------|
|-------------------|-----------------|

**Tabla 9. Resultado tercera prueba base no. 5 (escalón de 20 cm).**

**3.2.3.6. Resultados de la tercera prueba base No.5 (Rampa con 30 cm de altura).**



**Imagen 9. Perfil de flujo del Prototipo No. 2, con rampa de variación de altura igual a 30 cm, instalado canal de prueba.**

### Tabla de resultados:

|                               |                   |  |  |                     |
|-------------------------------|-------------------|--|--|---------------------|
| Nombre de prueba:             | 3a PRUEBA BASE    |  |  | Fecha               |
| No. De prueba:                | 6 (Escalón 30 cm) |  |  | 24 de Enero de 2012 |
| Clave Geometría del Aforador: | B2                |  |  |                     |

| Punto a medir (sección)                 | Distancia (z)<br>m | Distancia (y)<br>m | Distancia (x)<br>m | Observaciones  |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|--|
| 1 Tirante aguas arriba<br>( $y_{max}$ ) | 0.565 ±<br>0.001   | 0.595 ±<br>0.001   | 8.55               | Se ajusta el tirante de prueba al obtenido de la ecuación, el cual corresponde a 0.565 m.  |
| 2 Rampa                                 | 0.300 ±<br>0.002   | 0.260 ±<br>0.0005  | 13.11              | La rampa se fija perfectamente a las paredes de la contracción y se sella para evitar filtraciones, pero aún así existen filtraciones en los costados de la rampa. |

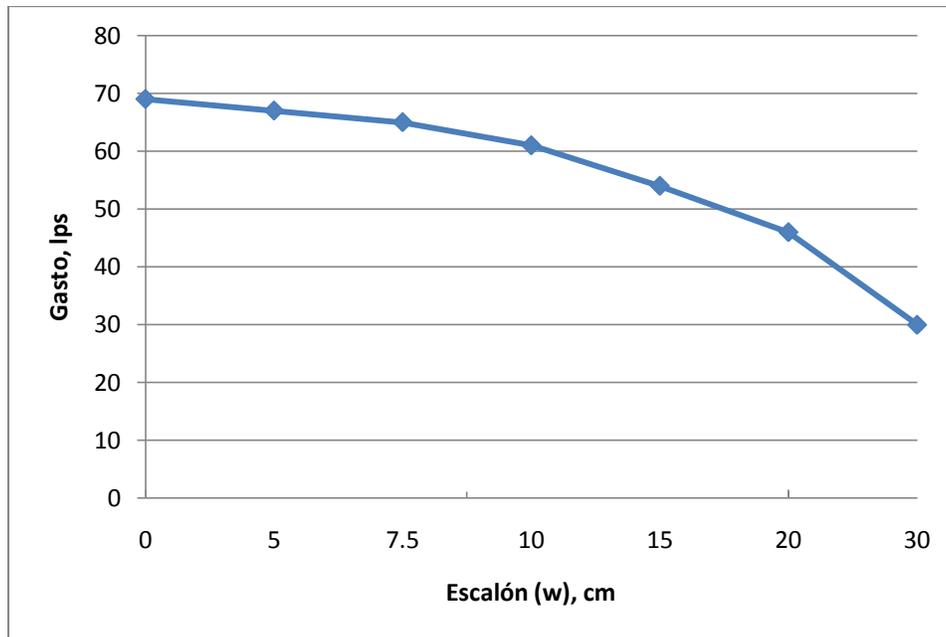
  

|                   |                   |
|-------------------|-------------------|
| Gasto en medidor: | 30 lps ± 2.5 lps. |
|-------------------|-------------------|

**Tabla 10. Resultado tercera prueba base no. 6 (escalón de 30 cm).**

### 3.2.3.7. Resumen de resultados finales de la tercera prueba base con diferentes alturas de rampa.

| $Q_{mo}$<br>lps | escalón<br>cm | $y_{max}$<br>cm |
|-----------------|---------------|-----------------|
| 69              | 0             | 56.5            |
| 67              | 5             | 56.5            |
| 65              | 7.5           | 56.5            |
| 61              | 10            | 56.5            |
| 54              | 15            | 56.5            |
| 46              | 20            | 56.6            |
| 30              | 30            | 56.6            |



**Gráfica 2. Curva gasto (Q) vs Altura de escalón tipo rampa (w), en cm. De tercera prueba base.**

### **3.2.3.8. Conclusiones de resultados de tercera prueba base.**

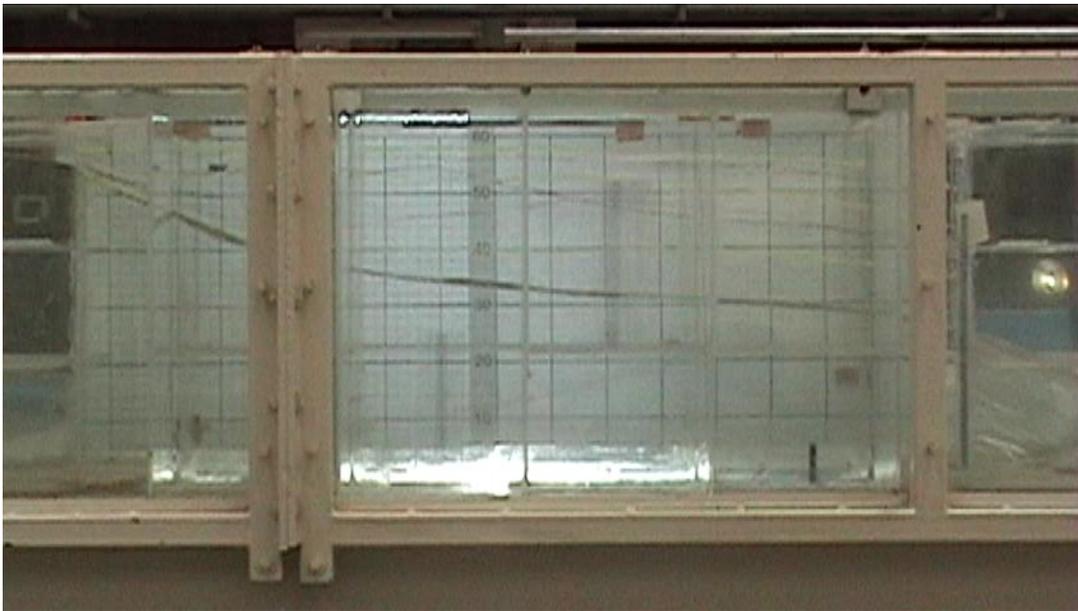
Los resultados obtenidos en las pruebas muestran una tendencia esperada, como puede apreciarse en la curva altura de escalón vs gasto, pero, debido a que el canal en días anteriores a la realización de dichas pruebas había sido utilizado y desajustada la pendiente del mismo, se procede a desechar los resultados y preparar una cuarta prueba base definitiva. Para ello habrá que corregirse dicho puntos y otros detalles que en el siguiente inciso se enumeran.

### **3.2.4. Cuarta prueba base.**

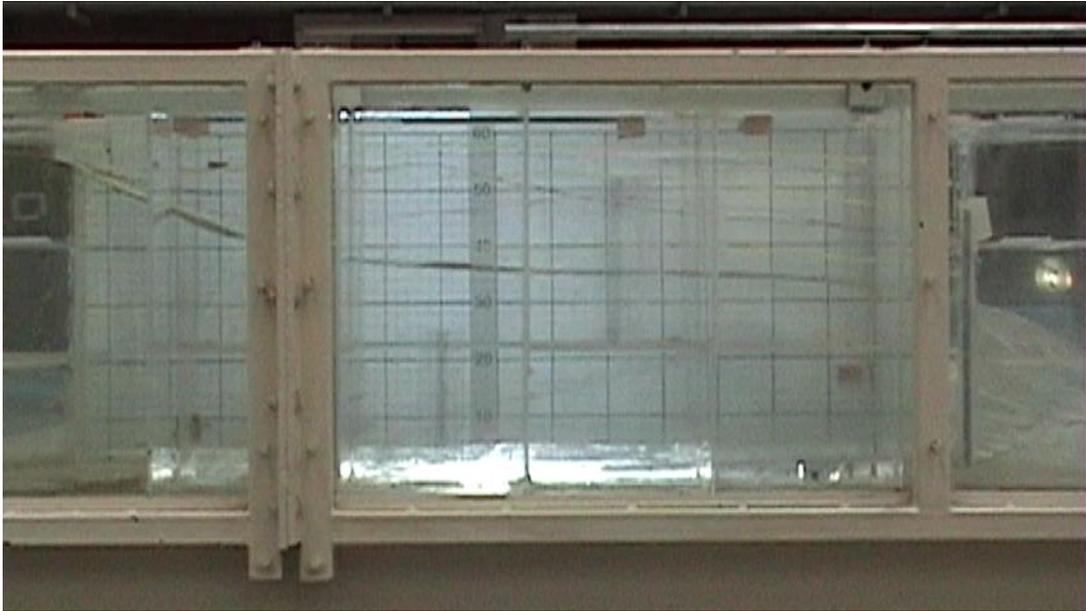
Para la cuarta prueba base, por ser la prueba definitiva para la obtención de datos de laboratorio, se decide realizar el proceso de manera más detallada y cuidando mejor la toma de datos para cada prueba, el proceso que se lleva a cabo es el siguiente.

- Se perfora y establece a lo largo del canal de prueba piezómetros que permitan observar los niveles de tirantes en el canal de llegada, dentro de la estructura y en el canal de salida.
- Se instala un tornillo justo debajo de la rampa de prueba para permitir realizar las pruebas a diferentes alturas de manera más rápida y sencilla, para ello fue necesario fijar al inicio de la contracción dicha rampa.
- Se sella nuevamente con silicón las uniones del modelo, así como también se retiran rebabas en las mismas para evitar que esto reduzca el área de prueba.

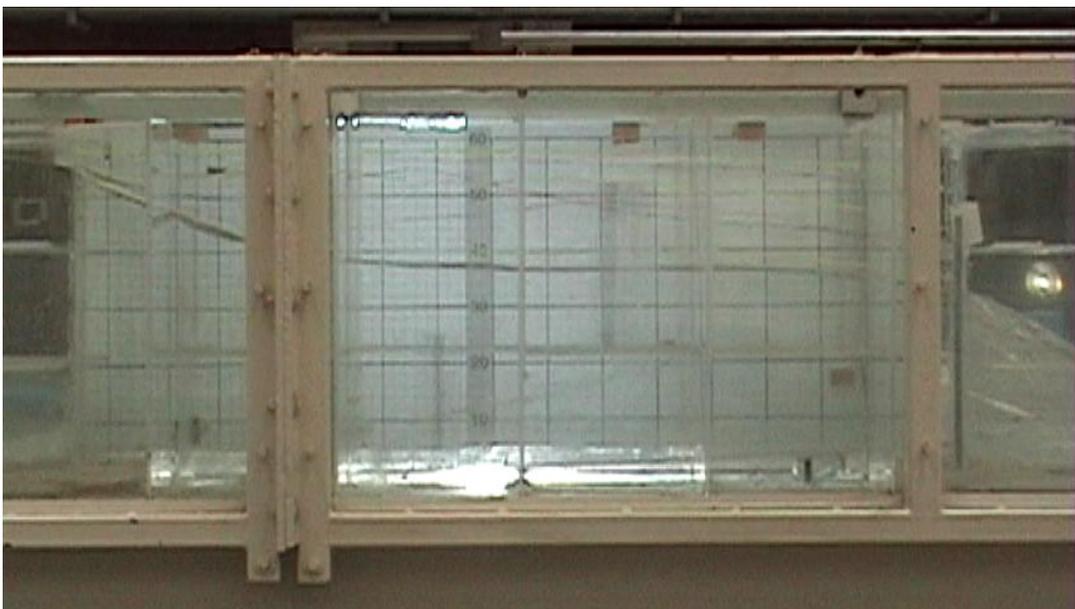
- Se ajusta nuevamente el ancho de la contracción, asegurándose de que ésta mantenga el correspondiente a 10 cm ( $b_{min}$ ).
- Se cierran válvulas en el circuito para impedir el paso del flujo hacia otras zonas y genere problemas al momento de obtener los datos, aunque se ha identificado que, existe ligera fuga de 3 lps en algún punto ya que el medidor marca dicho valor aún con válvulas cerradas, todo esto para garantizar el valor de gasto correcto.
- Mediante un proceso minucioso se ajusta la pendiente del canal a cero, verificando en varios puntos del mismo con un nivel de mano y apretando correctamente las tuercas que sostienen dicho canal. Cabe mencionar que dicho ajuste de la pendiente se debe a los resultados obtenidos en el modelo de simulación con altura de 30 cm en la rampa, que en el siguiente capítulo se explica con mayor detalle.
- Se activan los sensores de velocidad del medidor ultrasónico instalado meses anteriores en el canal, y se verifica su correcto funcionamiento.
- Se coloca en la cara izquierda en dirección del flujo, una cuadrícula de papel bond escalada e impresa de manera adecuada que permitiera a su vez captar el comportamiento de los perfiles de flujo mediante una cámara de video y una luz en contra, al momento de inyectarle tinta azul.



