

**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**COLEGIO DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**PROPUESTA PARA LA ELABORACIÓN DEL  
PROTOTIPO DE UN AFORADOR TIPO RBC COMO  
HERRAMIENTA DIDÁCTICA PARA LA  
CAPACITACIÓN EN MEDICIÓN DE CAUDALES  
CON AYUDA DEL SOFTWARE WINFLUME**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE LICENCIATURA EN  
INGENIERÍA QUÍMICA**

Presenta: Sandra Maldonado Reyes

Director de Tesis: M.I. Ángel Silveti Loeza

Codirector de tesis: M.D.R.S. José Gerardo López Ortega

Diciembre 2025

Puebla, Pue.



“Propuesta para la elaboración del prototipo de un aforador tipo RBC como herramienta didáctica para la capacitación en medición de caudales con ayuda del software WinFlume”

A mi familia

Ivonne, Rene, Micaela, Ricardo, Rubén Mary y Ricardo por su apoyo y amor, que día a día me impulsa a ser mejor persona y superarme.

A mis amigos:

Jesús, Karla, Fernando, Izar, Elian, Areli, Jesús Alberto, Odalys y Erick por estar conmigo sin importar las circunstancias, por motivarme y por hacerme reír en los malos momentos

A mis maestros:

Por compartir sus conocimientos, apoyarme y aclararme cada duda que se me presente.

A mis mascotas:

Caesar, Brownie, Lucas, Zoé y Frida, porque en cada desvelada estuvieron a mi lado dándome cariño incondicional.

A mis bandas favoritas:

Twenty One Pilots y BTS, porque durante este proceso su música me inspiró y acompañó durante noches de desvelo.

“Todos somos culpables de lo que somos, pero tenemos un nombre para lo que somos; somos humanos”  
Twenty One Pilots.

## AGRADECIMIENTOS

A mi familia...

A mi mamá Ivonne Reyes Romero ya que desde el momento en el que nací siempre ve por mí, me ha cuidado y educado; por su apoyo incondicional, que a pesar de las diferentes circunstancias y dificultades en que la vida nos sitúa no me abandona y siempre me toma de la mano para impulsarme e inspirarme a ser mejor, que a pesar de la situación en la que ella se encuentre siempre busca darme lo mejor y consentirme en todos mis caprichos, por ser mi ejemplo a seguir gracias... Siempre estaré agradecida contigo.

A mi abuelita Micaela Romero Roldán porque desde que tengo memoria siempre ha visto por mí, educándome y dándome todo lo que está en sus posibilidades, brindándome cariño y apoyo incondicional.

A mi tío Rene Reyes Romero que para mí fue y seguirá siendo como un padre que en todo momento me brindó su cariño y me daba todo lo que podía darme, que a pesar de las dificultades que se presentaban siempre buscaba mi bienestar y que nada me faltará, por ti que siempre estarás conmigo y serás el ángel que me cuida desde el cielo.

A mi abuelo Rubén Reyes Madrid por su apoyo y cariño a lo largo de mi vida y siempre que está en sus posibilidades consentirme.

A mi tío Ricardo Reyes Romero por su cariño incondicional, estar a mi lado siempre que lo necesito dándome su apoyo sin siquiera pedirlo y darme todo lo que está en sus posibilidades.

A mis tíos María Isabel Ramírez Madrid y Ricardo Barrientos Guerrero por su apoyo y cariño incondicional en cada etapa de mi vida.

Jesús Guerrero Galicia por todo el amor y apoyo que me brinda, por estar en los momentos malos y alentarme a ser mejor día a día, porque a pesar de los malos momentos o situaciones de la vida siempre está para mí tratando de darme todo lo mejor e incluso más de lo que está en sus posibilidades.

“Propuesta para la elaboración del prototipo de un aforador tipo RBC como herramienta didáctica para la capacitación en medición de caudales con ayuda del software WinFlume”

A mis amigos...

A Karla Andrea Contreras Rivera por ser mi amistad más leal y sincera durante esta etapa, por su cariño incondicional y por estar conmigo en las buenas y en las malas siempre teniendo un consejo a pesar de la situación.

A Fernando Roberto Ramírez Dávila porque a pesar del tiempo y el distanciamiento sé que cuento con su apoyo y cariño, porque sin importar la situación, el día o la hora siempre está ahí para mí.

A Izar Israel López Castillo por su amistad y cariño incondicional, porque a pesar de la distancia y el tiempo sus consejos y cariños están ahí, ya que sin importar la situación siempre tiene el consejo correcto para mí.

A Elian Palacios Roldán por su cariño y amistad a lo largo de este tiempo, porque sé que sin importar la situación siempre está ahí para mí.

A Areli Yazmín Castillo Ortigoza por ser de mis primeras amistades en este camino y que a lo largo de los años esta para mí dándome su apoyo y cariño, sin importar la situación ofreciéndome su ayuda.

A Jesús Alberto Cadena Hernández por su cariño y apoyo incondicional, ya que sin pensarlo se convirtió en una de mis amistades más bonitas en esta etapa, teniendo un consejo sin importar la situación.

A Odalys Betancourt Negrete ya que sé que siempre puedo contar con ella y su cariño incondicional que a pesar de la distancia siempre me demuestra.

A Erick Josué Sandoval Cortés por siempre tener un chiste para hacerme reír, por el cariño y amistad incondicional que me brinda.

A Fátima Aguilar Lastra ya que sin importar el tiempo que pase ha sido mi amistad más sincera a lo largo de los años, por el cariño sincero que me brinda y por sus consejos que siempre son los correctos.

A Dulce María Salazar González porque desde la prepa ha estado para mí y sin importar el tiempo y la distancia sé que puedo contar con ella.

Y a los demás amigos que forme a lo largo de la etapa universitaria que sé que a pesar de no hablar mucho el cariño y apoyo mutuo siempre estará ahí.

A mis maestros...

M.D.R.S José Gerardo López Ortega porque desde el primer día de mi etapa universitaria estuvo ahí brindándome el apoyo y orientación que necesitaba, por no solo ser mi maestro, sino que con el tiempo ser mi amigo.

M.I. Ángel Silveti Loeza, por orientarme y hacer que mejoré y crea más en mi en cada consejo que me dio a lo largo de mi formación, por su apoyo y ahora amistad que me ha brindado.

M.I.Q. Magin Idelfonso Torreblanca Ramírez por su apoyo y amistad a lo largo de esta etapa, por cada consejo que en su momento me dio.

M.I.Q. José Núñez Flores por cada consejo académico y personal a lo largo de mi formación logrando que me estableciera metas claras.

"Si creemos en las posibilidades y la esperanza, incluso cuando suceda lo inesperado, no nos perderemos, sino que descubriremos uno nuevo"

Kim NamJoon

## Contenido

1. Introducción.....	1
2. Planteamiento del problema.....	3
3. Justificación.....	6
4. Objetivo general .....	8
5. Objetivos específicos. ....	8
6. Hipótesis.....	8
7. Marco teorico.....	9
7.1 Caudal .....	9
Caudal Volumétrico .....	9
Cálculo del caudal volumétrico.....	9
Métodos de medición de caudal en canales abiertos.....	9
7.2 Aforadores de garganta larga o RBC.....	15
Origen y desarrollo .....	15
Descripción técnica y principios de funcionamiento .....	16
Funcionamiento.....	21
Calibración analítica .....	29
Ventajas del aforador RBC.....	33
7.3 Características hidráulicas.....	34
7.4 Software WinFlume .....	36
Origen y Desarrollo .....	36
Funciones y alcance .....	37
Diseño de Aforadores RBC .....	39
7.5 Software HCanales.....	40
Origen y desarrollo.....	40

Funciones y alcance .....	41
7.6 Instrumentación y/o sensores adicionales al prototipo .....	43
Sensores ultrasónicos .....	44
Sensores de presión .....	46
Microcontroladores.....	48
7.7 Normas mexicanas .....	49
NMX-AA-179-SCFI-2018.....	49
7.8 Aplicaciones en México del software WinFlume y aforador RBC.....	50
8. Metodología .....	52
8.1 Determinación de características geométricas e hidráulicas de canal rectangular mediante el software HCanales y ecuaciones propuestas.....	52
8.2. Calculo para el dimensionamiento del aforador RCB .....	61
8.3 Dimensionamiento del aforador en software WinFlume.....	66
8.4. Diseño de la propuesta del prototipo en el software “AutoCAD” en vista 2D y 3D.....	70
9. Resultados .....	71
10. Discusión.....	84
11. Conclusiones.....	86
12. Bibliografía .....	88

## Índice de anexos

### índice de figuras

FIGURA 1. PROCESO DE REALIZACIÓN DE AFORO VOLUMÉTRICO (SIGUAYRO ET AL. 2014) .....	10
FIGURA 2. VERTEDERO (MEJÍA, 2023).....	11
FIGURA 3. ESTRUCTURA DE CANAL PARSHALL, DESINSTALADA (HEYRANI ET AL. 2022). .....	11
FIGURA 4. CANAL PARSHALL INSTALADO (HEYRANI ET AL. 2022). .....	12
FIGURA 5. VISTA PLANA Y PERFIL DEL CANAL CUTTHROAT (TEMEEPATTANAPONGSA, 2013). .....	13
FIGURA 6. VISTA EN PLANTA Y ALZADA FRONTAL DE CANAL H (SIBALE ET AL., 2023).....	14
FIGURA 7. VISTA EN PLANTA Y PERFIL CANAL RBC (CLEMMENS ET AL., 2001).....	15
FIGURA 8. GEOMETRÍA TRANSVERSAL DE LOS AFORADORES. (MARTÍNEZ, P. Y CASTILLO, J. 1992).....	16
FIGURA 9. DESCRIPCIÓN GRÁFICA DEL AFORADOR RBC (TORRES, J. Y CRUZ, R. 1993) .....	17
FIGURA 10. SECCIÓN TÍPICA Y PERFIL DE AFORADOR RBC Y DIMENSIONES (BUSTAMANTE, 2021).....	19
FIGURA 11. ALTERNATIVAS DE TERMINACIÓN EN LA RAMPA DE SALIDA (MARTÍNEZ Y CASTILLO, 1992) .....	26
FIGURA 12. UBICACIÓN DEL PUNTO DE MEDICIÓN DEL TIRANTE (MARTÍNEZ Y CASTILLO, 1992) .....	27
FIGURA 13. PANTALLA GRÁFICA DEL SOFTWARE WINFLUME (BUREAU OF RECLAMATION, 2020). .....	38
FIGURA 14. PANTALLA PRINCIPAL SOFTWARE HCANALES (VILLÓN, 2013)..	42
FIGURA 15. OPCIONES EN LA BARRA DE OPCIONES DEPENDIENDO DE LA GEOMETRÍA DEL CANAL (VILLÓN, 2013). .....	42