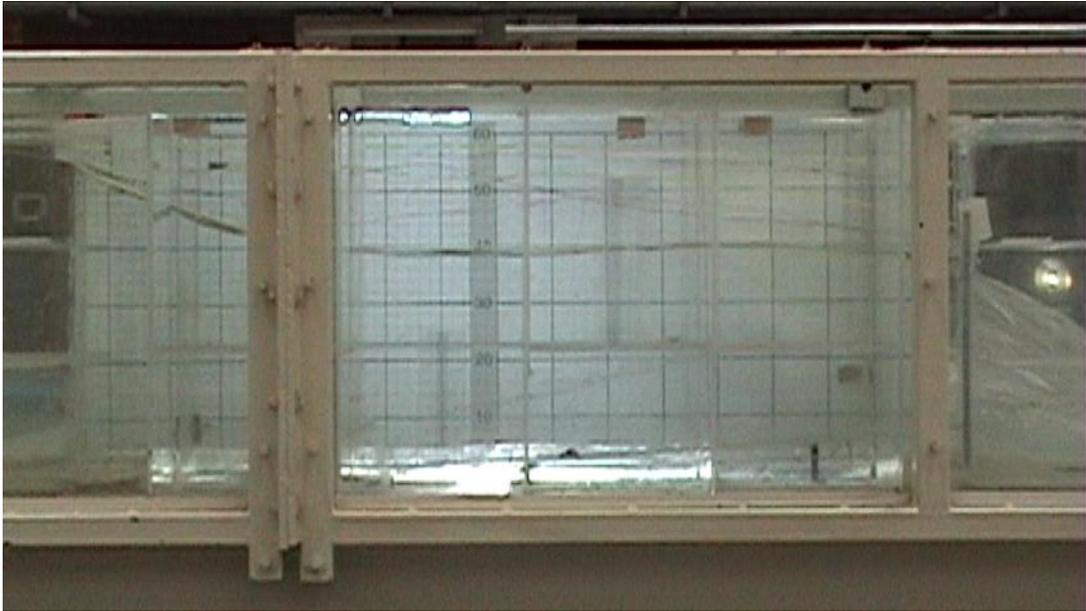
***Imagen 10. Perfil de flujo de la cuarta prueba base, sin rampa en la contracción.***



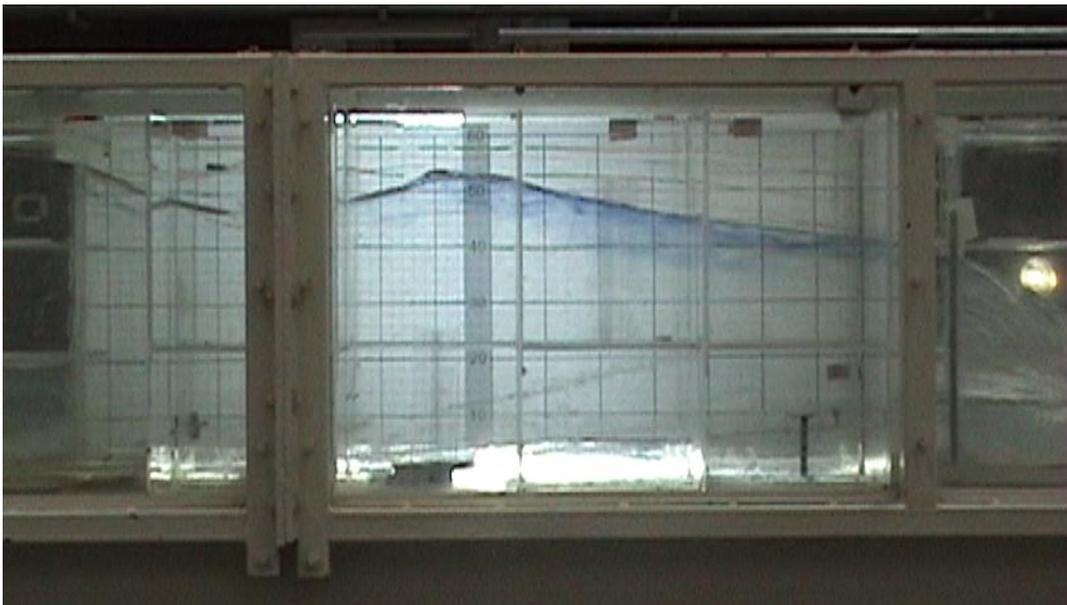
***Imagen 11. Perfil de flujo de la cuarta prueba base, con 5 cm de altura de rampa.***



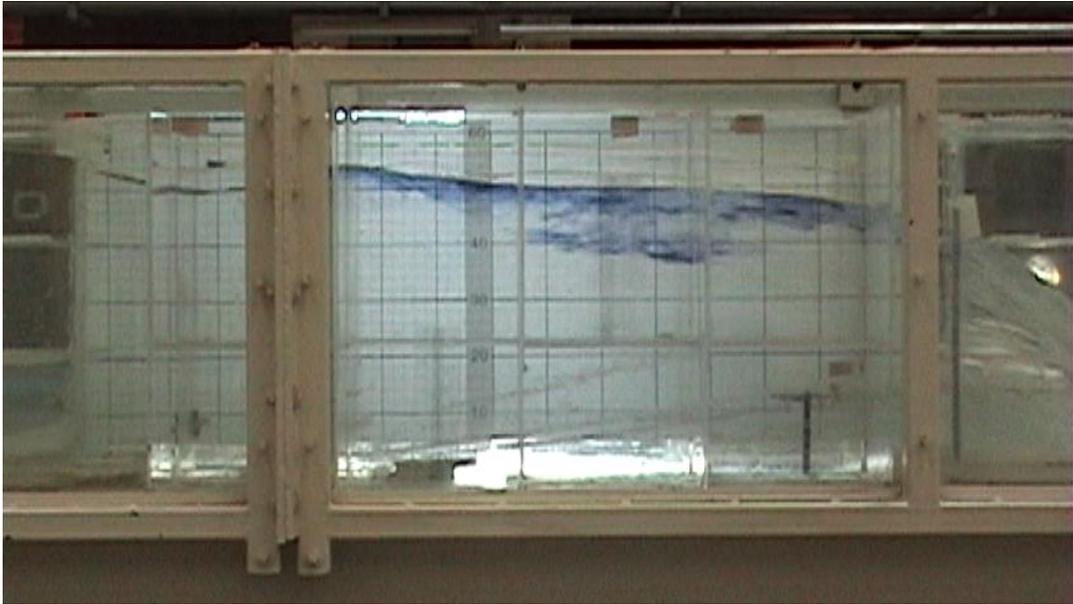
***Imagen 12 Perfil de flujo de la cuarta prueba base, con 7.5 cm de altura de rampa.***



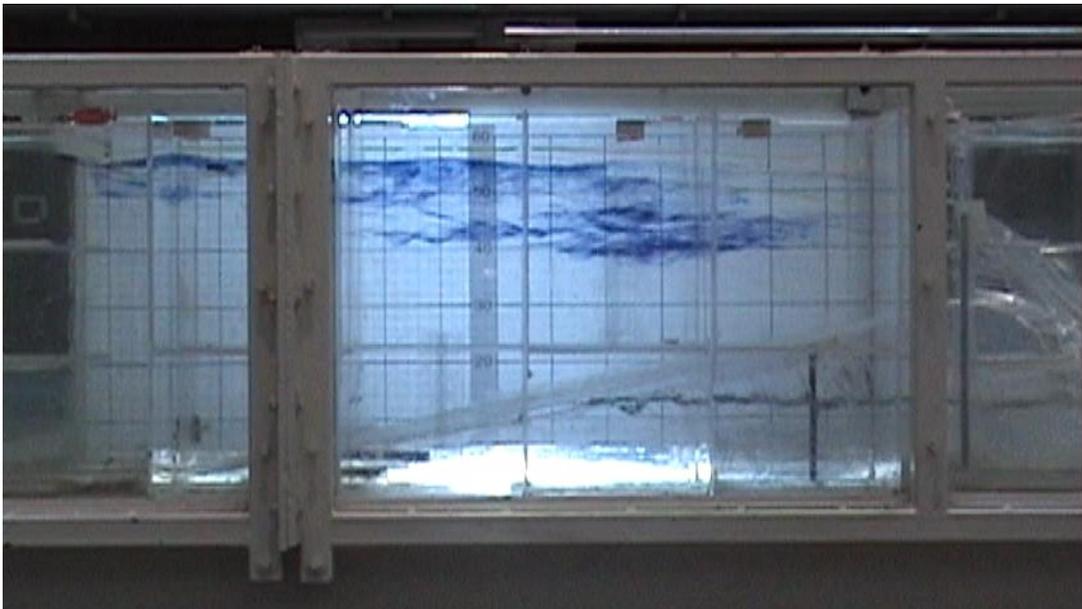
*Imagen 13. Perfil de flujo de la cuarta prueba base, con 10 cm de altura de rampa.*



*Imagen 14. Perfil de flujo de la cuarta prueba base, con 15 cm de altura de rampa.*



*Imagen 15. Perfil de flujo de la cuarta prueba base, con 20 cm de altura de rampa.*

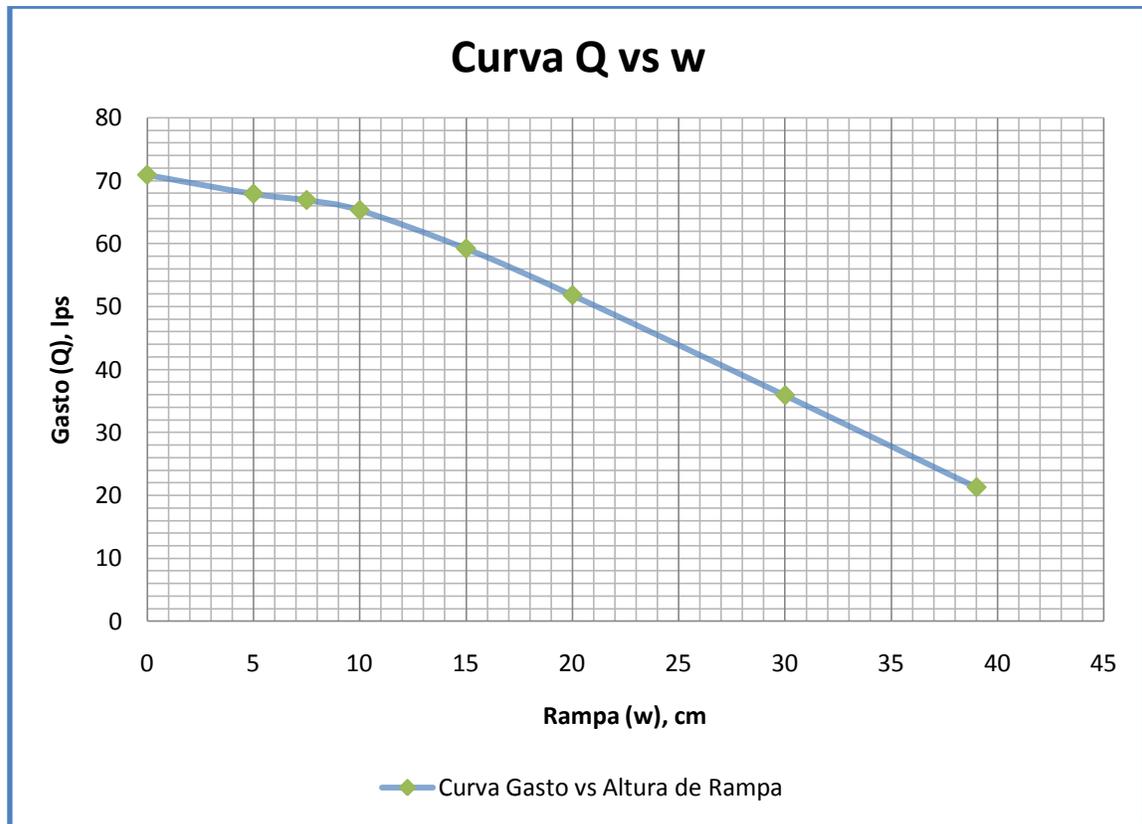


*Imagen 16. Perfil de flujo de la cuarta prueba base, con 30 cm de altura de rampa.*

### 3.2.4.1. Resultados de la cuarta prueba base.

| Nombre de prueba:             |                  | 4a PRUEBA BASE             | Fecha                 |                      |               |
|-------------------------------|------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------|---------------|
| No. De prueba:                |                  | 1                          | 28 de junio de 2012   |                      |               |
| Clave Geometría del Aforador: |                  | B2                         |                       |                      |               |
| Altura de rampa               | Gasto en medidor | Tirante en metro (regleta) | Tirante en piezómetro | Velocidad en medidor | Distancia (x) |
| cm                            | lps              | cm                         | cm                    | m/s                  | m             |
| 0                             | 70.9             | 56.75 ± 0.05               | 56.6 ± 0.1            | 0.20 ± 0.1           | 13.11         |
| 5                             | 66.9             | 56.3 ± 0.1                 | 56.2 ± 0.2            | 0.19 ± 0.1           | 13.11         |
| 7.5                           | 65.3             | 56.5 ± 0.1                 | 56.3 ± 0.1            | 0.18 ± 0.1           | 13.11         |
| 10                            | 64               | 56.5 ± 0.1                 | 56.4 ± 0.1            | 0.18 ± 0.1           | 13.11         |
| 15                            | 59               | 56.5 ± 0.1                 | 56.3 ± 0.1            | 0.15 ± 0.1           | 13.11         |
| 20                            | 51.8             | 56.4 ± 0.1                 | 56.4 ± 0.1            | 0.14                 | 13.11         |
| 30                            | 35.9             | 56.5 ± 0.1                 | 56.4 ± 0.1            | 0.09 ± 0.1           | 13.11         |
| 39                            | 21.3             | 56.5 ± 0.1                 | 56.4 ± 0.1            | 0.09 ± 0.1           | 13.11         |

**Tabla 11. Resultados de cuarta prueba base.**



**Gráfica 3. Curva gasto (Q) vs Elevación (w) de rampa de cuarta prueba base**

Los resultados obtenidos de la cuarta prueba base se consideran como adecuados para continuar con el proceso en estudio y definir la estructura más adecuada, debido a que dicha prueba se desarrolló cuidando detalles en la medición y seguridad en el canal.

## Capítulo IV

### Revisión de aforador mediante modelos de simulación.

Con la finalidad de contar con un estudio más detallado del funcionamiento hidráulico de los modelos estudiados se realizó una modelación basado en CFD<sup>9</sup> (Computational Fluid Dynamics) donde se utilizó el programa *Flow3D*.

Se simuló el flujo dentro de un aforador de garganta larga, el dominio de modelación consiste en un tramo largo de 610.39 x 60 x 80 cm, de ancho y alto respectivamente, los cuales se trabajaron en formato CAD 3D para posteriormente exportarlos al programa Flow-3D. Se realizaron dos pruebas y compararon los resultados, como se muestra en los incisos B y C.

#### 4.1.- Descripción del Modelo Numérico FLOW-3D

La modelación matemática se realizó como se ha indicado anteriormente con el uso de del modelo numérico Flow-3D, el cual nos permite analizar la estructura 3D del flujo en condiciones que se requiera, tanto subcríticas como supercríticas, haciendo uso del código comercial de volúmenes finitos no hidrostáticos (Flow Science Inc. 2008). Dicho código se ha usado previamente para resolver el flujo alrededor de numerosas estructuras, incluyendo pilas de puentes (Richardson and Panchang, 1998), tuberías submarinas (Smith and Foster, 2005), aliviaderos curvos (Abad et al., 2008), estaciones de aireación (Abad et al. 2004), entradas de túneles en presas (Groeneveld et al., 2007). El código resuelve interfaces fluido-fluido y fluido-aire con una malla rectangular y un enfoque de volumen de fluido (volume of fluids, VOF). El código resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes en 3D promediadas para flujo incompresible simultáneamente con la ecuación de continuidad. Ambas ecuaciones están dadas por:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u_j A_{[j]} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right\} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + G_i + f_i \quad (38)$$

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i A_{[i]}) = 0.0 \quad (39)$$

Donde  $i, j = 1, 2, 3$  representan las componentes  $x, y, z$  del sistema de coordenadas cartesiano, respectivamente,  $V_F$  es el volumen fraccional abierto al flujo,  $\rho$  es la densidad del flujo,  $t$  es el tiempo,  $x_i$  son las coordenadas espaciales,  $u_i$  son las componentes de la velocidad,  $A_i$  son las áreas fraccionales abiertas al flujo,  $G_i$  son las aceleraciones gravitatorias y  $f_i$  son los términos viscosos.

Junto con las ecuaciones de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento, se necesita usar un cierre de turbulencia. El modelo de turbulencia RNG se describe como:

---

<sup>9</sup> CFD en traducción al español Dinámica de Fluidos Computacional.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u_j A_{[j]} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} = P + Diff - \varepsilon \quad (40)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u_j A_{[j]} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\} = \frac{C_{\varepsilon 1} \varepsilon}{k} P + Diff - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (41)$$

Donde  $P$  es la producción de corte (shear production),  $Diff$  y  $DDif$  son los términos de difusión,  $C_{\varepsilon 1} = 1,42$  y  $C_{\varepsilon 2}$  es la función de tasa de corte (shear rate, no constante, como en el caso del modelo  $\kappa$ - $\varepsilon$  estándar). El modelo RNG descrito por las ecuaciones (40) y (41) se implementa de manera muy similar al cierre  $\kappa$ - $\varepsilon$  estándar para las ecuaciones de energía cinética turbulenta y disipación de energía cinética turbulenta, respectivamente. Los modelos basados en RNG dependen menos de constantes empíricas en tanto que brindan un marco para la derivación de un rango de modelos de diferentes escalas (Flow Science Inc., 2008).

#### **4.1.1.- Análisis de sensibilidad de la malla.**

Dado que se necesita un compromiso entre el tamaño de la malla y tiempo de cálculo para alcanzar resultados hidráulicos representativos, se realizó un análisis de resolución del tamaño de la malla. Esto deriva del hecho de que si se necesitan resultados muy precisos, el tamaño de las celdas debe ser lo suficientemente pequeño como para resolver las variables hidráulicas más importantes. Resolver las características tanto del flujo principal como turbulentas de manera adecuada requeriría usar celdas de cálculo muy pequeñas, lo cual consumiría una gran cantidad de tiempo de cálculo principalmente debido al tamaño de las estructuras (Nanía, 1999).

Cada simulación con FLOW3D fue llevada a cabo en la computadora del área HCA - Ambiental<sup>10</sup> usando 2 procesadores a la vez, lo cual permitió realizar las simulaciones en un tiempo razonable. Inicialmente, se utilizaron celdas cúbicas de 2 cm de lado y para todo el dominio. Una segunda serie de simulaciones fue realizada con celdas de 0,75 cm de lado cuyos resultados se compararon con el caso inicial. Dado que se observó una pequeña variabilidad en los resultados, se concluyó que debería disminuirse aún más el tamaño de malla, adoptándose como definitiva la de 0,5 cm de lado. Debe notarse que cada caso fue simulado un número de pasos de tiempo suficiente para lograr la estabilidad de variables hidráulicas tales como los tirantes. En general, las simulaciones fueron de hasta 120 segundos, tiempo suficiente para observar una estabilidad en las oscilaciones de los flujos, lo que permitió la estimación de tirantes, regímenes de flujo y velocidades.

---

<sup>10</sup> Cabe la pena señalar, que el proceso de simulación fue llevado a cabo con apoyo de la M.I. Cecilia Millan, del departamento de hidráulica del IMTA, ya que debido a que el manejo de dicho programa requiere basta experiencia y conocimiento, así como también la restricción del uso de candados del programa.

#### 4.2.- Prueba 1 (contracción sin rampa).

La primera prueba de simulación consta del modelo sin rampa ascendente en la zona de control de 150 cm de longitud, 10 cm de ancho en la contracción y 80 cm de alto. Cabe mencionar que las dimensiones ancho-alto del canal de pendiente variable del laboratorio de Hidráulica “Enzo Levi” del IMTA equivalen a 60 y 70 cm, respectivamente, sólo que se simuló una sección más grande, que permitiera obtener los resultados de mejor manera.

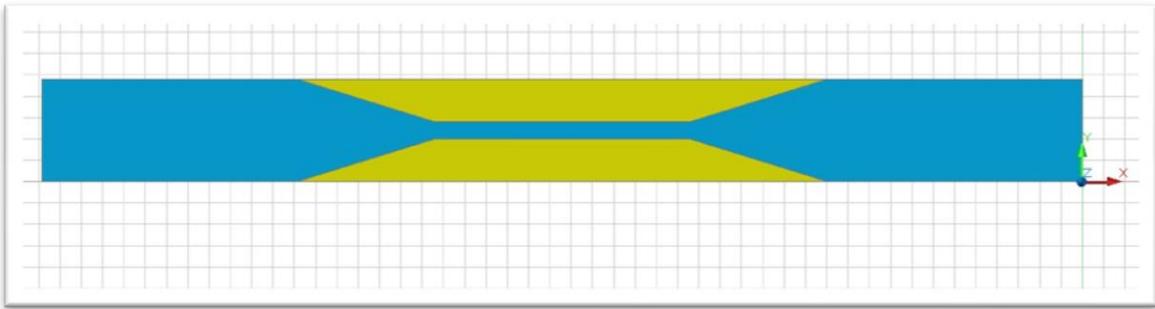


Figura 15. Dominio de simulación visto en planta

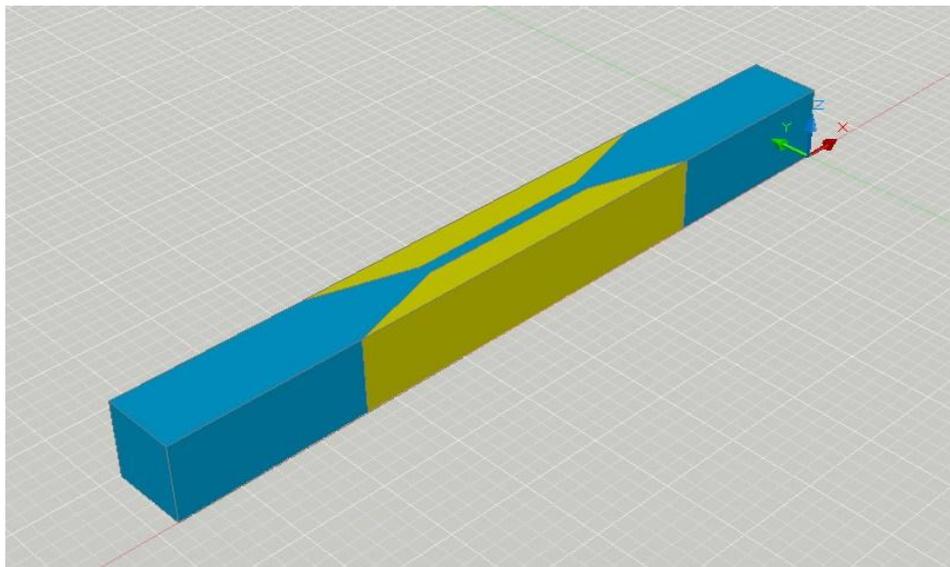
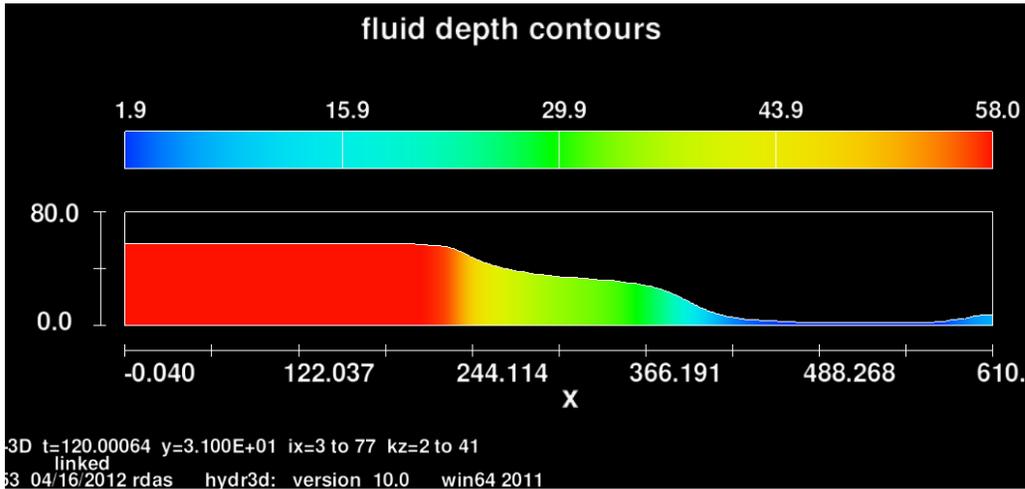


Figura 16. Dominio de simulación vista general. Las dimensiones son  $-610.39 \times 60 \times 0.80$  cm en los ejes  $x, y, z$ , respectivamente.

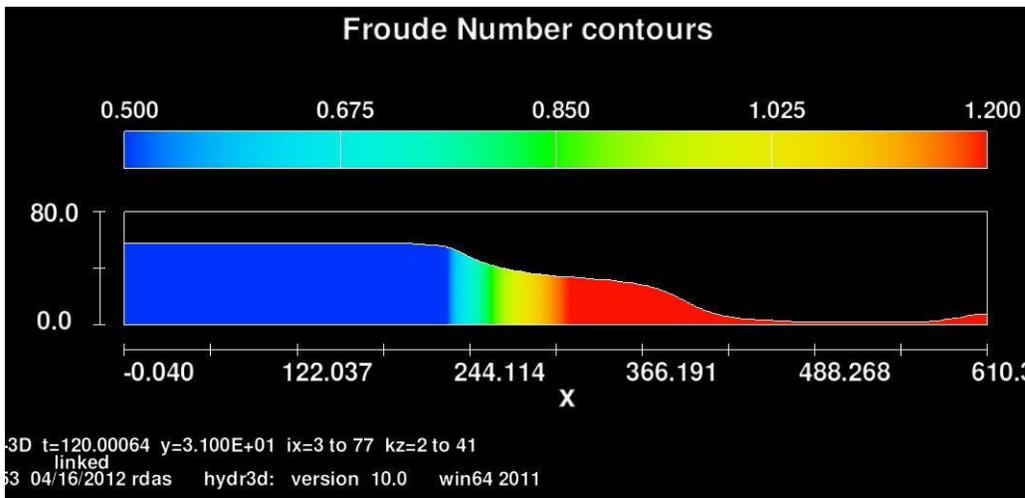
#### 4.2.1.- Resultados de la Prueba 1 (contracción sin rampa).

Los resultados fueron satisfactorios comportándose de acuerdo a la ecuación Gasto-Tirante para el aforador de garganta larga en estudio. Por ejemplo, el tirante del canal de llegada para un gasto máximo que tendría que ser para este caso,

equivalente a 56.5 cm y 73 l/s respectivamente, el resultado de tirante obtenido de la simulación para el mismo gasto de 73 lps equivale a 57.86 cm.

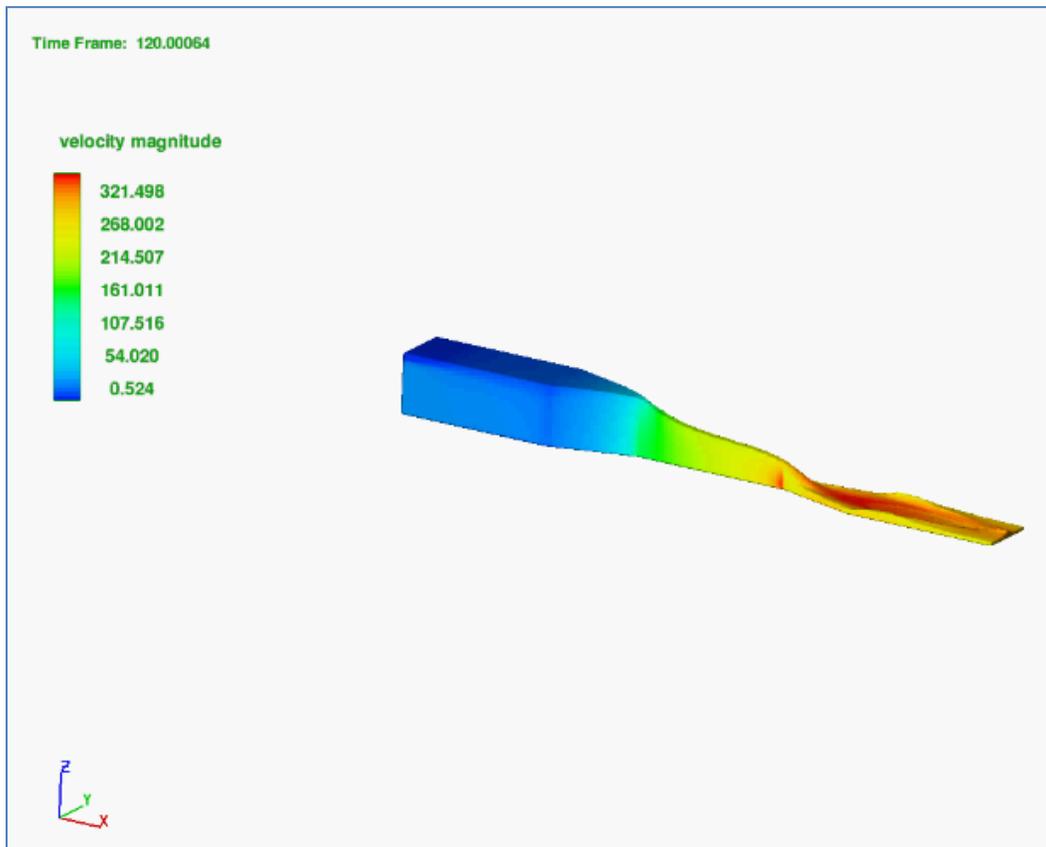


**Figura 17. Corte x-z. Tirantes a lo largo del aforador, tirante en el canal de llegada de 57.86 cm.**



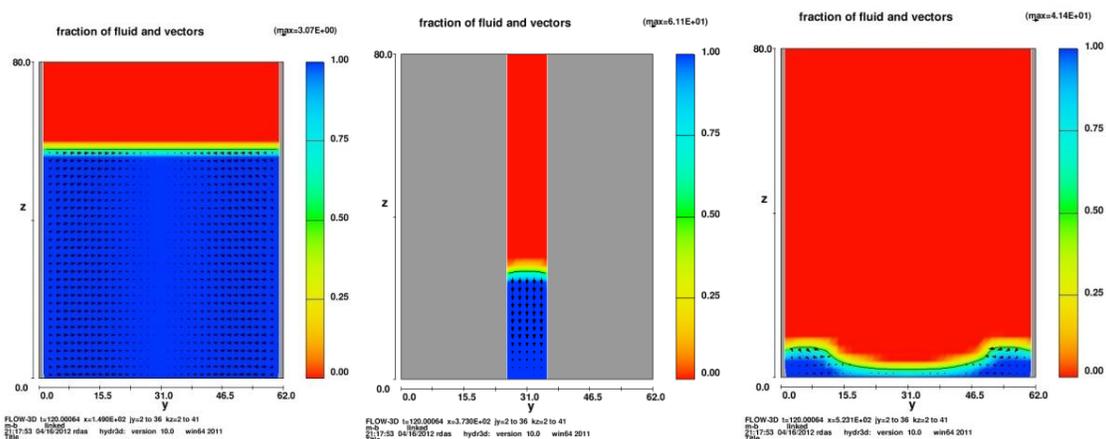
**Figura 18. Corte x-z comportamiento del número de Froude a lo largo del modelo**

Se puede observar en la Figura 18 que en el contorno amarillo existe una sección crítica casi al centro de la contracción, la cual en las ecuaciones del capítulo II y las pruebas de laboratorio, no se logró identificar su posición exacta, por ello la importancia de la simulación matemática.