FIGURA 16. FUNCIONAMIENTO DE SENSORES DE OPERACIÓN (ROSERO Y SIMBAÑA, 2008).....	44
FIGURA 17. MÉTODO OPUESTO DE OPERACIÓN EN SENSORES ULTRASÓNICOS (ROSERO Y SIMBAÑA, 2008).....	45
FIGURA 18. MÉTODO DIFUSO DE OPERACIÓN EN SENSORES ULTRASÓNICOS (ROSERO Y SIMBAÑA, 2008).....	45
FIGURA 19. SENSOR ULTRASÓNICO HC SR04 (CORAPI ET AL., 2021).....	46
FIGURA 20. SENSOR DE PRESIÓN MPX5500DP (CORAPI ET AL., 2021).....	47
FIGURA 21. PLACA ARDUINO MEGA 2560 (CORAPI ET AL., 2021). ....	49
FIGURA 22. REPRESENTACIÓN CANAL RECTANGULAR (VILLÓN, 2013).....	53
FIGURA 23. ITERACIÓN DE CAUDAL MÍNIMO MEDIANTE EXCEL (ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE EXCEL HCANALES, 2025). ....	55
FIGURA 24. ITERACIÓN DE CAUDAL MÁXIMO MEDIANTE EXCEL (ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE EXCEL, 2025). ....	58
FIGURA 25. SELECCIÓN DE CÁLCULO DE TIRANTE NORMAL, EN GEOMETRÍA RECTANGULAR (ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DEL SOFTWARE HCANALES, 2025).....	60
FIGURA 26. COLOCACIÓN DE DATOS PARA CÁLCULO DE TIRANTE NORMAL EN CAUDAL MÍNIMO EN SOFTWARE HCANALES (ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DEL SOFTWARE HCANALES, 2025).....	60
FIGURA 27.COLOCACIÓN DE DATOS PARA CÁLCULO DE TIRANTE NORMAL EN CAUDAL MÁXIMO EN SOFTWARE HCANALES (ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DEL SOFTWARE HCANALES, 2025).....	61
FIGURA 28. TABLA PARA EL DISEÑO SIMPLIFICADO DEL AFORADOR RBC (USBR, 2001).....	61
FIGURA 29. GRÁFICO DE AFORADOR RBC (USBR,2001).....	62
FIGURA 30. ITERACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DEL ANCHO DE GARGANTA (ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE EXCEL, 2025).....	63
FIGURA 31. CRITERIO DE NÚMERO DE FROUDE E INCERTIDUMBRE EN EL SOFTWARE WINFLUME. (ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DEL SOFTWARE WINFLUME, 2025).....	67

FIGURA 32. CRITERIO DE TIRANTES AGUAS ABAJO ACEPTABLES (ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DEL SOFTWARE WINFLUME, 2025).	67
FIGURA 33. DIMENSIONES DEL CANAL EN VISTA FRONTAL (ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DEL SOFTWARE WINFLUME, 2025).....	68
FIGURA 34. DIMENSIONES DEL CANAL EN LA SECCIÓN DE CONTROL (ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DEL SOFTWARE WINFLUME, 2025).	68
FIGURA 35. DIMENSIONAMIENTO EN CANAL DE DESAGÜE (ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DEL SOFTWARE WINFLUME, 2025).....	69
FIGURA 36. ELIMINACIÓN DE LA RAMPA DE SALIDA EN EL CANAL DE SALIDA, ESTO ES $BED\ BROP=0$ (ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DEL SOFTWARE WINFLUME, 2025).....	69
FIGURA 37. DIMENSIONES AFORADOR RBC (ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DEL SOFTWARE WINFLUME, 2025). ....	70
FIGURA 38. ELECCIÓN DE UNIDADES MÉTRICAS EN SOFTWARE AUTOCAD (ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DEL SOFTWARE AUTOCAD, 2025)...	70
FIGURA 39. VERIFICACIÓN DE RESULTADOS PARA CAUDAL MÁXIMO MEDIANTE SOFTWARE HCANALES (ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DEL SOFTWARE HCANALES, 2025).....	73
FIGURA 40. VERIFICACIÓN DE RESULTADOS PARA CAUDAL MÍNIMO MEDIANTE SOFTWARE HCANALES (ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DEL SOFTWARE HCANALES, 2025).....	73
FIGURA 41. VALORES PROPORCIONADOS POR LA ECUACIÓN QUE MANEJA EL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA (ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DEL SOFTWARE WINFLUME, 2025).....	75
FIGURA 42. OPCIONES DE TABLA DE DATOS (ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DEL SOFTWARE WINFLUME, 2025). ....	76
FIGURA 43. PERFIL DE FONDO CON DIMENSIONES (ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DEL SOFTWARE WINFLUME, 2025). ....	77
FIGURA 44. DIMENSIONES (ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DEL SOFTWARE WINFLUME, 2025).....	78

FIGURA 45. PROTOTIPO DE CANAL EN 2D (ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DEL SOFTWARE AUTOCAD, 2025).....	79
FIGURA 46. PROTOTIPO DE CANAL EN 3D CON MATERIAL DE ACETATO (ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DEL SOFTWARE AUTOCAD, 2025)...	79
FIGURA 47. PROTOTIPO DE CANAL CON AFORADOR RBC EN 2D (ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DEL SOFTWARE AUTOCAD, 2025)...	80
FIGURA 48. PROTOTIPO DE CANAL CON AFORADOR RBC EN 3D (ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DEL SOFTWARE AUTOCAD, 2025)...	80
FIGURA 49. DISEÑO DE SENSORES PARA PROTOTIPO (ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DEL SOFTWARE AUTOCAD, 2025).....	81
FIGURA 50. PROTOTIPO ELABORADO EN VISTA 2D (ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE SOFTWARE AUTOCAD, 2025).....	82
FIGURA 51. PROTOTIPO ELABORADO EN VISTA 3D (ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE SOFTWARE AUTOCAD, 2025).....	82
FIGURA 52. FIGURA 51. PROTOTIPO ELABORADO EN VISTA 3D OTRA VISTA (ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE SOFTWARE AUTOCAD, 2025).....	83

## Índice de tablas

TABLA 1. RANGO DE DESCARGA Y PÉRDIDAS DE CARGA MÁXIMAS EN FUNCIÓN DE LA ANCHURA Y LA LONGITUD DE LA GARGANTA DEL AFORADOR RBC (WAHL ET AL., 2001) .....	21
TABLA 2. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS E HIDRÁULICAS DEL CANAL RECTANGULAR A PARTIR DE ECUACIONES (ELABORACIÓN PROPIA, 2025).....	72
TABLA 3. TABLA 2. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS E HIDRÁULICAS DEL CANAL RECTANGULAR A PARTIR DE SOFTWARE HCANALES (ELABORACIÓN PROPIA, 2025). .....	74
TABLA 4. DIMENSIONAMIENTO DE LA ZONA DE CONTROL DEL AFORADOR RBC (ELABORACIÓN PROPIA, 2025).....	74
TABLA 5. DIMENSIONES PARA EL AFORADOR RBC (ELABORACIÓN PROPIA, 2025).....	74

## **índice de graficas**

GRÁFICA 1. RELACIÓN DE EXPANSIÓN CON EL COEFICIENTE DE PERDIDA DE ENERGÍA (CLEMMENS ET AL., 1986).....	25
GRÁFICA 2. GRAFICA QUE DEFINE EL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA (ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DEL SOFTWARE WINFLUME, 2025).	76
GRÁFICA 3. COMPORTAMIENTO DEL CAUDAL EN FUNCIÓN DE LA ALTURA (ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DEL SOFTWARE WINFLUME, 2025).	77

## 1. Introducción

En México y en el mundo el agua es el recurso más valioso y utilizado para el ser humano en diferentes sectores tales como el agrícola y en la industria, sin embargo, su gestión no es del todo eficiente debido a la falta de bases en temas de hidráulica para los profesionistas.

La medición del caudal en canales abiertos es fundamental, para ello se utilizan diferentes dispositivos directos o indirectos, estos dispositivos establecen una relación directa entre el caudal y el nivel del agua, esto para garantizar la gestión eficiente del agua.

El dispositivo más popular para la medición de caudal en canales abiertos es el aforador RBC, llamado así por las iniciales de sus creadores Replogle, Bos y Clemmens, este instrumento tomo popularidad debido a sus numerosas ventajas, pero sin duda las razones más populares de debido a su bajo costo y su instalación sencilla amoldándose a cualquier tipo de canal sin importar su geometría, sin embargo, a pesar de su popularidad su uso en un entorno académico sigue siendo limitado, al igual que el software WinFlume, ya que a pesar de su fácil instalación y uso al público de manera gratuita no se tiene mucho conocimiento de su existencia y los diferentes uso dentro del programa

En ocasiones no se cuenta con prototipos didácticos que faciliten la enseñanza relacionando así lo teórico con lo práctico, adquirir equipos especializados llega a ser bastante caro ya que estos rondan entre los \$552,000 pesos, ante esto el aforador RBC junto con las herramientas de simulación, calculo y diseño brindan una oportunidad innovadora y factible para la medición de caudales en canales abiertos mediante un aforador RBC.