**Figura 19. Imagen 3D que muestra la variación de velocidad, en cm/s.**

En la figura 19 se aprecia en 3D la variación de velocidad en la sección, se observa que en el canal de llegada los valores de velocidad oscilan entre 0.0052 a 0.54 m/s y como al incorporarse el flujo en la zona de contracción, estos varían de 0.54 a 2.68 m/s.



**Figura 20. Corte y-z de los contornos de velocidad a la entrada del canal (izquierda), contracción (centro) y canal de salida (derecha).**

#### 4.3.- Prueba 2 (contracción con rampa de 30 cm de altura).

Para observar el comportamiento para gastos menores al máximo, se decide simular el modelo con rampa dentro de la zona de control (contracción), dicha altura de rampa se elige de 30 cm la cual en prueba de laboratorio nos ha arrojado un valor de 35.9 l/s para mantener un tirante de 56.5 cm.

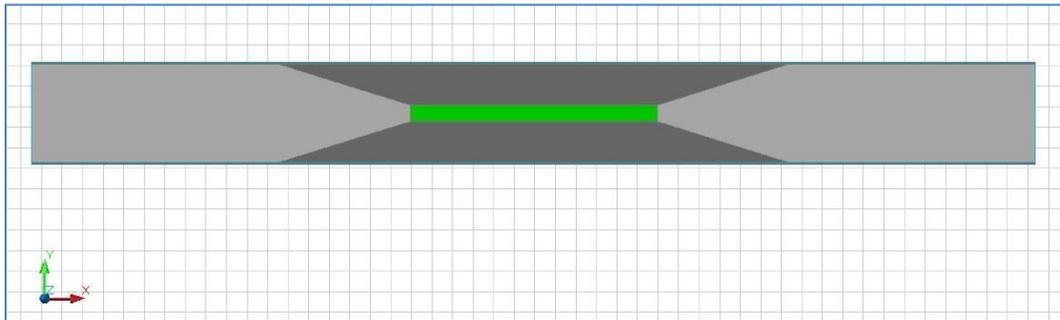


Figura 21. Vista en planta del dominio de simulación.

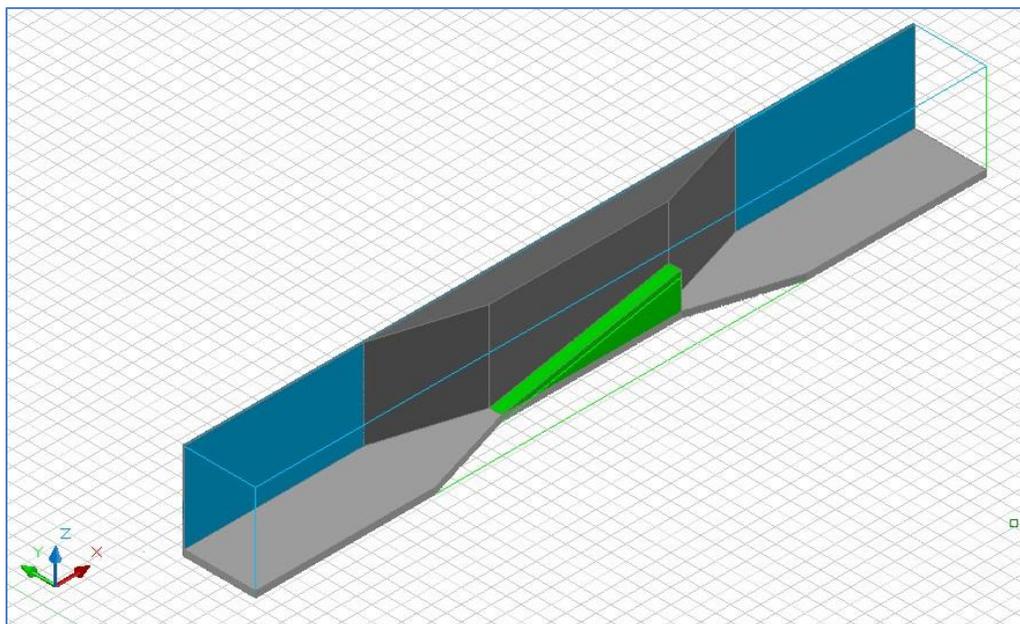
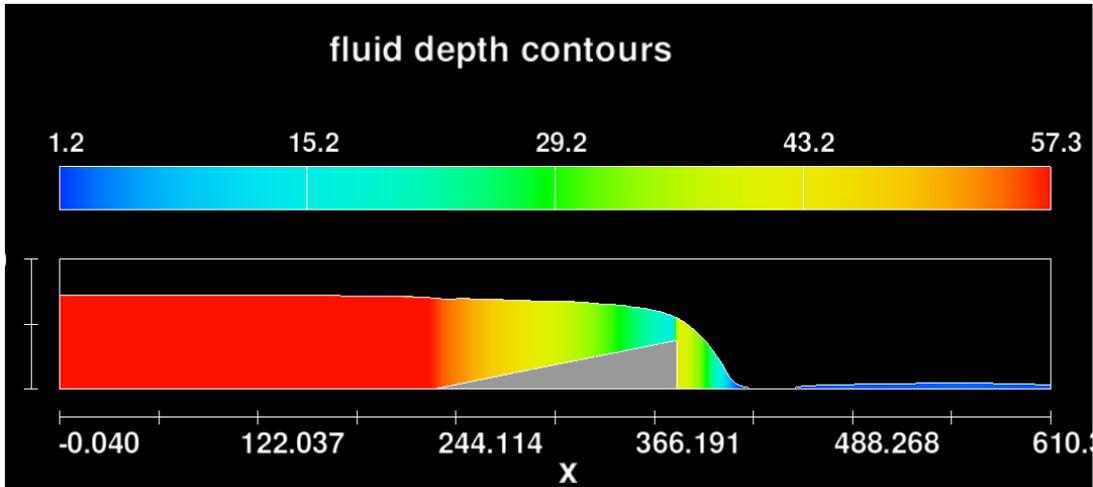


Figura 22. Vista general del dominio de simulación y de la estructura aforadora.

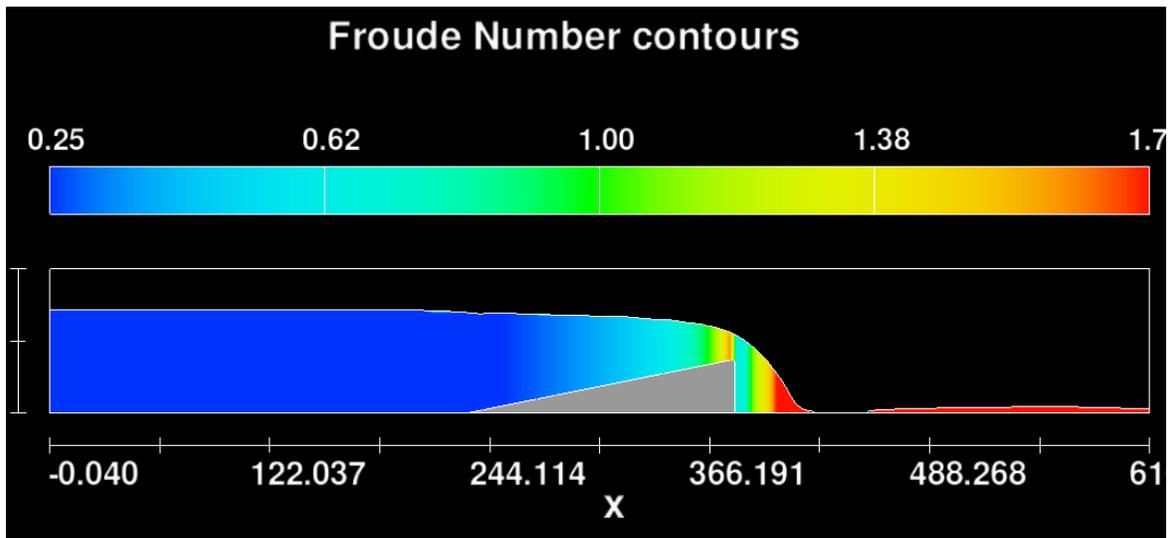
#### 4.3.1.- Resultados de la Prueba 2 (contracción con rampa de 30 cm de altura).

Los resultados para la segunda prueba fueron satisfactorios comportándose de acuerdo a la ecuación Gasto-Tirante para el aforador de garganta larga. Para el caso de la rampa de 30 cm de altura en prueba de laboratorio como se ha mencionado anteriormente, se ha obtenido un gasto de 35.9 l/s manteniendo el tirante de 56.5 cm, para el caso del la simulación, ésta nos ha arrojado con el mismo gasto de prueba un tirante equivalente a 57.23 cm en el canal de llegada.



**Figura 23.** Corte x-z. Tirantes a lo largo del aforador, tirante máximo en el canal de llegada de 57.23 cm.

Se aprecia en la figura 23 el comportamiento de los tirantes a lo largo del modelo, como escala en dirección z existe un valor de 80 cm.



**Figura 24.** Corte x-z comportamiento del número de Froude a lo largo del modelo

Se puede observar en la figura 24 que en el contorno verde existen las condiciones críticas para la rampa con altura de 30 cm, la cual se encuentra muy cercana hacia la salida de la contracción, lo que nos permite apreciar que efectivamente existe al igual que en la simulación sin rampa una sección de control.

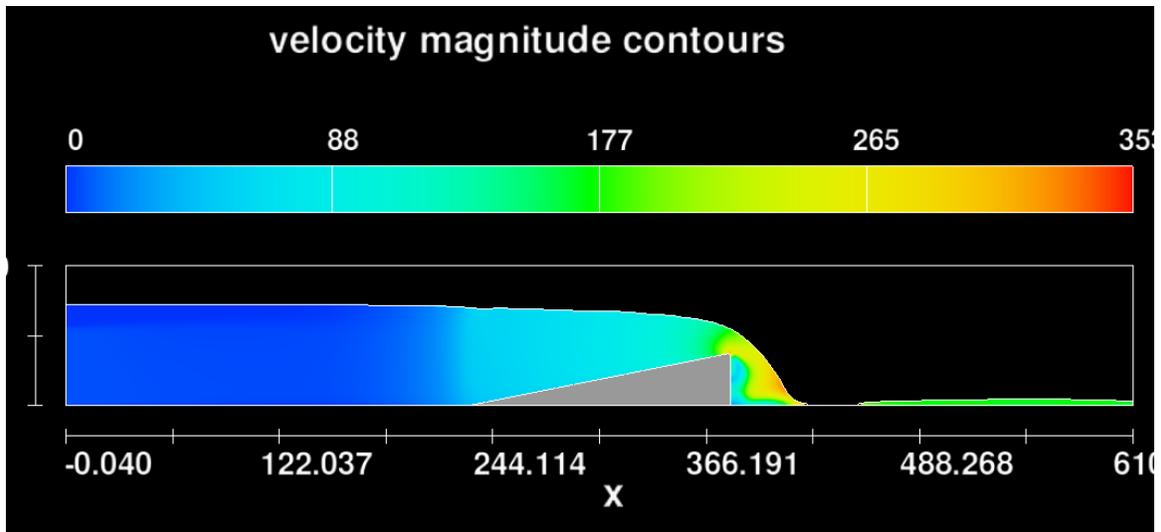


Figura 25. Corte x–z comportamiento del número de la velocidad a lo largo del modelo

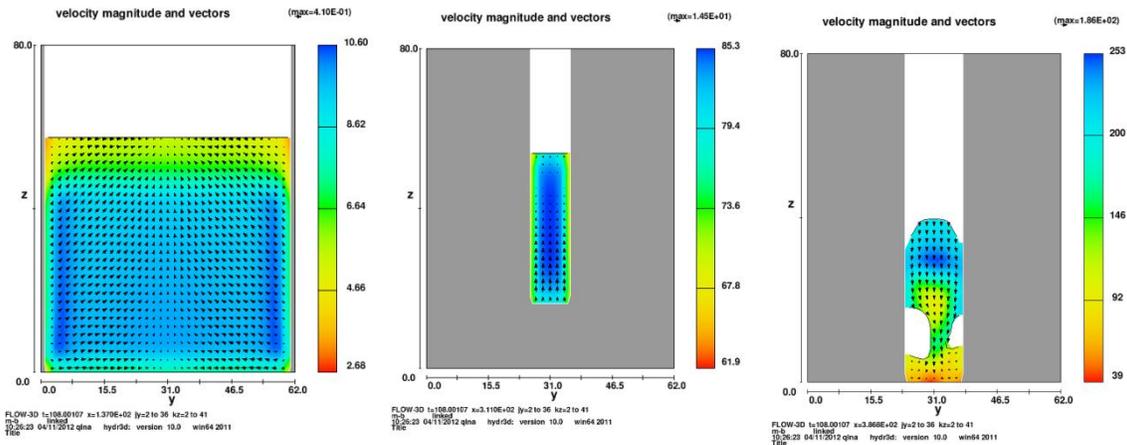


Figura 26. Corte y-z de velocidad canal de llegada (izquierda), contracción (centro) y sección divergente (derecha).