Ante esto el presente trabajo aborda la propuesta para la elaboración del prototipo de una aforador RCB como herramienta de uso didáctico para la medición de caudales, siendo complementada con el software WinFlume, la propuesta de esta herramienta tiene como objetivo no solo ayudará a relacionar los conceptos teóricos

con la práctica, sino que también ayudará que el estudiante analice y entienda el comportamiento del flujo.

El enfoque del presente trabajo se encuentra en contribuir en la formación de los universitarios, ya que no solo pone a su alcance una propuesta de un prototipo, sino que también será accesible para cualquier estudiante realizar la elaboración del sistema ya sea con las medidas propuestas o en escala, fomentando así el uso de los diferentes softwares y herramientas tecnológicas.

## 2. Planteamiento del problema

La medición del caudal en canales abiertos es una manera clave para la gestión eficiente del agua, especialmente en la agricultura, donde el agua es un elemento indispensable. En México, el 76% del agua disponible es destinada al riego agrícola (CONAGUA, 2025), esto ha presentado un desafío importante para gestionar los recursos hídricos; esto indica lo importante de contar con sistemas para la distribución y medición del agua que garantice el uso racional de este recurso, previniendo pérdidas.

Medir el caudal de manera correcta es fundamental para las operaciones en las industrias, los organismos reguladores son los encargados de su medición, cuando hay un error en esto o se tienen lecturas imprecisas tenemos como consecuencia la disminución de la calidad y eficiencia de la empresa. Los errores más comunes empiezan desde la selección adecuada del instrumento de medición, y que aquí se deben tener en cuenta factores como la presión y temperatura, de igual manera tenemos errores de instalación y si bien el reto más importante es mantener el rendimiento a largo plazo; si bien medir el caudal presenta diversos retos que pueden ser superados teniendo una buena planificación y ejecución.

La correcta medición del caudal es una parte importante en el diseño ya que con ello se permite establecer volúmenes, evaluar pérdidas, etc., sin embargo, este proceso requiere no solo de infraestructura adecuada, sino también de personal capacitado.

En México se cuenta con distritos de riego; estos se definen como zonas geográficas que se componen por un conjunto de canales de riegos, para el manejo y distribución del agua siempre se tienen 3 grandes componentes: objetivos, actividades para lograr el objetivo y la infraestructura; la mayoría de las zonas de riego presentan deficiencias técnicas en la medición de caudales esto debido a que las estructuras tienen carencia de instrumentos y dispositivos de control modernos, otra de las razones es la falta de personal con bases sólidas en hidráulica. Una de las causas de esto es la formación académica y su relación con las necesidades

reales, la mayoría de los programas educativos se imparten desde un aspecto teórico, esto hace que no se tengan las suficientes herramientas prácticas que permitan que los estudiantes universitarios experimenten y analicen los conceptos aprendidos.

Una de las estructuras más recomendada para medir caudales en canales abiertos es el aforador de garganta larga tipo RBC su nombre se debe a las iniciales de los apellidos de los ingenieros diseñadores: John A. Reploge, Marinus G. Bos y Albert J. Clemenens, este sistema ofrece la ventaja de ser utilizado en áreas revestidas y no revestidas, es decir, no importa si el área ha sido cubierta o no con un material adicional, este tipo de aforador permite una relación entre el gasto y tiro de aguas; además de que su instalación es económica y puede adaptarse a la mayoría de canales revestidos y su calibración es sencilla ya que es mediante a formulas teóricas y no se requieren datos experimentales.

En la actualidad, en México se implementó el uso de este aforador en proyectos de modernización de riego; sin embargo, sigue siendo limitado para los estudiantes universitarios ya que no se cuentan con los recursos didácticos necesarios tales como prototipos o simuladores.

Ante esta necesidad el U.S Bureau of Reclamation desarrollo un software llamado "WinFlume", siendo una herramienta enfocada en el diseño y calibración de flujos de garganta larga RBC, este software permite evaluar los criterios hidráulicos y generar tablas de gasto, no obstante, aunque el software es gratuito y es famoso por ser utilizado en diversas investigaciones, su uso en la docencia sigue siendo limitado en México. En el entendido que en los planes de estudio de las universidades que abordan la medición y estudio de caudales no cuentan con un modelo digital o práctico que ayude a simular el comportamiento real de un flujo a través de las estructuras, siendo esto un gran obstáculo para el aprendizaje ya que para los estudiantes es difícil conectar lo teórico con lo práctico.

Ante esta situación, se planea el diseño de una propuesta para la elaboración del prototipo funcional de aforador tipo RBC, que será complementado con el software

“Propuesta para la elaboración del prototipo de un aforador tipo RBC como herramienta didáctica para la capacitación en medición de caudales con ayuda del software WinFlume”

“WinFlume” como herramienta de simulación y análisis de fines didácticos, con este prototipo los profesores y estudiantes podrán visualizar el funcionamiento hidráulico de un aforador y con ello identificar sus componentes, de igual manera podrán aplicar los criterios de diseño y comprender qué relación hay entre un caudal y el nivel de agua.

Este prototipo serviría como modelo para uso en diferentes aulas, laboratorios y universidades, con dicha propuesta se busca resolver una problemática real en el sistema educativo mexicano, ya que no solo se integra un modelo físico que va de la mano con simulaciones, si no, que también favorece el desarrollo de competencias profesionales.

Con la propuesta de elaboración del prototipo de aforador tipo RBC asociado con el software “WinFlume” se responde no solo a la necesidad urgente del sistema educativo, si no, también se aportará a mejorar la calidad de aprendizaje en temas de hidráulica y se propondrán soluciones innovadoras para los desafíos de la gestión del agua en el sector agrícola del país.

### 3. Justificación

La investigación pretende el desarrollo del prototipo de un aforador tipo RBC complementado con el software WinFlume, esto con el fin de impulsar los ámbitos académicos y técnicos, esto debido a que mejora las capacidades prácticas para la medición de caudal en canales abiertos. En México la gestión del agua es un reto ya que se enfrentan pérdidas significativas esto debido a la falta de mediciones precisas y controladas.

El aforador tipo RBC ha sido reconocido en manuales técnicos, como el manual del software WinFlume, si bien destaca por su bajo costo, facilidad de instalación y eficiencia; por lo que es la opción factible para la elaboración del prototipo didáctico para la universidad, no obstante en México su uso sigue siendo limitado, gran parte de esto es debido a la falta de capacitación práctica, sin embargo, en el país, Brigido Morales diseño 3 aforadores RBC modificados con el software WinFlume para flujos de hasta 50 L/s, con este estudio el software fue utilizado para la generación de curvas de aforo y con ello validar el desempeño hidráulico.

Es por ello, que el proyecto es importante ya que aborda la necesidad de contar con recursos didácticos específicos que vinculen la teoría con la práctica. Hoy en día en las universidades del país la enseñanza de caudal se realiza especialmente de forma teórica, tal es el caso del plan de estudios en materias como flujo de fluidos en donde constantemente se ven temas de hidráulica que al momento de aplicarlos en la vida real llega a ser confuso, lo que dificulta que los estudiantes comprendan conceptos esenciales. La implementación de esta propuesta del prototipo de un aforador tipo RBC y con el software WinFlume permite superar estas barreras, con ello se podrá ofrecer un ambiente de aprendizaje flexible.

La propuesta de este prototipo no solo es novedosa, sino que accesible si en el futuro se quiere hacer la realización de este, ya que hay equipos tales como:

- El HM 150.13, en este equipo el estudiante podrá medir el caudal mediante diversos instrumentos.

“Propuesta para la elaboración del prototipo de un aforador tipo RBC como herramienta didáctica para la capacitación en medición de caudales con ayuda del software WinFlume”

- La Demostración de Medidores de Caudal, "FMDU", diseñada por EDIBON este equipo muestra las características importantes de los diferentes tipos de medidores de caudal.

Además, que su precio es demasiado elevado; teniendo como consecuencia que la universidad no pueda adquirirlos.

El software WinFlume es una herramienta que ha sido validada internacionalmente, y que permite simular, optimizar y diseñar, esto como una herramienta que facilita al estudiante la comprensión de términos hidráulicos y con ello se introduce al futuro ingeniero al manejo de estas herramientas.

El proyecto resuelve los problemas del ámbito educativo desde un punto de vista académico y técnico, esto debido a que se propone una herramienta que facilita el aprendizaje y fortifica la formación práctica, por otro lado, en el ámbito técnico será de gran ayuda ya que se formarán profesionales competentes al evaluar sistemas de medición de caudales.

En el diseño de esta propuesta se contempló su pertenencia a políticas públicas. La CONAGUA puso a disposición el Programa Nacional Hídrico 2020-2024, este documento nos brinda más información sobre la política hídrica en el país, tiene como objetivo el fortalecer el capital humano con el uso eficiente del agua. A nivel mundial, el proyecto sigue la agenda 2030 por la ONU, enfocándose en el objetivo de desarrollo sostenible seis, el cual busca garantizar la disponibilidad del agua y su gestión sostenible.

El desarrollo de esta propuesta no solo responde a las necesidades educativas, también aporta beneficios en el ámbito de sostenibilidad ambiental. Al ser una herramienta de bajo costo, accesible, practica y fácil de replicar, su implementación puede extenderse en diversas universidades, teniendo una influencia positiva en la formación de los universitarios y en la gestión del agua en México.

## 4. Objetivo general

Diseñar una propuesta para la elaboración de un prototipo didáctico de un aforador tipo RBC, complementado con el software WinFlume.

## 5. Objetivos específicos.

- 1) Diseñar una propuesta para la elaboración de un prototipo del aforador tipo RBC con apoyo de las herramientas de simulación de WinFlume, considerando condiciones reales.
- 2) Diseñar la propuesta del prototipo en el software “AutoCAD” en vista 2D y 3D.
- 3) Determinar las características geométricas e hidráulicas de nuestro canal teórico rectangular a través del software HCanales y ecuaciones propuestas.
- 4) Calcular las medidas del aforador RCB a través de la teoría propuesta.