#### 4.4.- Conclusiones y comentarios de simulación de modelos.

Como puede observarse el uso de programas de diseño y simulación de flujo en 3D, permite apreciar más ampliamente el comportamiento hidráulico, cabe señalar que el proceso llevado a cabo para este trabajo de tesis, no contemplaba el uso de análisis de simulación, pero debido a la incertidumbre y complejidad de definición del modelo en laboratorio y la concordancia con lo obtenido en las ecuaciones del diseño hidráulico, se optó por recurrir al programa Flow-3D, con el cual se obtuvieron los siguientes resultados:

- La primera prueba de simulación sin rampa en la contracción nos arroja un tirante de llegada igual 57.86 cm apenas 1.36 cm arriba del calculado previamente de 56.5 cm para un gasto de 73 l/s. Por lo que se cuenta con

un error equivalente a 2.4%, el cual para efectos de prueba se considera como satisfactorio. Cabe mencionar que con ayuda de los resultados de la simulación se pudo observar la presencia y ubicación de la sección crítica, la cual en prueba de laboratorio resultó difícil apreciar y por supuesto ubicar.

- La segunda prueba con rampa en la zona de contracción de 30 cm, ayuda a observar el comportamiento de los gastos menores al máximo en dicha estructura aforadora, ya que uno de los objetivos de este trabajo de tesis consiste en mantener el tirante máximo aun cuando en éste no se llegara a presentar el gasto máximo. Los resultados obtenidos al ingresar el gasto de 30 l/s obtenido en la tercera prueba base No.5 (para rampa de 30 cm de altura), equivale a tirantes menores al esperado de 56.5 cm, por lo que con dicho resultado, ayuda a tomar decisiones de ajuste en las pruebas de laboratorio, tomando como primera decisión corregir la pendiente del canal ya que en días anteriores ésta había sido modificada para otro proyecto de investigación en el Instituto.
- Se repite nuevamente la prueba de simulación para la rampa de 30 cm ya con el nuevo dato de gasto, ahora con valor de 36.9 lps, el cual arroja un valor de tirante de llegada de 57.23 apenas mayor con 0.73 cm del esperado, con un margen de error de 1.29 %, por lo que se considera para efectos de prueba como resultado satisfactorio y, al igual que en la prueba sin rampa se observa el comportamiento en la zona de contracción de la sección crítica, la cual a diferencia de la anterior tiende a buscar la salida de la contracción.

## Capítulo V.

### Resumen de resultados.

Con base en las características físicas e hidráulicas del aforador (Capítulo I), resultados obtenidos en el diseño hidráulico (Capítulo II), pruebas experimentales (Capítulo III) y de simulación matemática (Capítulo IV). Se procede a interpretar de la manera más adecuada los resultados anteriormente señalados y elegir el modelo más eficiente para que permita determinar los valores de gasto manteniendo el nivel máximo de operación aguas arriba de la manera más exacta y correcta posible.

Vale la pena señalar que el proceso que se ha llevado a cabo a lo largo del desarrollo de este proyecto de tesis, ha sido mediante la relación de los diferentes resultados obtenidos en el Capítulo II, III y IV; ya que de alguna forma cada resultado tuvo que ver entre sí, para que a su vez se lograra solucionar problemas e incertidumbres que se presentaron.

#### 5.1.- Agrupación de resultados.

Uno de los primeros trabajos en este proyecto en estudio fue sin duda el establecer las ecuaciones con las cuales se pudieran obtener los resultados adecuados, así como también la determinación de las dimensiones físicas del modelo para experimentación.

Para la construcción de este primer modelo fue necesario el uso de la ecuación (9) obtenida en el capítulo anterior, para el cual se propuso un gasto máximo de operación ( $Q_{mo}$ ) igual a 73 l/s, el cual generaba un tirante máximo ( $y_{max}$ ) equivalente a 56.5 cm en el canal de llegada, el proceso de cálculo y los resultados se muestran como sigue:

Datos:

$$Q_{mo} = 73 \text{ l/s}; \quad b = 60 \text{ cm}; \quad y_{max} = 56.5 \text{ cm}$$

$$b_{mín} = \frac{Q_{mo}}{g^{1/2} \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \left(y_{máx} + \frac{Q_{mo}^2}{2gb^2y_{máx}^2}\right)^{3/2}}$$

Sustituyendo datos:

$$b_{mín} = \frac{0.073}{(9.81)^{1/2} \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \left(0.565 + \frac{0.073^2}{2(9.81)(0.60)^2(0.565)^2}\right)^{3/2}}$$

$$b_{\min} = 0.10 \text{ m}$$

Del mismo Capítulo II, se llega a la ecuación general (38) para la obtención del gasto en la zona de estrangulamiento como se muestra a continuación:

$$Q_i = \sqrt{g} \left( \frac{y_1 - w}{1.5 + \frac{\theta}{2}} \right)^{3/2} b_{\min}$$

Donde:

$g$  es la aceleración de la gravedad, en  $\text{m/s}^2$

$y_1$  es el tirante o nivel máximo en el canal de llegada, en m

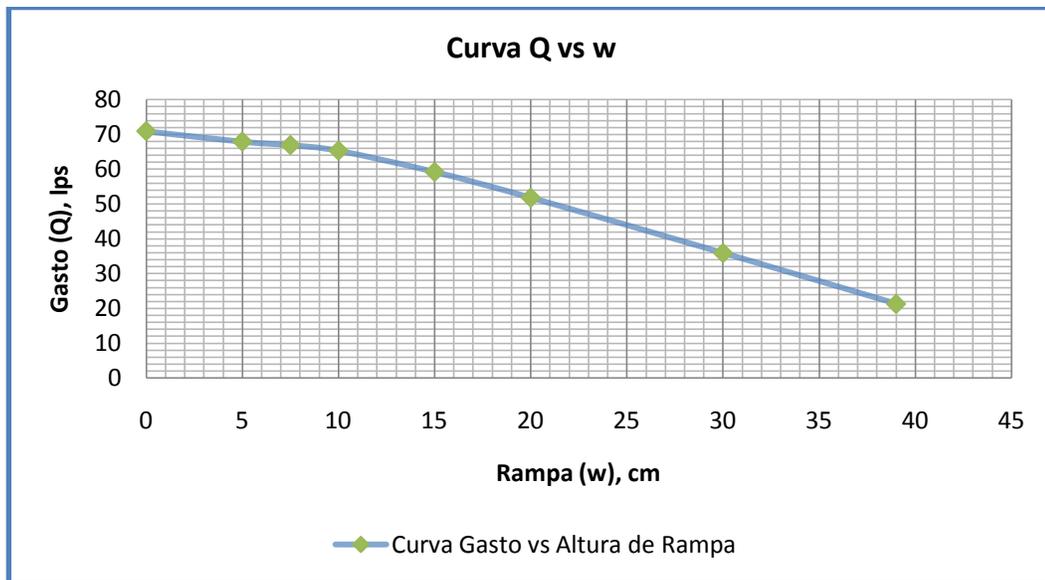
$w$  es la sobreelevación de la plantilla (rampa) en la zona de estrangulamiento o control, en m.

$\theta$  es el coeficiente de pérdida

$b_{\min}$  es el ancho mínimo de la zona de estrangulamiento, en m.

$Q$  es el gasto que circula por la estructura, en  $\text{m}^3/\text{s}$

Con los datos obtenidos en las pruebas de laboratorio (Capítulo III), se define el valor de  $\theta$ .



**Gráfica 4. Curva gasto (Q) vs Elevación (w) de rampa de cuarta prueba base**

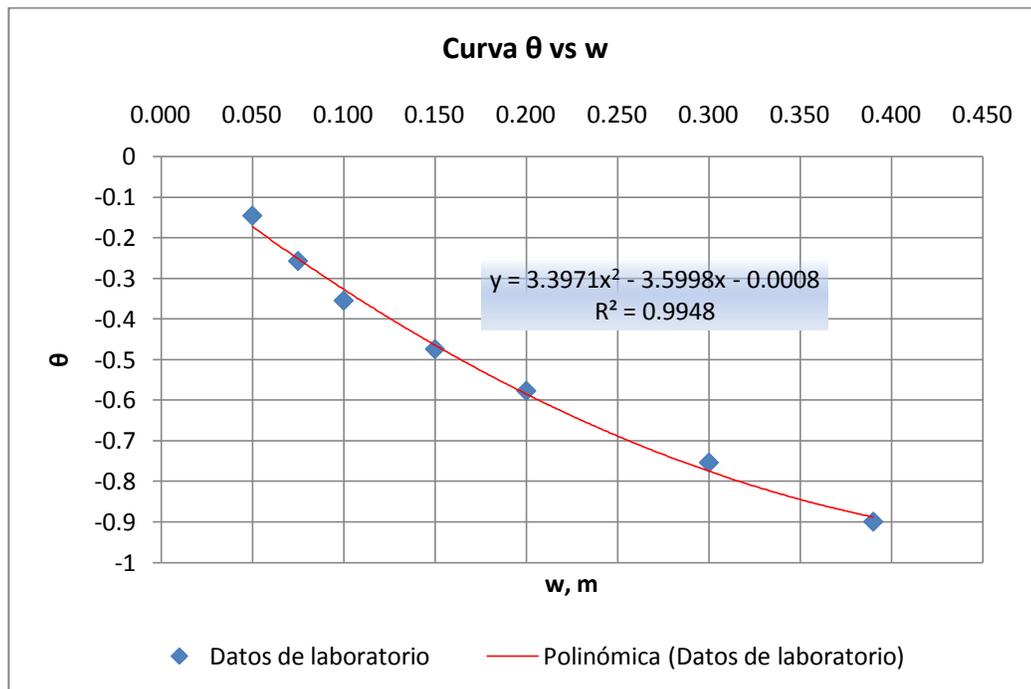
Tabulando resultados y despejando  $\theta$  de (37)

| w     | Q <sub>medidor</sub> | y     | g <sup>(1/2)</sup> | (y-w) <sup>(3/2)</sup> | $\theta$ | $(1.5+(\theta/2))^{1.5}$ | q                 | b <sub>min</sub> | Q                 |         |
|-------|----------------------|-------|--------------------|------------------------|----------|--------------------------|-------------------|------------------|-------------------|---------|
| (m)   | lps                  | m     | m/s <sup>2</sup>   | m                      |          |                          | m <sup>2</sup> /s | m                | m <sup>3</sup> /s | lps     |
| 0.050 | 67.300               | 0.565 | 3.132              | 0.370                  | -0.1458  | 1.704832081              | 0.6790            | 0.1              | 0.06789906        | 67.8991 |
| 0.075 | 66.900               | 0.565 | 3.132              | 0.343                  | -0.2574  | 1.605826846              | 0.6690            | 0.1              | 0.06690058        | 66.9006 |
| 0.100 | 66.300               | 0.565 | 3.132              | 0.317                  | -0.355   | 1.520875                 | 0.6530            | 0.1              | 0.06530109        | 65.3011 |
| 0.150 | 59.000               | 0.565 | 3.132              | 0.267                  | -0.4744  | 1.419063599              | 0.5901            | 0.1              | 0.05900717        | 59.0072 |
| 0.200 | 51.800               | 0.565 | 3.132              | 0.221                  | -0.5772  | 1.333310668              | 0.5180            | 0.1              | 0.05180151        | 51.8015 |
| 0.300 | 35.900               | 0.565 | 3.132              | 0.136                  | -0.7539  | 1.190141607              | 0.3590            | 0.1              | 0.03590085        | 35.9008 |
| 0.390 | 21.300               | 0.565 | 3.132              | 0.073                  | -0.8995  | 1.076352545              | 0.2130            | 0.1              | 0.02130282        | 21.3028 |

**Tabla 12. Resultados de la ecuación (37)**

Se puede observar que para cada elevación de la rampa, le corresponde un gasto dado, de la misma forma que para el valor de  $\theta$ , el cual es variable y cumple la relación  $-1 < \theta \leq 0$ . Se requiere un valor diferente de  $\theta$  para satisfacer los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio.

Debido a que el valor de  $\theta$  no es constante, es necesario ajustar los resultados a una curva e incorporar la ecuación de comportamiento a la ecuación (37) como se muestra a continuación.



**Gráfica 5. Curva de variación  $\theta$  vs w y línea de tendencia polinómica.**

Se observa que la línea de tendencia que mayor ajusta a los resultados es de tipo polinómica con la siguiente ecuación cuadrática.

$$\theta = 3.3971w^2 - 3.5998w - 0.0008 \quad \dots(39)$$

Asignando (39) en (40) tenemos

$$Q = g^{1/2} \left( \frac{y_1 - w}{1.5 + \frac{3.3971w^2 - 3.5998w - 0.0008}{2}} \right)^{3/2} b_{min} \quad \dots(40)$$