## 6. Hipótesis

Si se diseña una propuesta para la elaboración de un prototipo tipo RBC como herramienta didáctica y se simula su comportamiento hidráulico con ayuda del software “WinFlume”, se podrá establecer una relación característica entre las dimensiones geométricas e hidráulicas propuestas y los caudales que se obtienen en la simulación, con ello validando la relación del diseño mediante ecuaciones teóricas.



*Capítulo 1*



*Antecedentes*

## 7. Marco teorico

### 7.1 Caudal

El caudal es la medida fluvial más común, es el principal parámetro que caracteriza la dinámica de un canal, por ello; es una medición precisa de la velocidad.

#### Caudal Volumétrico

De acuerdo con el departamento de ingeniería mecánica de la Universidad de Guanajuato (2023) se puede definir el caudal como, “La cantidad de volumen de fluido en un intervalo de tiempo”.

Por otra parte, Cornejo B. y García H. (2022) nos dice que el caudal volumétrico es la cantidad de volumen de un fluido que atraviesa cierta sección en un segundo, sus unidades son  $\frac{m^3}{s}$ , si bien el caudal volumétrico es el producto de la velocidad, por el área de sección, cabe mencionar que comúnmente se puede expresar en  $\frac{L}{s}$ .

#### Cálculo del caudal volumétrico

El Caudal volumétrico se determina de la siguiente manera:

$$Q = V \cdot A$$

Q= Caudal volumétrico

V=velocidad

A= Área

Las unidades del caudal volumétrico se pueden expresar en  $\frac{m^3}{s}$  o  $\frac{L}{s}$ , esto debido a la conversión de  $m^3$  a L:  $1 m^3 = 1000 L$ .

#### Métodos de medición de caudal en canales abiertos

##### *Métodos directos*

##### **Aforo volumétrico**

Este método es el más sencillo para el cálculo de caudales pequeños, cuando se realiza la medición por este método lo necesario es un envase graduado. Lo más recomendable es el uso de un recipiente con una báscula y cronometro, lo que se

hace es medir el tiempo en el cual el envase se llena. Se recomienda que este proceso se realice 5 veces, de estas se toma el tiempo promedio. Al dividir la capacidad del envase en litros por el tiempo empleando de llenado en segundos se obtiene el caudal en L/s, como en la siguiente formula:

$$Q = \frac{V}{t}$$

Q= Caudal (L/s)

V=Volumen (L)

t= tiempo (s)

Es común que dicho método se emplee en la medición de caudal de tanques, cajas de empalme, Manantiales, aspersores.

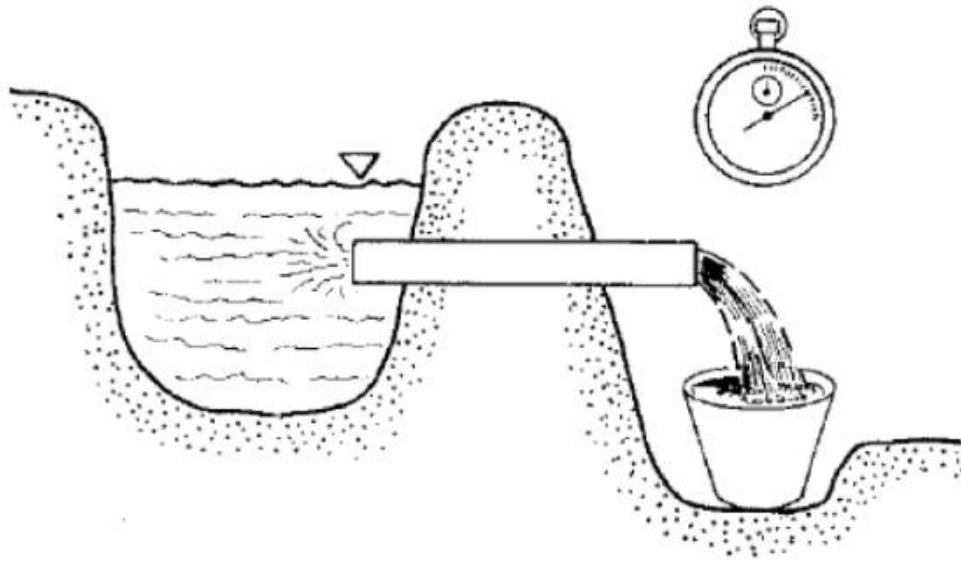


Figura 1. Proceso de realización de aforo volumétrico (Siguayro et al. 2014)

### **Métodos indirectos con estructuras hidráulicas.**

#### **Vertederos**

Se conoce como vertedero a aquella estructura hidráulica en la cual ocurre una descarga del fluido, dicha descarga se ejecuta encima de un muro o placa y a superficie libre. Los vertederos son las estructuras que más se utilizan en la medición del volumen que circula en un canal.

“Propuesta para la elaboración del prototipo de un aforador tipo RBC como herramienta didáctica para la capacitación en medición de caudales con ayuda del software WinFlume”

De acuerdo con Balloffet (1995) se puede definir un vertedero como, "una escotadura (abertura) de contorno abierto, practicada en la pared de un depósito, o bien en una barrera colocada en una canal o río, y por la cual escurre o rebasa el líquido contenido en el depósito, o que circula por el río o canal". Cabe mencionar que se conoce como escotadura al entrante que resulta en una cosa cuando este está cerrado, o bien, cuando parece que lo está; es decir, como si le faltara una parte para completar su forma más regular.

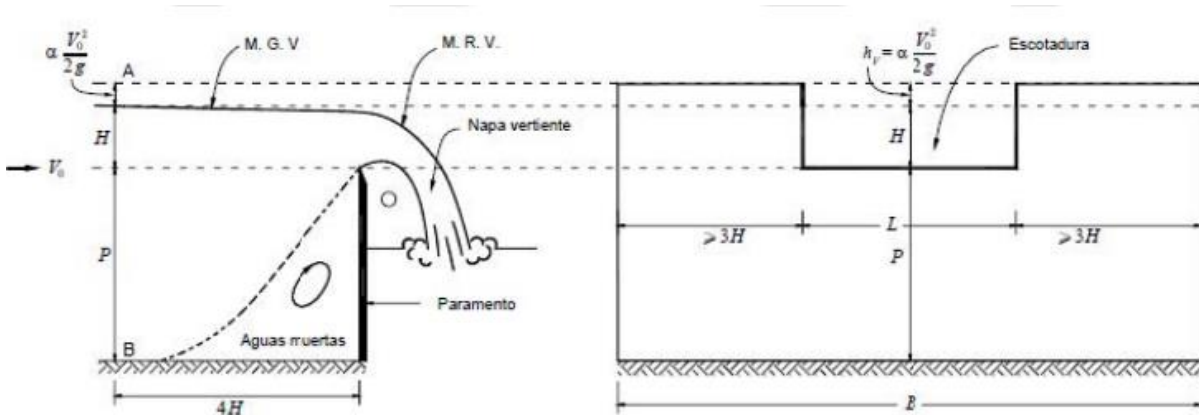


Figura 2. Vertedero (Mejía, 2023)

P: umbral

L: longitud

$\alpha$ . Coeficiente Coriolis

B= ancho del canal

H. Carga

$V_0$ : velocidad de aproximación

Estos se clasifican según su geometría:

- Triangulares
- Rectangulares
  - Sin contracción lateral
  - Con contracción lateral.
- Trapezoides
- Circulares
- Parabólicos

Los vertederos tienen como objetivo medir caudales, estos son utilizados en sistemas de distribución de agua, saneamientos, sistemas de control de aguas, etc.

Si bien los vertederos que más se usan son los vertederos de pared delgada, en estos se produce una caída del agua. El vertedero de pared delgada debe cumplir que el espesor ( $e$ ) dividido entre la carga de agua ( $H$ ) sea menor que 0,67, si no cumple con esto se considera un vertedero de pared gruesa, se recomienda que se utilice en el aforo de canales.

De los tipos de vertederos los más utilizados son el rectangular, triangular y trapezoidal, sin embargo, sin importar la forma del vertedero este debe tener una pared vertical perpendicular a la dirección del flujo y simétrica hacia los lados del eje central.

Para la medición es necesario colocar un punto de referencia sobre el fondo del canal, la lectura de la carga  $H$  se puede tomar con una regla de preferencia graduada en milímetros o bien si se tienen los equipos recomendados es recomendable su uso.

### **Canaletas aforadoras**

Según Clemmens et al. (1986) un aforador se define como, “Instrumento que mide la cantidad de agua que lleva una corriente en determinada unidad de tiempo. Para el caso de medir el caudal del agua que escurre en canales abiertos se denomina aforador. También se denomina normalmente aforador cuando la sección de control se forma elevando el fondo y estrechando las paredes a un mismo tiempo”

Entre los tipos de canaletas aforadoras más comunes tenemos:

- Canal Parshall

Este tipo de Aforador de medición se ha manipulado considerablemente durante el último siglo. Es un aforador Venturi que fue modificado, fue propuesto por Parshall en 1936, esto debido a que se agregó una pendiente al lecho del plano Venturi en la sección de garganta.

“Propuesta para la elaboración del prototipo de un aforador tipo RBC como herramienta didáctica para la capacitación en medición de caudales con ayuda del software WinFlume”



*Figura 3. Estructura de canal Parshall, desinstalada (Heyrani et al. 2022).*

Este canal funciona según el principio de profundidad crítica, el flujo entra en la área de convergencia y es llevado a través de las paredes del ala en la entrada hacia la sección de garganta, se logra un flujo supercrítico en el área de congestión ya que está diseñado para esto. A lo largo de los años se estudiaron varias modificaciones del canal Venturi, sin embargo, el canal Parshall logró consolidar su popularidad debido a su buena precisión.