Y asignando valores a la ecuación tenemos

|               |              |                  |
|---------------|--------------|------------------|
| <b>g =</b>    | <b>9.81</b>  | m/s <sup>2</sup> |
| <b>y =</b>    | <b>0.565</b> | m                |
| <b>bmin =</b> | <b>0.1</b>   | m                |

| w     | g <sup>(1/2)</sup>                   | (y-w) <sup>(3/2)</sup> | θ       | (1.5+(θ/2)) <sup>(3/2)</sup> | q                 | Q                 |       |
|-------|--------------------------------------|------------------------|---------|------------------------------|-------------------|-------------------|-------|
| m     | (m/s <sup>2</sup> ) <sup>(1/2)</sup> | (m) <sup>(1/2)</sup>   |         |                              | m <sup>2</sup> /s | m <sup>3</sup> /s | lps   |
| 0     | 3.13                                 | 0.4247                 | 0.0008  | 1.8379                       | 0.724             | 0.07238           | 72.38 |
| 0.01  | 3.13                                 | 0.4135                 | -0.0349 | 1.8052                       | 0.717             | 0.07174           | 71.74 |
| 0.012 | 3.13                                 | 0.4112                 | -0.0419 | 1.7988                       | 0.716             | 0.07161           | 71.61 |
| 0.014 | 3.13                                 | 0.4090                 | -0.0489 | 1.7924                       | 0.715             | 0.07147           | 71.47 |
| 0.016 | 3.13                                 | 0.4068                 | -0.0559 | 1.7860                       | 0.713             | 0.07134           | 71.34 |
| 0.018 | 3.13                                 | 0.4046                 | -0.0629 | 1.7796                       | 0.712             | 0.07120           | 71.20 |
| 0.02  | 3.13                                 | 0.4023                 | -0.0698 | 1.7733                       | 0.711             | 0.07106           | 71.06 |
| 0.022 | 3.13                                 | 0.4001                 | -0.0768 | 1.7671                       | 0.709             | 0.07092           | 70.92 |
| 0.024 | 3.13                                 | 0.3979                 | -0.0836 | 1.7608                       | 0.708             | 0.07078           | 70.78 |
| 0.026 | 3.13                                 | 0.3957                 | -0.0905 | 1.7546                       | 0.706             | 0.07064           | 70.64 |
| 0.028 | 3.13                                 | 0.3935                 | -0.0973 | 1.7484                       | 0.705             | 0.07049           | 70.49 |
| 0.03  | 3.13                                 | 0.3913                 | -0.1041 | 1.7423                       | 0.703             | 0.07035           | 70.35 |
| 0.032 | 3.13                                 | 0.3891                 | -0.1109 | 1.7362                       | 0.702             | 0.07020           | 70.20 |
| 0.034 | 3.13                                 | 0.3869                 | -0.1177 | 1.7301                       | 0.7               | 0.07005           | 70.05 |
| 0.036 | 3.13                                 | 0.3848                 | -0.1244 | 1.7241                       | 0.699             | 0.06990           | 69.90 |
| 0.038 | 3.13                                 | 0.3826                 | -0.1311 | 1.7180                       | 0.697             | 0.06975           | 69.75 |
| 0.04  | 3.13                                 | 0.3804                 | -0.1378 | 1.7120                       | 0.696             | 0.06959           | 69.59 |
| 0.042 | 3.13                                 | 0.3782                 | -0.1444 | 1.7061                       | 0.694             | 0.06944           | 69.44 |
| 0.044 | 3.13                                 | 0.3761                 | -0.1510 | 1.7002                       | 0.693             | 0.06928           | 69.28 |
| 0.046 | 3.13                                 | 0.3739                 | -0.1576 | 1.6943                       | 0.691             | 0.06912           | 69.12 |
| 0.048 | 3.13                                 | 0.3717                 | -0.1642 | 1.6884                       | 0.69              | 0.06896           | 68.96 |
| 0.05  | 3.13                                 | 0.3696                 | -0.1707 | 1.6826                       | 0.688             | 0.06880           | 68.80 |
| 0.075 | 3.13                                 | 0.3430                 | -0.2501 | 1.6123                       | 0.666             | 0.06663           | 66.63 |
| 0.1   | 3.13                                 | 0.3171                 | -0.3252 | 1.5466                       | 0.642             | 0.06421           | 64.21 |
| 0.15  | 3.13                                 | 0.2673                 | -0.4627 | 1.4289                       | 0.586             | 0.05860           | 58.60 |
| 0.2   | 3.13                                 | 0.2205                 | -0.5833 | 1.3283                       | 0.52              | 0.05200           | 52.00 |
| 0.3   | 3.13                                 | 0.1364                 | -0.7734 | 1.1747                       | 0.364             | 0.03637           | 36.37 |
| 0.39  | 3.13                                 | 0.0732                 | -0.8864 | 1.0864                       | 0.211             | 0.02111           | 21.11 |

**Tabla 13. Resultado ecuación (39)**

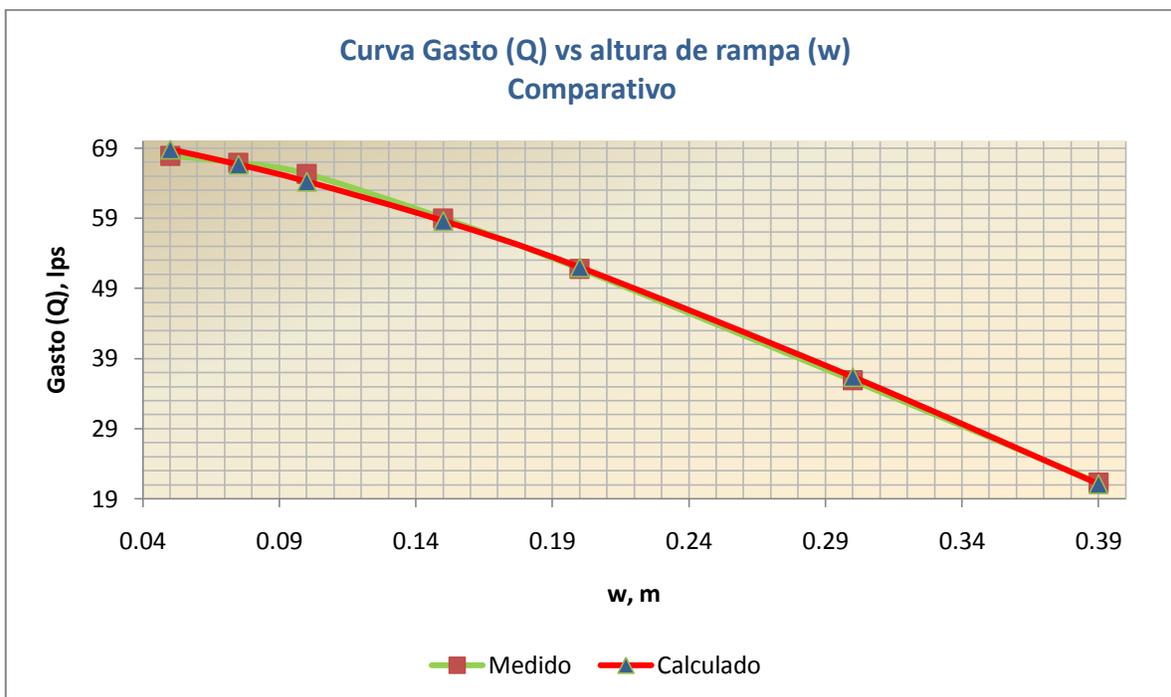
Se puede apreciar que para valores de w menores a 1 cm los resultados se encuentran fuera de las condiciones de  $-1 < \theta \leq 0$ , ya que existen valores mayores a 0. Después de analizar dicho el error, se llegó a la conclusión de que debido al espesor de 6 mm de la hoja de acrílico, y que al momento de instalarla como rampa en la zona de contracción, ésta pudo haber provocado el desajuste

para elevaciones de compuerta mayores a 1 cm, por lo que se establece que la ecuación (39) es funcional siempre y cuando  $\theta \leq 0$ .

Comparando los resultados de la ecuación (39) y los obtenidos en laboratorio se tiene:

| <b>w</b> | <b>Q<sub>real</sub></b> | <b>Q<sub>calculado</sub></b> | <b>error</b> |
|----------|-------------------------|------------------------------|--------------|
| <b>m</b> | <b>lps</b>              | <b>lps</b>                   | <b>%</b>     |
| 0.05     | 67.90                   | 68.797                       | 1.32         |
| 0.08     | 66.90                   | 66.634                       | -0.40        |
| 0.10     | 65.30                   | 64.213                       | -1.66        |
| 0.15     | 59.00                   | 58.601                       | -0.68        |
| 0.20     | 51.80                   | 51.997                       | 0.38         |
| 0.30     | 35.90                   | 36.374                       | 1.32         |
| 0.39     | 21.30                   | 21.106                       | -0.91        |

**Tabla 14. Comparativa de resultado de gastos medido contra gasto calculado.**

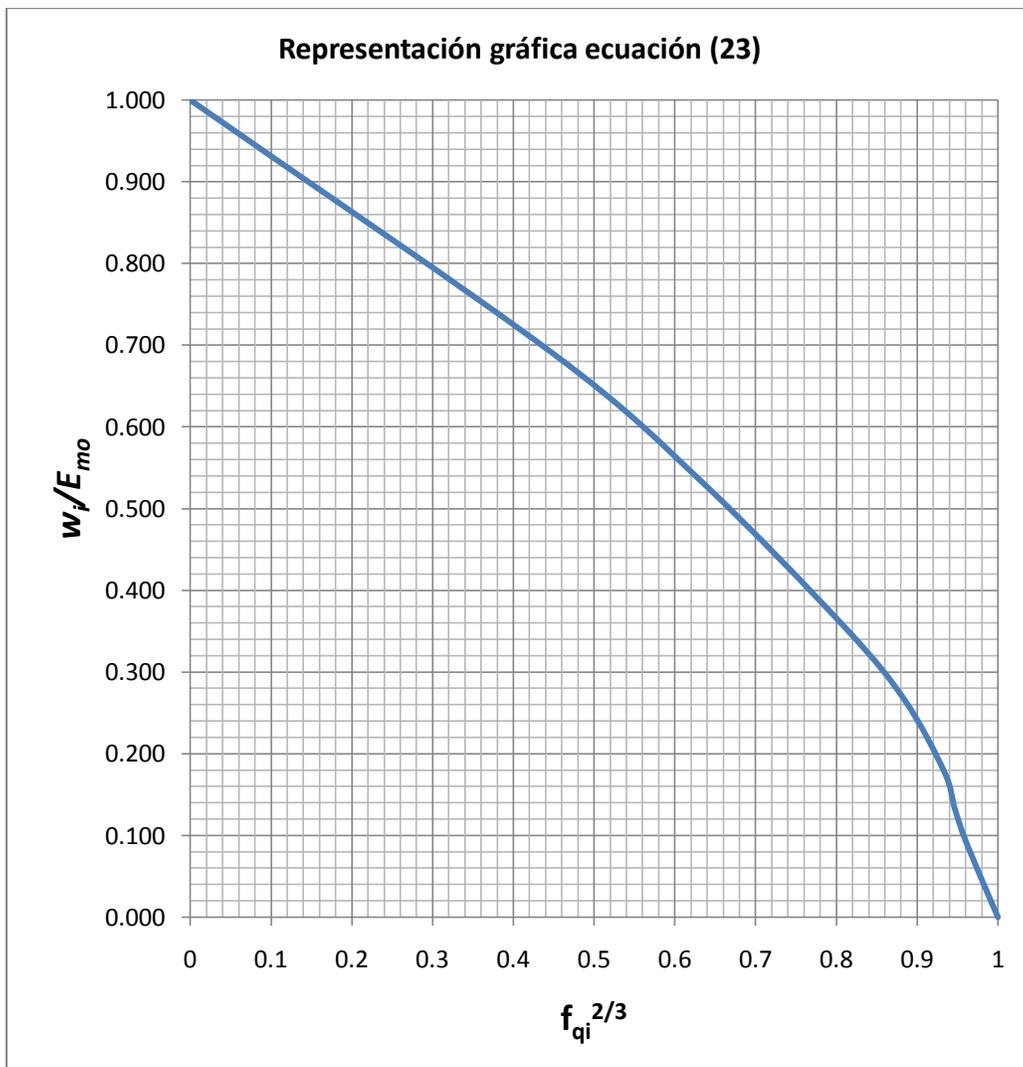


**Grafica 6. Comparativa de gastos medidos vs calculados.**

Se puede observar que los errores entre los gastos de laboratorio y los calculados varían entre -1.66 a 1.32, lo que podría interpretarse como menor a 3%, por lo que la ecuación y resultados se consideran correctos.

Entonces aplicando la ecuación (23) tenemos:

| $w_i$<br>cm | $E_{mo}$<br>cm | $w_i/E_{mo}$<br>adim. | $Q_{mo}$<br>l/s | $Q_i$<br>l/s | $f_{qi}$<br>adim. | $f_{qi}^{2/3}$<br>adim. |
|-------------|----------------|-----------------------|-----------------|--------------|-------------------|-------------------------|
| 0.000       | 56.500         | 0.000                 | 70.900          | 70.900       | 1.000             | 1.000                   |
| 5.000       | 56.500         | 0.088                 | 70.900          | 66.900       | 0.944             | 0.962                   |
| 7.500       | 56.500         | 0.133                 | 70.900          | 65.300       | 0.921             | 0.947                   |
| 10.000      | 56.500         | 0.177                 | 70.900          | 64.000       | 0.903             | 0.934                   |
| 15.000      | 56.500         | 0.265                 | 70.900          | 59.000       | 0.832             | 0.885                   |
| 20.000      | 56.500         | 0.354                 | 70.900          | 51.800       | 0.731             | 0.811                   |
| 30.000      | 56.500         | 0.531                 | 70.900          | 35.900       | 0.506             | 0.635                   |
| 39.000      | 56.500         | 0.690                 | 70.900          | 21.300       | 0.300             | 0.449                   |
| 56.500      | 56.500         | 1.000                 | 70.900          | 0.000        | 0.000             | 0.000                   |



**Grafica 7. Representación gráfica ecuación (23) con datos reales.**

Representando la ecuación (23) del capítulo II, se puede observar el comportamiento esperado, aunque no los mismos resultados. La gráfica anterior nos puede ayudar a determinar el gasto conociendo la altura de la rampa ( $w$ ), el tirante máximo de operación ( $y_{mo} = E_{mo}$ ) y el gasto máximo de operación ( $Q_{mo}$ ) que circule por el canal.

Por ejemplo, para valores de  $w = 0 \text{ cm}$ ,  $E_{mo} = 56.5 \text{ cm}$  y  $Q_{mo} = 70.3 \text{ l/s}$  se tiene:

$$\frac{w_i}{E_{mo}} = \frac{0}{56.5} = 0,$$

$$\text{De la gráfica (7) } (f_{qi})^{2/3} = 1$$

$$1 = \left(\frac{Q_i}{Q_{mo}}\right)^{2/3}; \quad 1 = \left(\frac{Q_i}{70.3}\right)^{2/3}$$

$$Q_i = (1)^{3/2}(70.3)$$

$$Q_i = 70.3 \text{ l/s}$$

O sea, que para una altura de rampa  $w = 0$ , el gasto que circula es el gasto máximo de operación.

Aplicando otro ejemplo, si,  $w = 18 \text{ cm}$ ,  $E_{mo} = 56.5 \text{ cm}$  y  $Q_{mo} = 70.3 \text{ l/s}$  se tiene:

$$\frac{w_i}{E_{mo}} = \frac{18}{56.5} = 0.3186$$

$$\text{De la gráfica (7) anterior } (f_{qi})^{2/3} = 0.84$$

$$\left(\frac{Q_i}{Q_{mo}}\right)^{2/3} = 0.84; \quad \left(\frac{Q_i}{70.3}\right)^{2/3} = 0.84$$

$$Q_i = (0.84)^{3/2}(70.3)$$

$$Q_i = 54.12 \text{ l/s}$$

O sea, que para una altura de rampa  $w = 18$ , el gasto que circula es equivalente a 54.12 l/s.

## Conclusiones

El propósito de este trabajo fue el demostrar primeramente la importancia de llevar a cabo el desarrollo de este tipo de tema de tesis, y es que a pesar de que en la actualidad se trabaja día con día por perfeccionar, modernizar o generar nuevos sistemas de medición, la mayor parte de las veces se deja de lado que dichos sistemas cumplan con detalles simples como: precio económico, fácil instalación, operación y mantenimiento entre otros, lo que hace que se vuelvan complejos y de difícil alcance para los usuarios. Por ello esta propuesta de aforador de garganta larga es una clara opción para un futuro inmediato en la medición y solución a las necesidades que en materia de toma de datos se requiere. Cabe la pena mencionar que el proceso que se ha llevado a cabo para la obtención de resultados, ha dejado una gran enseñanza y las bases para futuros trabajos que de este tipo se puedan generar. La idea era definir una estructura que forzando parte de su sección pudiera generar las condiciones críticas y así mantener una zona de control, el planteamiento de inicio de trabajar con las condiciones máximas de operación tanto en gasto como en tirante limitaban a pensar que, si encaso de presentarse condiciones mínimas al gasto máximo de operación, ésta permitirá obtener los resultados adecuados. El diseño del primero prototipo y la realización de la primera etapa de pruebas ponían más en duda si el trabajo como tal tenía futuro en obtención de resultados, y es que una de las limitantes para el desarrollo del tema era la falta de información sobre estructuras con elevación de plantilla en forma de rampa en la contracción. Fue hasta el segundo prototipo y la segunda serie de pruebas que se pudo identificar que durante la formación del perfil de flujo en la contracción existía la presencia de valores de tirante esperados para la sección crítica manteniendo las condiciones máximas de gasto y tirante en el canal aguas arriba, aunque, de manera visual no podía ubicarse de manera puntual a lo largo de la contracción debido a la turbulencia de flujo.

La ventaja del uso del programa de simulación CFD (Flow3D) confirmó lo que de manera visual no podía definirse, el comportamiento del número de Froude a lo largo del modelo de la primera prueba de simulación (sin rampa) dio muestra de la presencia de la sección crítica al centro de la longitud de contracción, lo que llevó a continuar con el proceso de estudio ahora con diferentes alturas en la zona de control, de la misma manera los resultados obtenidos en las siguientes series de pruebas para 5,10, 7.5, 10, 15, 20 y 30 cm se compararon con una sola prueba de simulación, la cual se eligió de 30 cm, los resultados fueron determinantes para observar que existía una falla considerable en los resultados de las pruebas de laboratorio, la pendiente de canal desajustada fue la razón de la incongruencia,

por lo que se realizó el ajuste necesario y se procedió a realizar la cuarta serie de pruebas, esta vez con mayor grado de cuidado en la preparación y la toma de datos. Los resultados fueron contundentes y la variación con la simulación fue con un porcentaje de error mínimo y suficiente para dar como adecuada la serie de pruebas en laboratorio.

Con dicho datos se procedió a realizar el ajuste de la ecuación previamente obtenida y la cual finalmente nos arrojaba los datos más exactos para la obtención de gasto en función de la altura de rampa.

Sin duda el proceso de la realización de esta tesis deja mucha enseñanza y satisfacción para la continuación de la segunda etapa, ya que debido al corto tiempo para su desarrollo, fue imposible incluir la automatización del sistema de manera electrónica, la cual permitirá que su funcionamiento se realice de manera auto-operante, pero las bases y resultados quedan asentados para la continuación del proyecto de investigación, que dicho sea de paso fueron obtenidos de manera confiable. Para el caso de la segunda etapa, ésta se tendrá que llevar a cabo partiendo de la interacción del aforador con canales de llegada de secciones diferentes a la rectangular, las pruebas en campo serán necesarias así como también de la automatización fluídica, y simultáneamente se recomienda el uso de programas de simulación que permitan visualizar a detalle condiciones que a simple vista son difíciles de apreciar y que permitirán tomar decisiones más adecuadas para elegir la estructura más adecuada en base al canal que se este aforando.

# **Anexos**

# Anexo A

## Hidráulica de los aforadores

### A.1 Introducción

Este anexo tiene por finalidad explicar los principios fundamentales relativos a la evaluación de las características del flujo en los aforadores, ya que son éstas las que determinan las relaciones existentes entre la altura de carga y el caudal y el límite modular en dichos dispositivos de medida. Se da también información suficiente para calibrar, con un grado aceptable de precisión, los aforadores con casi cualquier forma de sección.

### A.2 Continuidad

La Figura 5 muestra un tramo de flujo (un tubo de corriente) limitado por líneas de corriente. Como, por definición, no hay flujo a través de una línea de corriente y suponiendo que el agua es incompresible, el volumen de agua que entra en la unidad de tiempo por la sección 1 debe ser igual al que sale por la sección 2. Para la hipótesis de flujo constante la forma y posición del tubo de corriente no cambia con el tiempo. En estas condiciones el gasto ( $\Delta Q$ ) a través de una pequeña sección es igual al producto de la velocidad media, perpendicular a la sección ( $v$ ), por la superficie de dicha sección ( $\Delta A$ ). Para las secciones transversales 1 y 2 de la Figura 5, resulta:

$$\Delta Q = v_1 \Delta A_1 = v_2 \Delta A_2 \quad (a)$$

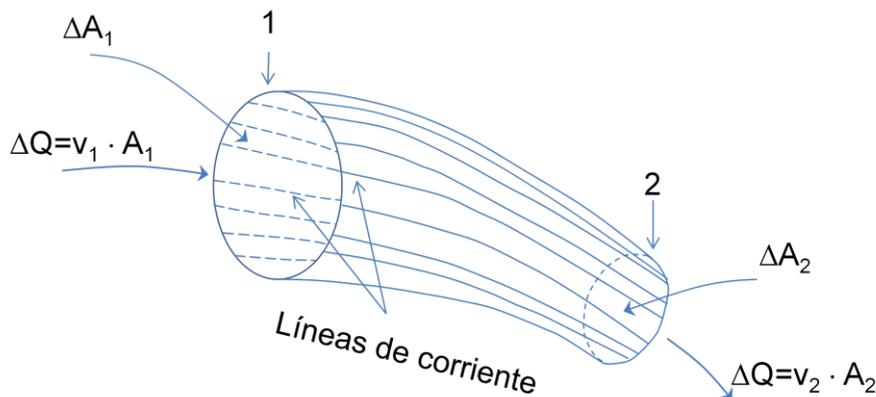


Figura 5

La Ecuación 2 es la ecuación de continuidad, que es válida para el flujo de un fluido incompresible a través de un tubo de corriente. Si se aplica a un tubo de corriente con unos límites fijos bien definidos, como ocurre en un canal abierto con flujo constante (en el que los límites del tubo de corriente son el fondo del canal, los taludes y la superficie del agua, según se muestra en la Figura 6), la ecuación de continuidad es la siguiente:

$$Q = v_1 A_1 = v_c A_c = \text{constante} \quad (3)$$

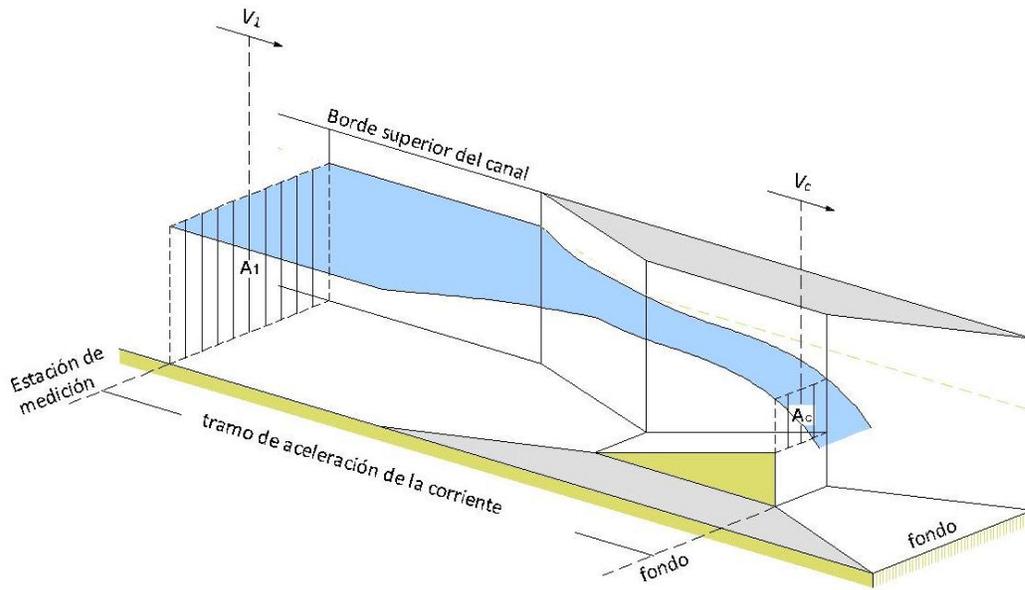


Figura 6. Corte transversal de la corriente por la sección de aforo y por la sección de control.

donde  $v_1$  y  $v_c$  son, respectivamente, las velocidades medias perpendiculares a las secciones transversales  $A_1$  y  $A_c$ .

### Ecuación de Bernoulli

Cada partícula de agua tiene una velocidad real ( $u$ ), una cota ( $Z$ ), una presión ( $P$ ), una temperatura y produce un cierto ruido. Pueden despreciarse estas dos últimas propiedades, que son intercambiables. Las otras se pueden expresar, en forma de energía, del siguiente modo:

$$\frac{1}{2}\rho u^2 = \text{Energía cinética,}$$

$P$  = Energía debida a la presión, por unidad de volumen

$$\rho g Z = \text{Energía potencial, por unidad de volumen}$$

donde:

$\rho$  = Densidad del fluido

$g$  = Aceleración de la gravedad.

dividiendo por  $\rho g$  (se supone constante el valor de la densidad  $\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$  y la aceleración de la gravedad  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ), expresándose entonces por unidad de peso en función de la profundidad del agua o carga (m), es decir:

$$\frac{u^2}{2g} = \text{Carga de velocidad}$$

$\frac{P}{\rho g}$  =Carga de presión

$Z$  = Carga de posición

En la Figura 7 se muestran los tres componentes de la carga de una partícula de agua situada en la posición 1.

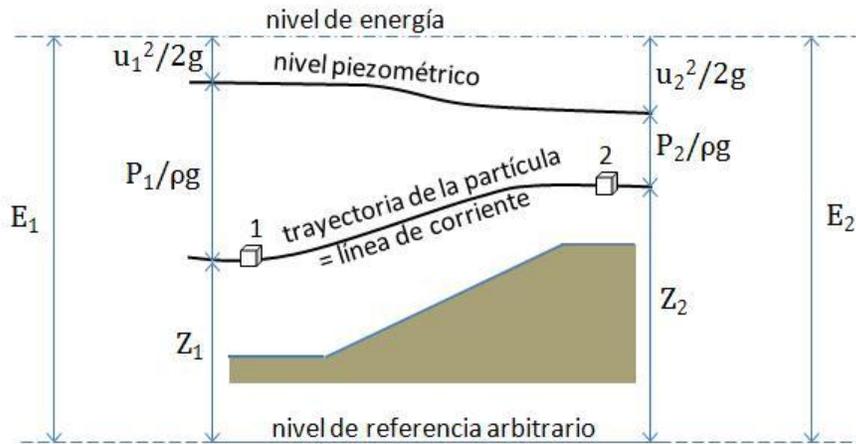


Figura 7. Energía de una partícula de fluido en corriente constante.

Además de las tres cargas mencionadas, se utilizan las expresiones siguientes:

$\frac{P}{\rho g} + Z$  = Carga piezométrica y,

$E$  = Carga de energía total de la partícula de agua

La carga de energía total y la carga por elevación,  $Z$ , están referidas al mismo nivel de comparación (ver la Figura 7) y, por lo tanto, para la partícula de agua en la posición 1, pueden escribirse:

$$E_1 = \frac{P_1}{\rho g} + Z_1 + \frac{u_1^2}{2g} \quad \dots(4)$$

$$E_2 = \frac{P_2}{\rho g} + Z_2 + \frac{u_2^2}{2g} \quad \dots(5)$$

$$\frac{P_1}{\rho g} + Z_1 + \frac{u_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + Z_2 + \frac{u_2^2}{2g} \quad \dots(6)$$

Hay que tener en cuenta que cada partícula de agua fluye con una velocidad diferente, ( $u$ ), en cada posición y puede tener su propia carga de energía. Las Ecuaciones 4 a 6 son expresiones alternativas de la ecuación de Bernoulli y son válidas a lo largo de una línea de corriente.

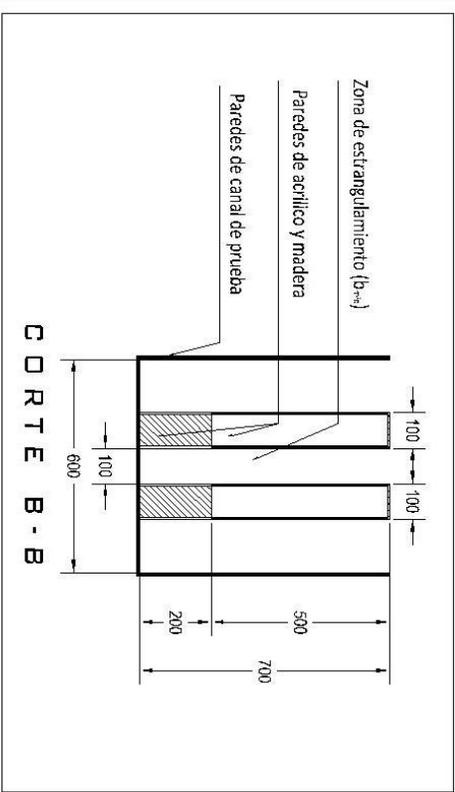
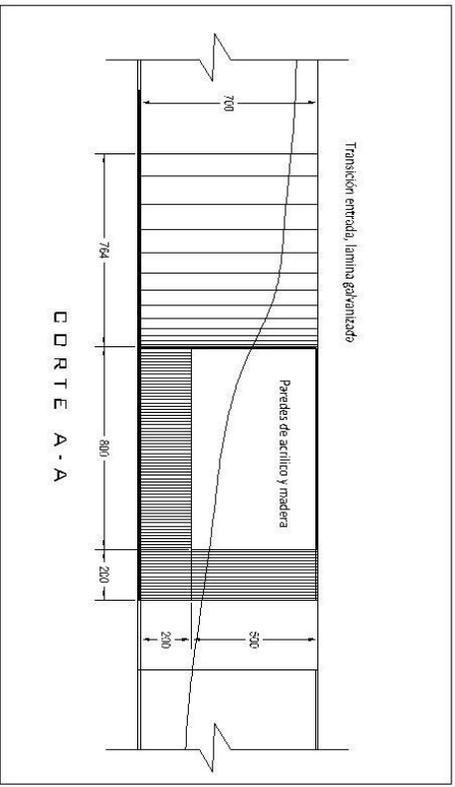
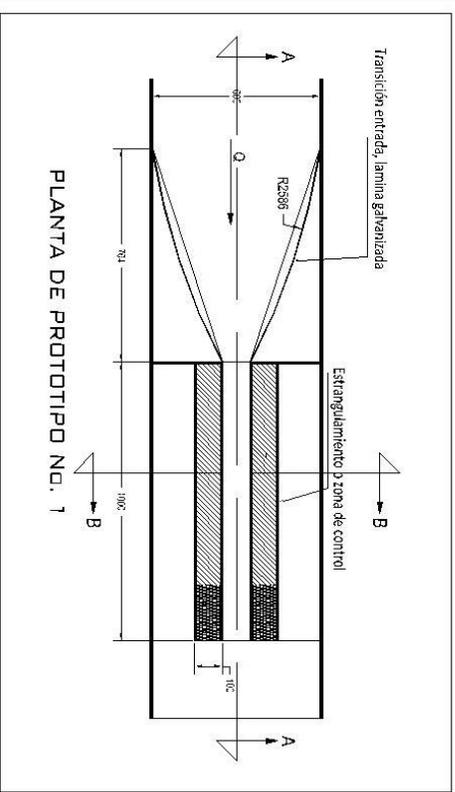
## Anexo B