*Figura 4. Canal Parshall instalado (Heyrani et al. 2022).*

- Canal Cutthroat

Este tipo de aforador fue desarrollado entre los años 1966 y 1977, fue creado en la Universidad Estatal de Utah en el laboratorio de investigación del agua. Debido a que este canal no tiene longitud de garganta fue llamado Cutthroat, fue llamado así por los desarrolladores Skogerboe, Hyatt, Anderson y Eggleston.

Este canal tiene tres componentes: la sección convergente, anchura de la garganta y la sección divergente. La sección convergente que es la entrada tiene  $1/3$  de la longitud total del canal, con las paredes laterales contrayéndose en proporción 3:1. La longitud divergente que es la salida es  $2/3$  la longitud total del canal, caso contrario de la sección convergente aquí sus paredes están opuestas expandiéndose en una proporción 6:1.

De acuerdo con Temeepattanapongna et al. (2013) los tamaños de la anchura de la garganta pueden varias, estos van desde los 2,54 y 182,88 cm.

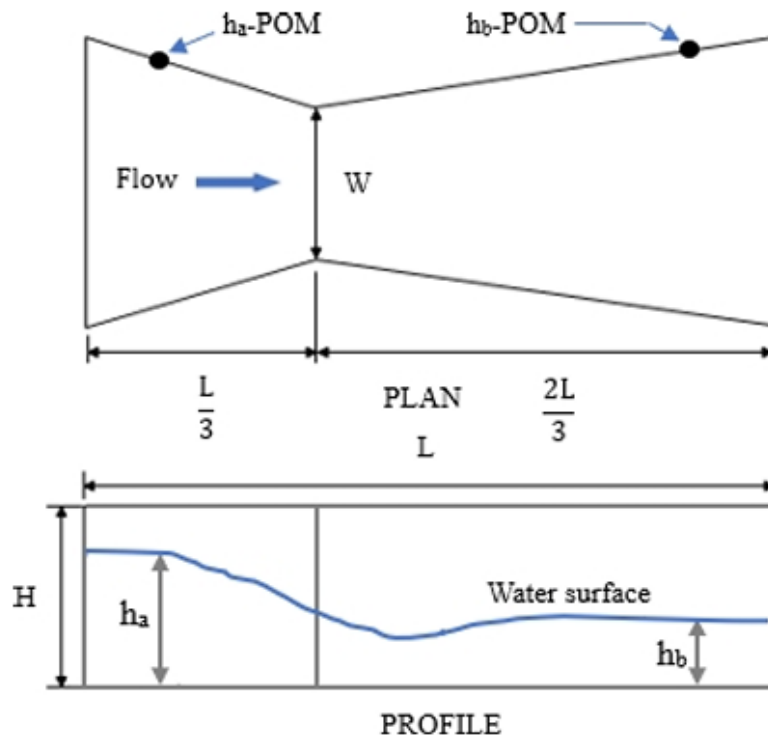


Figura 5. Vista plana y perfil del canal Cutthroat (Temeepattanapongsa, 2013).

POM: punto de medición

H: profundidad del canal

$h_a$ : altura medida aguas arriba

L: longitud canal

$h_b$ : altura medida aguas abajo

W: ancho garganta

Comparado con los canales Parshall, son más fáciles de instalar dentro de un canal; su diseño de fondo plano permite su funcionamiento sin necesidad de ser elevado, es importante mencionar que este canal tiene las mismas longitudes de sección de entrada y salida, si bien esto permite utilizar la misma forma o patrón para cualquier anchura de garganta deseada.

- Canal H

Este canal se creó en 1930 en Estados Unidos por el Servicio de Conservación de suelos, este tipo de canal tiene un suelo plano, una entrada uniforme convergente junto con una sección transversal rectangular. En este canal su garganta se forma

inclinando la parte superior del canal hacia abajo, esto en la misma dirección del flujo. Como resultado se tiene la forma “V” cuando se ve el canal de forma elevada desde el extremo.

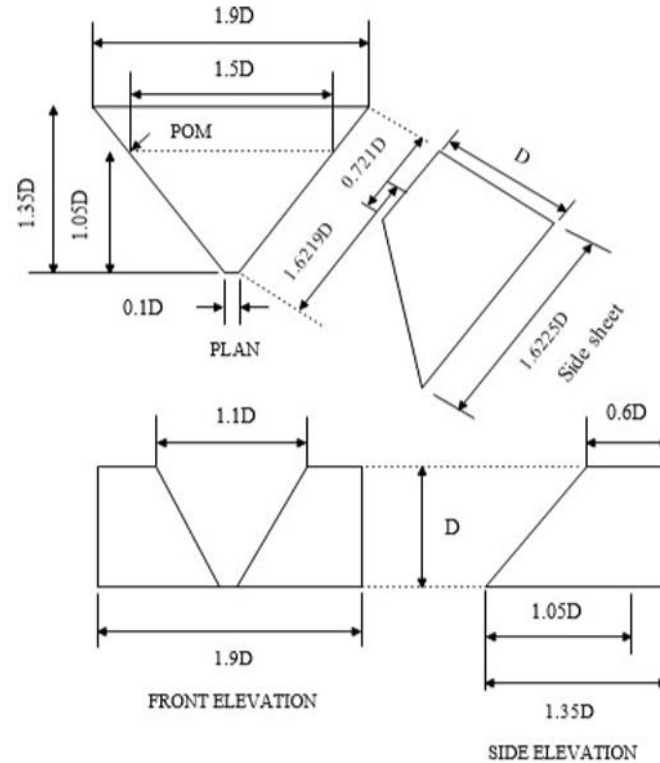


Figura 6. Vista en planta y alzada frontal de canal H (Sibale et al., 2023)

El canal H es la mejor opción cuando se habla de operaciones de gestión del agua las cuales miden una amplia gama de caudales y experimentan un vertido libre.

Kittila y Zurich (2019) nos dicen que los canales H tienen limitaciones, estos pueden atascarse, principalmente cuando se utilizan residuos peligrosos, de igual manera estos canales solo pueden usarse para las operaciones en las que se produce un vertido libre, en caso de no respetar esto, las mediciones pueden ser imprecisas

- Canales RBC (Replogle-Bos-Clemmens)

El canal RBC recibe ese nombre debido a sus creadores Replogle, Bos y Clemmens, estos canales se clasifican en función de la anchura de la garganta, por ejemplo; 50 mm, 75 mm 150 mm, etc. (Wahl et al., 2005).

“Propuesta para la elaboración del prototipo de un aforador tipo RBC como herramienta didáctica para la capacitación en medición de caudales con ayuda del software WinFlume”

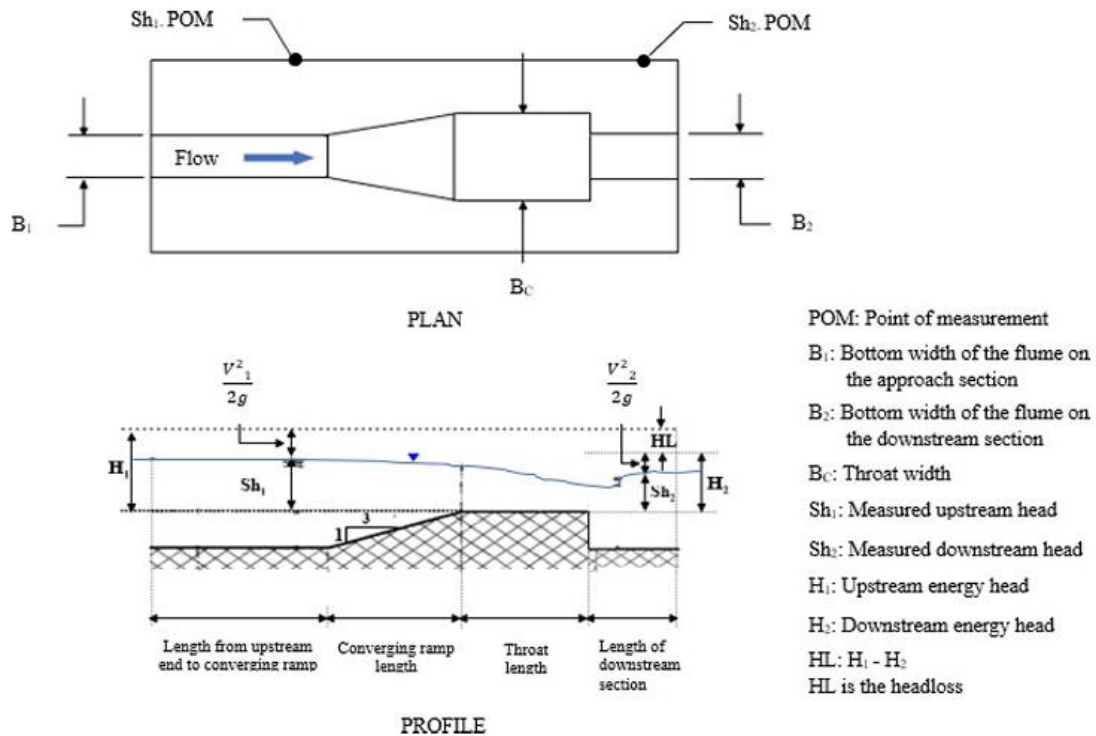


Figura 7. Vista en planta y perfil canal RBC (Clemmens et al., 2001)

La gran ventaja de este tipo de canal es que se adapta a una gran variedad de formas, por lo que se considera una herramienta flexible para medir el caudal en canales abiertos.

Samani (2017) en su artículo nos dice que, aunque el diseño de la sección convergente permite que los sedimentos sean trasladados a través del canal aajo flujo subcrítico y crítico, es importante tener en cuenta que siempre hay agua estancada aguar arriba del aforador RBC, esto debido a la rampa de garganta. En este canal resulta difícil determinar la descarga bajo flujo sumergido utilizando canales RBC, ya que las ecuaciones fujo sumergido no se han desarrollado.