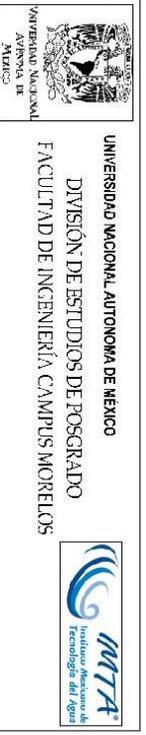
### Simbología y unidades

|               |  |              |
|---------------|--|--------------|
| $Q_{mo}$      | Gasto máximo de operación del canal  | $m^3/s$      |
| $A$           | Área de la sección transversal del canal   | $m^2$        |
| $b$           | Ancho de la sección transversal del canal de aproximación  | $m$          |
| $b_{min}$     | Ancho en la zona de estrangulamiento del aforador  | $m$          |
| $E_i$         | Energía específica para cualquier valor de $i$   | $m$          |
| $E_{i_c}$     | Energía específica para la zona de control o estrangulamiento para las condiciones críticas de $i$ | $m$          |
| $E_{mo}$      | Energía específica disponible de las condiciones máximas de operación                              | $m$          |
| $f_q$         | Relación del gasto menor o igual al máximo de operación entre el máximo de operación               | Adimensional |
| $g$           | Aceleración de la gravedad   | $m/s^2$      |
| $hr$          | Relación de pérdida entre el volumen de control de 1 a 2   | $m$          |
| $i$           | Rango de valor menores o iguales al máximo de operación  | -            |
| $L$           | Longitud de la garganta o zona de control  | $m$          |
| $q$           | Gasto unitario   | $m^2/s$      |
| $q_{max}$     | Gasto unitario en el estrangulamiento máximo del aforador  | $m^2/s$      |
| $q_{mo}$      | Gasto unitario máximo de operación del canal de aproximación                                       | $m^2/s$      |
| $V_1$         | Velocidad en la sección 1 o canal de llegada   | $m/s$        |
| $V_2$         | Velocidad en la sección 2 o de control (crítica)   | $m/s$        |
| $w$           | Altura de rampa (variable)   | $m$          |
| $y_c$         | Tirante o altura crítica   | $m$          |
| $y_{c_{min}}$ | Tirante o altura del agua en la zona de control o reducción de las condiciones críticas            | $m$          |
| $y_{c_{mo}}$  | Tirante o altura crítica de las condiciones máximas de operación                                   | $m$          |
| $y_{max}$     | Tirante o altura máxima del agua en el canal de aproximación                                       | $m$          |
| $\alpha$      | Coefficiente de factorización de ecuaciones  | -            |
| $\beta$       | Coefficiente de factorización de ecuaciones  | -            |
| $\vartheta$   | Coefficiente de pérdida o curva de ajuste de los resultados de prueba                              | -            |
| $\varphi$     | Coefficiente de factorización de ecuaciones  | -            |

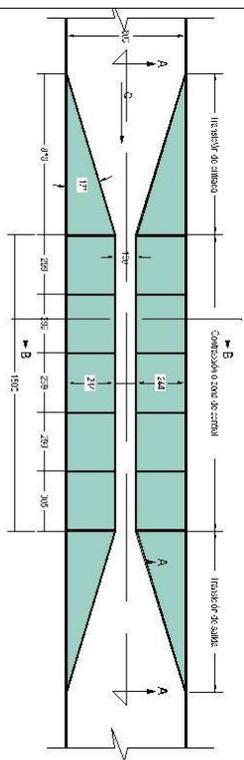
## **Anexo C**

### Planos

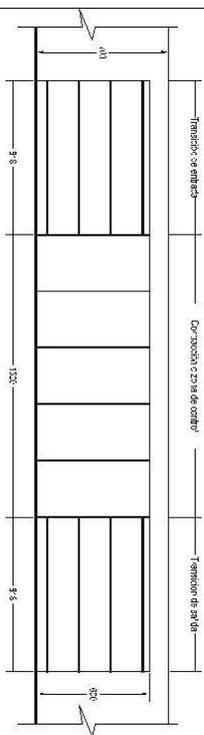


|  |                               |
|--|-------------------------------|
|   |                               |
| <p><b>UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO</b><br/>         DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO<br/>         FACULTAD DE INGENIERÍA CAMPUS MORELOS</p> |                               |
| <p><b>Tema:</b> Diseño de una estructura para el atoro y control de niveles en canales.</p>  |                               |
| <p><b>Plano:</b> PROTOTIPO No. 1</p>   |                               |
| <p><b>Testista:</b> Ing. Antonio Alcantar Garcia</p>   | <p><b>Febrero de 2013</b></p> |
| <p><b>Asesor:</b> Dr. Nahún Hamed García Villanueva</p>  | <p><b>Acot. : mm</b></p>      |

PLANO NO.1

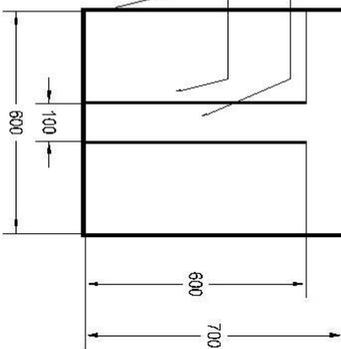


PLANTA DE PROTOTIPO NO. 2



CORTE A-A

Zona de estrangulamiento (b<sub>me</sub>)  
 Paredes de acrílico  
 Paredes de canal de prueba



CORTE B-B



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
 DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
 FACULTAD DE INGENIERÍA CAMPUS MORELOS



Tema:

Diseño de una estructura para el aforo y control de niveles en canales.

Plano:

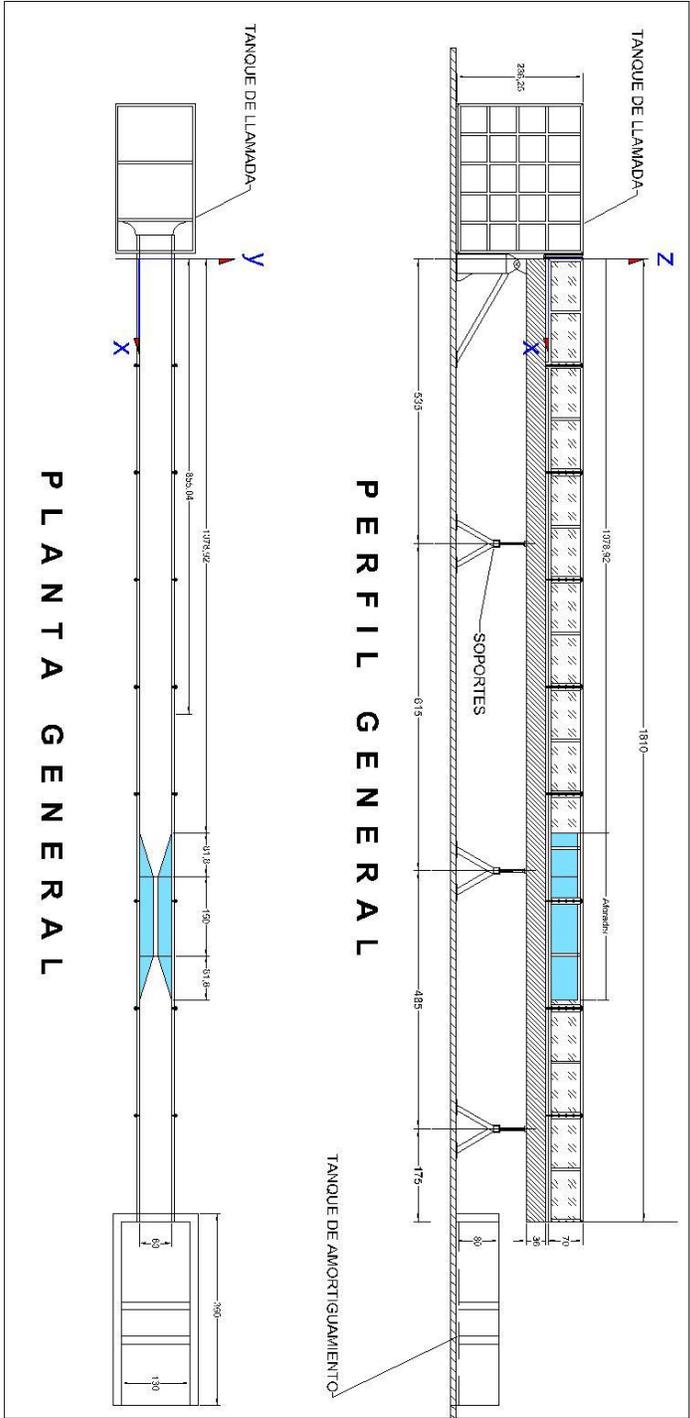
PROTOTIPO No. 2

Testista: Ing. Antonio Alcántar García

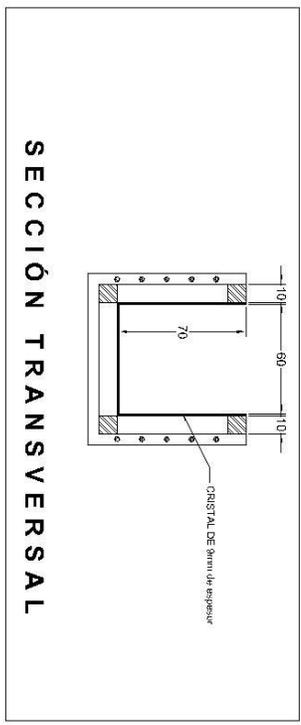
Febrero de 2013

Asesor: Dr. Nahún Hamed García Villanueva

Acot.: mm



PLANO NO. 3



SECCION TRANSVERSAL

|   |                        |
|---|------------------------|
|   |                        |
| <p>UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO<br/>DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO<br/>FACULTAD DE INGENIERÍA CAMPUS<br/>MORELOS</p> |                        |
| <p>Tema: Diseño de una estructura para el aforo y control de niveles en canales.</p>  |                        |
| <p>Plano: UBICACION EN CANAL DE PENDIENTE VARIABLE DEL PROTOTIPO No. 2</p>  |                        |
| <p>Tesisista: Ing. Antonio Alcántar García</p>  | <p>Febrero de 2013</p> |
| <p>Asesor: Dr. Nahúm Hamed García Villanueva</p>  | <p>Acoct. : mm</p>     |

## Bibliografía

**Abad, J. D., Rhoads, B. L., Guneralp, I., García, M. H.,** *Flow structure at different stages in a meander-bend with bendway weirs*, Journal of Hydraulic Engineering, 138 (8): 1052-1053, 2008.

**Abad, J.D., Bombardelli, F.A., Waratuke, A.R. and García, M.H.** *Modeling and alternative analysis for SEPA Station No. 3*. In report "SEPA Station No. 3, Siltation Alleviation Study " from Greeley and Hansen LLC to Metropolitan Water Reclamation District of Greater Chicago. March, 2004.

**Álvarez, R. A.** *Modulo experimental “Canal de pendiente variable” infraestructura para investigación hidráulica*. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, México, 1997.

**Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.** *Aforador de canales con garganta controlada*, Informe final: HC1008.1. SEMARNAT, México, 2010.

**Bos G. Marinus, Reploge A John, y Clemens Albert J.** *Aforadores de caudal para canales abiertos*.-- ILRI publication 38. Wageningen, Países Bajos, 1986.

**CONAGUA,** *Atlas del agua en México 2012*, SEMARNAT, México, 2012.

**Flow Science Inc.,** *Flow-3D V 9.2 User's Manual*. Santa Fe, New México, 2008.

**Groeneveld, J., Sweeney, C., Mannheim, C., Simonsen, C., Fry, S., and Moen, K.** *Comparison of Intake Pressures in Physical and Numerical Models of the Cabinet Gorge Dam Tunnel*, *Waterpower XV*, Copyright HCI Publications, 2007.

**Hirt, C.W. and Nichols, B.D.** *Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries*, Journal of Computational Physics 39, 201. 1981.

**International Organization of Standardization (ISO) 4362** *Liquid flow measurement in open channel – Rectangular, trapezoidal and U – shaped flumes* First edition. Switzerland, 1983.

**Nanía, L.S.** *Metodología numérico-experimental para el análisis de riesgo asociado a la escorrentía pluvial en una red de calles*. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona. 1999.

**Richardson, J.E., and Panchang, V.G.** *Three-dimensional simulation of scour-inducing flow at bridge piers*. J. Hydraulic Eng., vol. 124, no. 5, pp. 530–540, 1998.

**Rodríguez, Dorian y Martínez, Carlos,** *La experimentación en la Hidráulica*, CUC, Colombia, 2009.

**Sotelo Ávila, Gilberto**, *Hidráulica de canales*, UNAM, Facultad de Ingeniería, México, 2002.

**U. S. Department of the Interior Bureau of Reclamation**, *Water Measurement Manual*. Tercera edición. Washington DC, USA, 1997.

**U. S. Department of the Interior Bureau of Reclamation**, *WinFlume Manual*. Primera edición. Denver, Colorado, USA, 2001.

**Waterway Port Coast**. *Ocean Eng.*, vol. 131, no. 1, pp. 14–24, 2005.

**White, W. R., Perkins, J. A. and Harrison, A. J.** *Weirs and Flumes for Flow Measurement*. John Wiley & Sons Ltd. Belfast, Ireland, 1978.