## 7.2 Aforadores de garganta larga o RBC

### Origen y desarrollo

El aforador RBC se creó en la década de 1980, sus iniciales vienen de los apellidos de los ingenieros que lo crearon Replogle, Bos y Clemmens.

Bustamante, K. (2021) nos menciona que este tipo de aforador puede ser utilizado en secciones revestidas o no revestidas, si bien no es capaz de permitir regular el flujo, pero si puede medir un amplio rango de descargas. Los costos de construcción son bajos y pueden construirse de concreto o metal, es importante mencionar que se construye de metal solo cuando el aforador es portátil.

Martínez, P. y Castillo, J. (1991) nos dicen que el aforador RBC, consiste en “Una construcción de una o más contracciones construida dentro de un canal, donde se dan las condiciones hidráulicas para que se presente el flujo crítico en la garganta. La contracción puede ser en el fondo del canal, en las paredes o taludes, o en ambos. Los vertedores de pared gruesa son un caso particular de aforador de garganta larga, en los que se tiene contracción sólo en el fondo del canal”.

Se debe tener en cuenta una circunstancia para que el instrumento sea de garganta larga; esta es que tenga una longitud mínima, para evitar desviaciones fuertes en el perfil hidráulico del flujo y en las líneas de corriente.

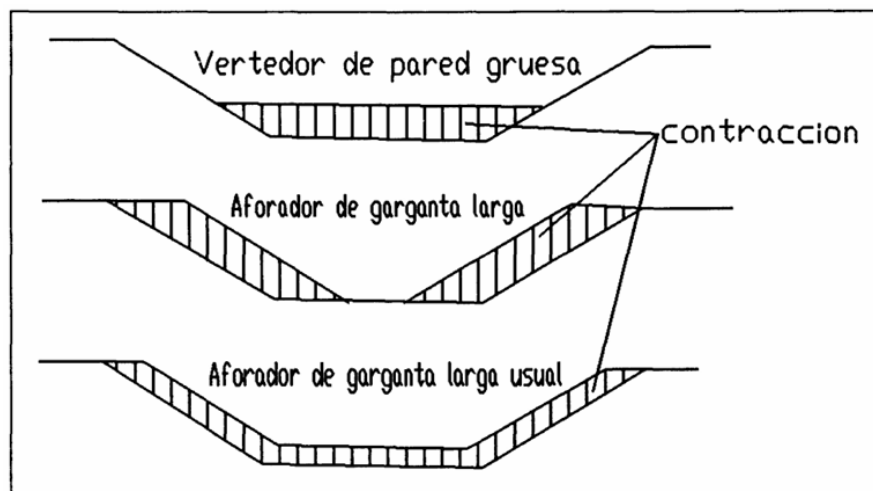


Figura 8. Geometría Transversal de los aforadores. (Martínez, P. y Castillo, J. 1992)

## Descripción técnica y principios de funcionamiento

### Descripción

La estructura del aforador RBC corresponde a una estructura básica de un aforador de garganta larga; a este se le coloca una rampa justo en el área de flujo, esto con el objetivo de reducirla, de esta manera se provoca un resalto hidráulico.

“Propuesta para la elaboración del prototipo de un aforador tipo RBC como herramienta didáctica para la capacitación en medición de caudales con ayuda del software WinFlume”

La rampa debe colocarse en el fondo del canal en el que se debe definir la altura de la cresta ( $S$ ), la longitud de la rampa ( $L_b$ ) y la longitud de la cresta ( $L_c$ ), es importante mencionar que esta debe tener una pendiente 3:1.

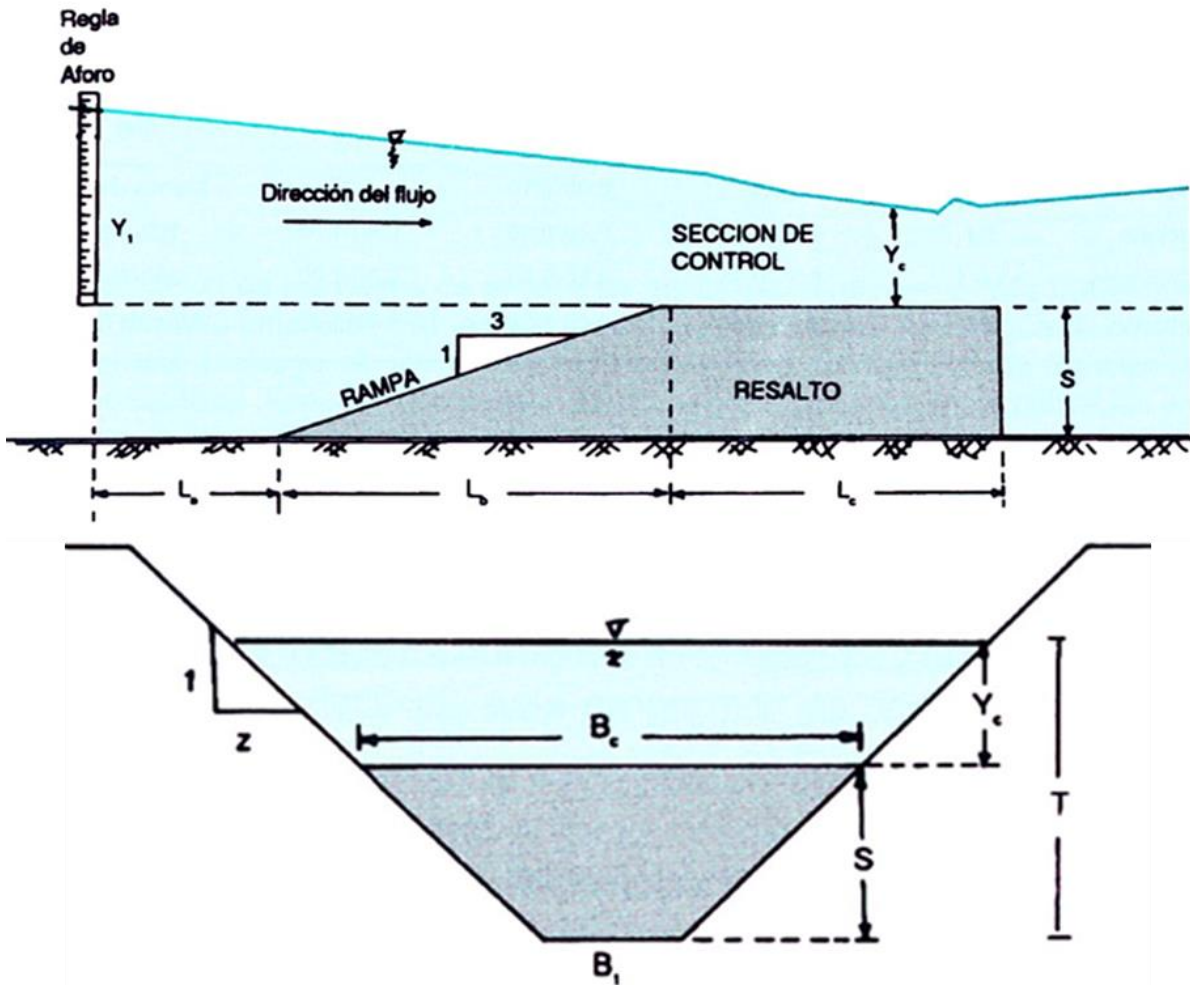


Figura 9. Descripción gráfica del aforador RBC (Torres, J. y Cruz, R. 1993)

Torres, J. y Cruz, R. (1993) mencionan que la altura del resalto debe hacerse con cuidado ya que de ella depende el nivel del agua en el canal aguas arriba de la estructura. Debe tener la altura suficiente para provocar un salto hidráulico, esto para que pase por la cresta de la canaleta y sin que sea demasiado alto; si pasará esto tendría como consecuencia una acumulación excesiva de sedimentos y se aumentaría el costo de la estructura.

Se aconseja colocar una regla de aforo a una distancia equivalente a tres veces el tirante máximo medido por encima de la cresta ( $S$ ) y la longitud de la cresta ( $L_c$ ) debe corresponder a 1,5 veces el tirante máximo medido sobre la cresta.

### Elementos

- Canal de aproximación:

Este elemento tiene el objetivo de facilitar una sección transversal y una velocidad de aproximación conocida. Esta sección generalmente es rectangular al igual que la sección de garganta, sin embargo, cuando la sección es trapezoidal el gasto  $Q$  debe corregirse, esto debido a los efectos de la velocidad de llegada, cuando hablamos de una geometría rectangular, esta es despreciable.

- Transición convergente:

En esta zona se encuentra una rampa en proporción 1:2 a 3, dicha rampa accede la sobreelevación del flujo para crear la descarga en forma de vertedero.

- Garganta:

Elemento que trabaja como vertedero de cresta ancha, esto permite que las líneas de corriente subsistan rectas y paralelas.

- Transición divergente:

Este elemento es la zona de salida del vertedero de cresta ancha, tiene una forma de rampa, esto con el fin de que el flujo salga con menos arrojado que si fuera una caída. Es importante mencionar que en muchos casos se opta por evitar la zona de transición divergente y de canal de cola.

- Canal de cola:

Esta parte del aforador sirve de cambio entre el aforador y el canal aguas abajo.

“Propuesta para la elaboración del prototipo de un aforador tipo RBC como herramienta didáctica para la capacitación en medición de caudales con ayuda del software WinFlume”

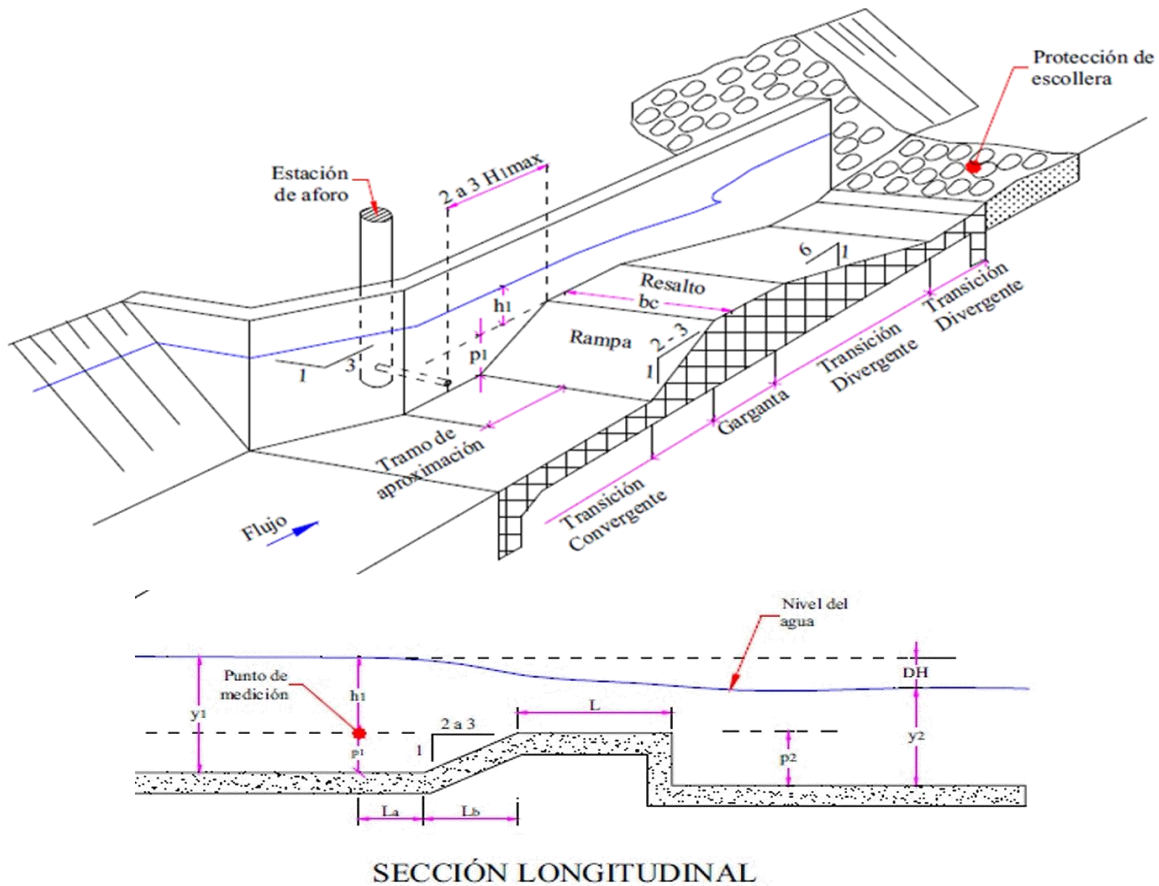


Figura 10. Sección típica y perfil de aforador RBC y dimensiones (Bustamante, 2021)

### Operación hidráulica

En los aforadores RBC su funcionamiento se basa en la presencia de un flujo crítico en la desembocadura de la garganta, debe cumplir con la siguiente ecuación:

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

Q= Gasto que pasa en el aforador.

g=aceleración de la gravedad.

A=área hidráulica de la sección de la garganta.

A=Coeficiente de corrección por distribución de velocidad.

T=ancho de la superficie libre de agua.

Dicha ecuación establece el estado que se presenta en el flujo crítico en la desembocadura de la garganta del aforador RBC; es importante que el flujo sea acelerado en el cambio de entrada y desacelerado en la salida, para esto se necesitan tener las características geométricas indicadas, ya que ello se garantiza que se presente el flujo crítico.

Es una condición necesaria conocer el comportamiento de aguas arriba del perfil hidráulica, ya que el tirante no se puede medir en la garganta debido a la intensidad del flujo en dicha zona, lo que permite calcular el gasto directamente.

En la práctica, aunque es importante determinar la carga total ya que interviene más directo, esto es difícil, ya que implicaría hacer mediciones de velocidad. Para que el aforador tenga una relación entre el tirante a la entrada y el caudal, en la sección de control se debe presentar un tirante crítico; esto se cumple siempre que la carga total de energía a la salida sea menor que el tirante crítico en la garganta (Martínez y Castillo, 1992).

La USBR (United States Bureau of Reclamation) (2001) nos mencionan que el canal RBC mide el caudal con una precisión de  $\pm 2$ ; sin embargo, debido a las consideraciones prácticas, se amplía al  $\pm 5\%$ , en dichas condiciones, el grado de sumersión se centra entre el 70% y 90%.

El aforador RBC mide la descarga con precisión, esto en una amplia gama de caudales y es necesario contar con una pérdida de carga mínima en el canal con el objetivo de mantener el caudal crítico en la sección de garganta, con ello se asegura una relación distintiva entre la altura referenciada aguas arriba y la descarga.

Los canales RBC se clasifican en función de la anchura de la garganta como 50 mm, 75 mm 100 mm, etc. En la tabla 1 podemos encontrar la gama de caudales y pérdida de carga máximas con respecto a la anchura y longitud de la garganta (Wahl et al., 2005).

Tabla 1. Rango de descarga y pérdidas de carga máximas en función de la anchura y la longitud de la garganta del aforador RBC (Wahl et al., 2001)

<b>Anchura de la garganta (mm)</b>	<b>Longitud de la garganta (mm)</b>	<b>Rango de descarga (L/s)</b>	<b>Pérdida de carga máxima admisible (mm)</b>
<b>50</b>	75	0,03-1,5	10
<b>75</b>	112,5	0,07-4,3	15
<b>100</b>	150	0,16-8,7	20
<b>150</b>	225	0,40-24,0	30
<b>200</b>	300	0,94-49,0	40

## **Funcionamiento**

### ***Rango de operación***

Es importante recordar que cuando se diseña de un aforador de garganta larga de igual manera se diseña un aforador de sección crítica, por ello es forzoso que esto se presente en la garganta; si no se toma en cuenta esto el funcionamiento se verá afectado y esto será más que una obstrucción en el canal, provocando turbulencias.

Cuando se forma la sección crítica en la garganta se requiere una carga mínima, que, de no estar disponible, impedirá su formación, de tal modo que es necesario que después de la sección crítica se tenga la energía necesaria para regresar el flujo a un estado subcrítico, para ello es necesario tener como máximo un nivel en el canal de salida; este nivel pertenece a la energía en la sección crítica menos la pérdida de carga necesaria para el retorno al régimen subcrítico.

Se conoce como límite modular a la relación entre la energía total después de pasar por el aforado y la energía total antes de que pase por este, es decir se basa en la pérdida de energía total en el vertedero; y este debe ser calculado para cada conjunto gasto-tirante, es importante mencionar que con ello se debe revisar si el tirante en el canal de salida no sobrepasa el valor marcado por el límite modular.

Bos (1989) define el límite modular como “la relación de inmersión límite para un módulo de flujo particular, que causa una desviación máxima del 1 % en la lectura de la carga aguas arriba para una descarga determinada”.

En el canal de salida el tirante no debe rebasar el máximo marcado por el límite modular. En muchos casos para que se respete el valor marcado por el límite modular, es necesario elevar la garganta del aforador, esto como consecuencia provoca un remanso que aumenta la energía total antes de entrar al aforador, con ello se logra la pérdida de carga que marca el límite modular; en estos casos se recomienda que el canal tenga la capacidad de conducir el gasto máximo sin desbordarse.

Cuando se diseña la estructura aforadora se debe tener en cuenta el minimizar la pérdida de carga; para lograr esto se recomienda mantener los tirantes que marca como máximo el límite modular lo más cerca posible de los tirantes que se dan en forma real en el canal de salida, esto sin permitir que estos sean mayores que los marcados. Con ello se logra un buen funcionamiento del aforador y se logra una pérdida de carga mínima.

En el aforador RBC se requiere una longitud mínima para mantener las líneas de corriente en forma paralela, por ello, es que la garganta de dicho aforador se considera larga, sin embargo, debe considerarse una longitud máxima, ya que en caso de tener una estructura demasiado larga puede traer consecuencias, desde no ser practica hasta provocar inestabilidades esto debido a que el flujo en la garganta es muy cercano al crítico. En la práctica se ha notado que este aforador funciona correctamente si se mantiene la relación de energía que entra a la sección de medición referenciada a la garganta y el largo de esta, entre 0,1 y 1,0.

Sin embargo, se aconseja que el rango de 0,1 a 1,0 se reduzca al rango de 0,1 a 0,7 y si es posible de 0,1 a 0,5, pues en la práctica se encontró que la precisión de los resultados baja en el rango de 0,5 a 1,0 por ello es conveniente siempre que se pueda excluir ese rango.

La garganta del aforador puede o no tener una contracción lateral, en caso de no tenerla se habla de un vertedero de cresta ancha, este por tener un funcionamiento hidráulico al aforador RBC, se le considera un caso específico. Cuando se habla del efecto de la contracción lateral se refiere al incremento de los tirantes presentes en la garganta, pero no solo eso, sino también la pérdida de carga; considerando esto se recomienda lograr una pérdida de carga mínima, esto se logra no construyendo ninguna contracción lateral al aforador y al hacer eso se obtienen vertederos de cresta ancha.

Es de utilidad el efecto de elevación del tirante al colocar una contracción lateral si se pretende incrementar la precisión de las mediciones. La contracción lateral causa elevación de los tirantes para cada gasto que pasa y provoca que se incremente la relación  $\frac{\Delta h}{\Delta Q}$  (Q=gasto, h=tirante). Martínez y Castillo (1992) nos dan el ejemplo de un cambio de diez lps puede significar un cm en un aforador sin contracción lateral y tres cm en uno con contracción lateral, este efecto provoca una mayor precisión al momento de calcular el gasto o al hacer las lecturas de una escala o un limnógrafo.

Durante el diseño de un aforador RBC puede considerarse necesario colocar una contracción lateral para que aumente a precisión de este, sin embargo, debe considerarse que esta de igual manera afectara la pérdida de carga, ya que la elevará, y por la elevación de los tirantes provocará un remanso mayor. Por ello es necesario equilibrar el tamaño de la contracción con la pérdida de carga que se va a permitir y con el remanso máximo que pueda producir en el canal sin afectarlo.

En el cambio de salida del aforador se localiza la máxima pérdida de energía, aquí el flujo crítico regresa a su estado subcrítico. Si bien la dimensión de la pérdida de energía deriva en su mayoría de la forma de transición de salida, de la brusquedad del cambio de secciones y, por ende, de las velocidades, cuando más suave sea el cambio, menor será la energía perdida.

Clemmens, Reploge y Bos (1986) nos mencionan que existe un vínculo empírico entre las cargas de velocidad y la relación de expansión de la transición de salida

que determina la pérdida de carga mínima requerida para mantener un flujo modular. Dicha relación se puede expresar de la siguiente manera:

$$H_c - H_2 - H_f = \frac{\xi(V_c - V_2)^2}{2g}$$

Donde:

$H_c$  energía en la sección crítica

$H_2$  energía a la salida del aforador

$H_f$  pérdidas de energía por fricción

$V_c$  velocidad en la sección crítica

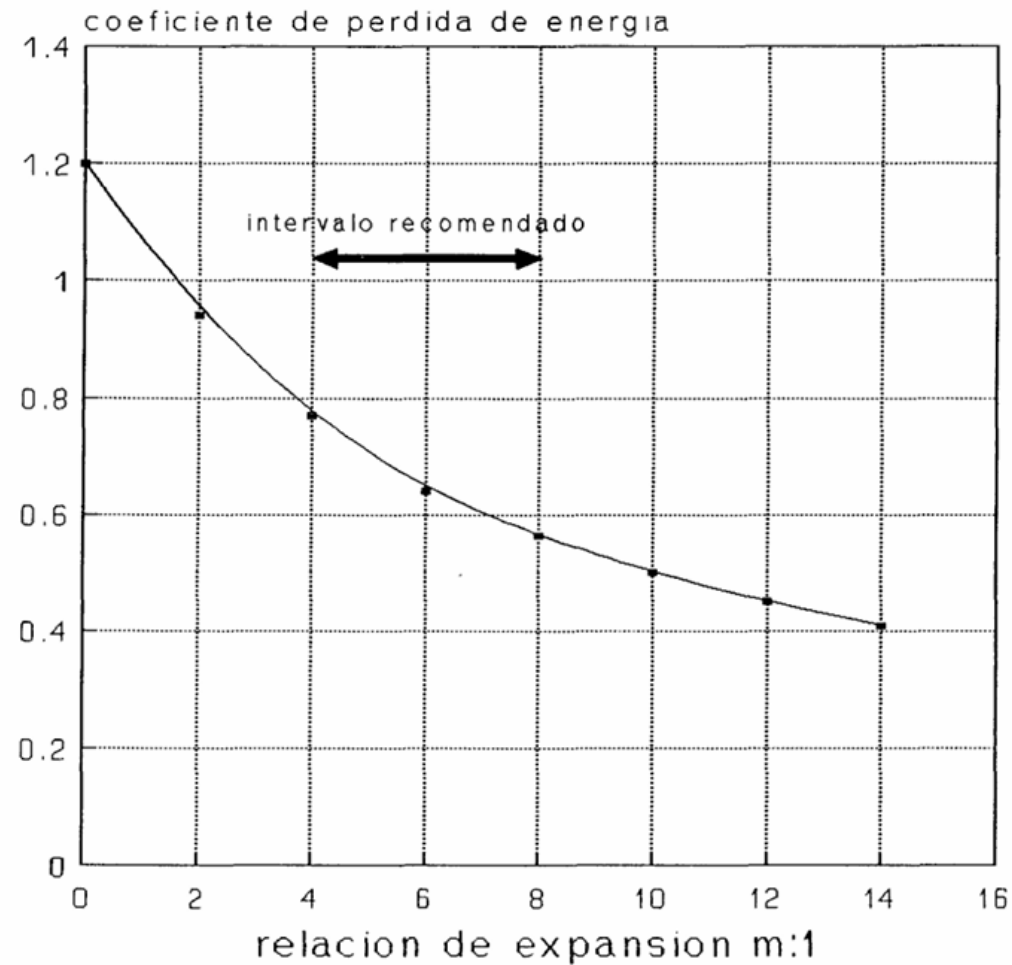
$V_2$  velocidad a la salida del aforador

$\xi$  Coeficiente de pérdida de energía

Se puede observar que la pérdida de energía de la garganta en el canal de salida es proporcional a la diferencia de velocidades en las respectivas secciones al cuadrado. En la expresión matemática se tiene como coeficiente de proporcionalidad a  $\xi$ , este es el coeficiente de pérdida de energía y depende de la relación de la pendiente del fondo, de la contracción o bien de las paredes, es importante mencionar que varía según la gráfica 1.

Se puede observar que entre menor sea la expansión, el coeficiente de pérdida de energía disminuye y es en 0,4 donde la gráfica obtiene su menor valor, esto con una relación de expansión "m" de 14:1.

El valor máximo del coeficiente de energía es de 1,2 esto cuando "m" tiene un valor de cero, aunque, esto ocurre cuando no se tiene ninguna transición de salida, en otras palabras, que el cambio de sección es inmediato.



Gráfica 1. Relación de expansión con el coeficiente de pérdida de energía (Clemmens et al., 1986)

Clemmens, Bos y Reploge recomiendan que los valores para la relación de expansión “m” sean de 4:1 a 8:1, no recomiendan valores menores.

Si la longitud disponible para la transición de salida no es suficiente lo recomendable es cortar a la mitad. No se recomienda redondear el corte, ya que esto puede desviar el flujo, ocasionaría erosión y con ello una mayor pérdida de energía.

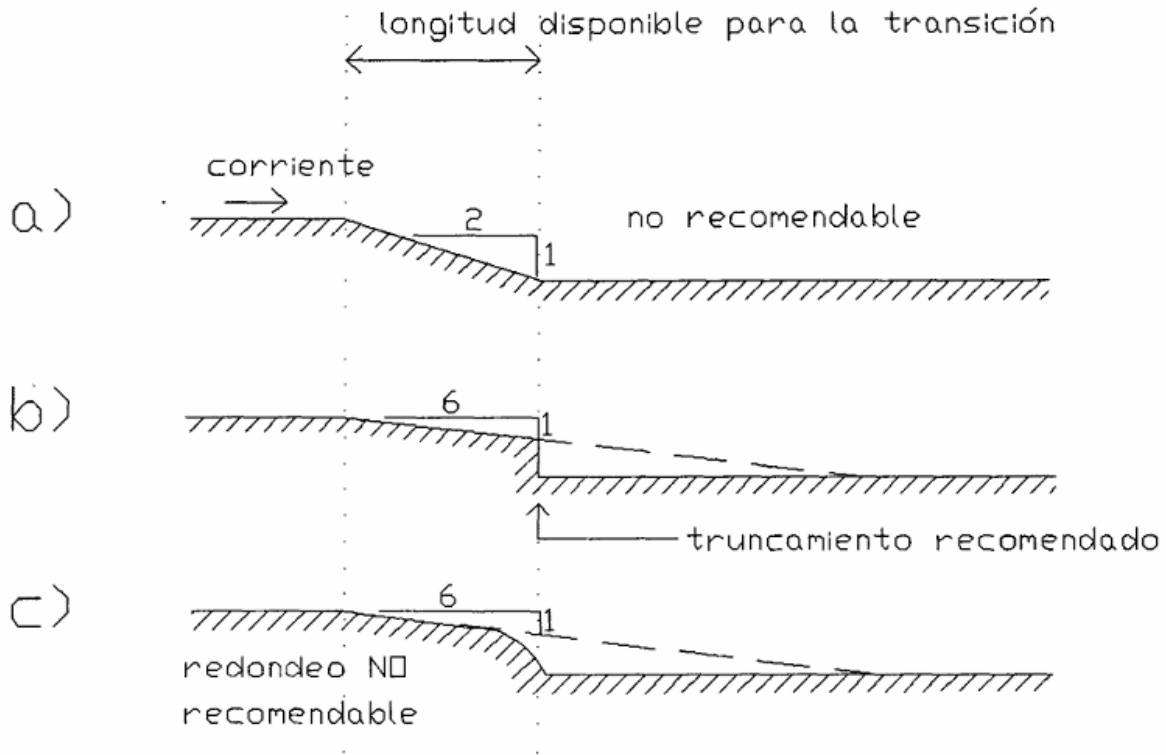


Figura 11. Alternativas de terminación en la rampa de salida (Martínez y Castillo, 1992)

En la figura 11 se presentan 3 situaciones, en la situación a se usa una rampa de salida con una relación 2:1, sin embargo, en su lugar debería usarse con una relación 6:1 y cortarla a la longitud deseada, tal es el caso de la situación b. Los cortes, cuando son a la mitad no tienen un efecto significativo en el límite modular. No es recomendable redondear el corte como en el caso c.

La rampa de entrada y la transición de entrada tiene que ser de forma gradual y tiene como propósito garantizar que las líneas de flujo sean paralelas, esto permite una buena calibración analítica del aforador. La relación recomendable es de 2:1 a 3:1.

Si bien, la rampa de salida y su transición no son necesarias para que el aforador tenga un buen funcionamiento, esto si hay suficiente carga disponible y esta puede perderse a través del paso por la estructura.

La rampa y la transición tiene como función reducir la pérdida de carga y con ello asegurar que el aforador no se ahogue cuando la energía disponible no sea

suficiente. La distancia del punto de medición tomada en el inicio de la transición hacia aguas arriba debe ser por lo menos la carga máxima total de energía en ese punto, esto en relación con la base de la garganta.

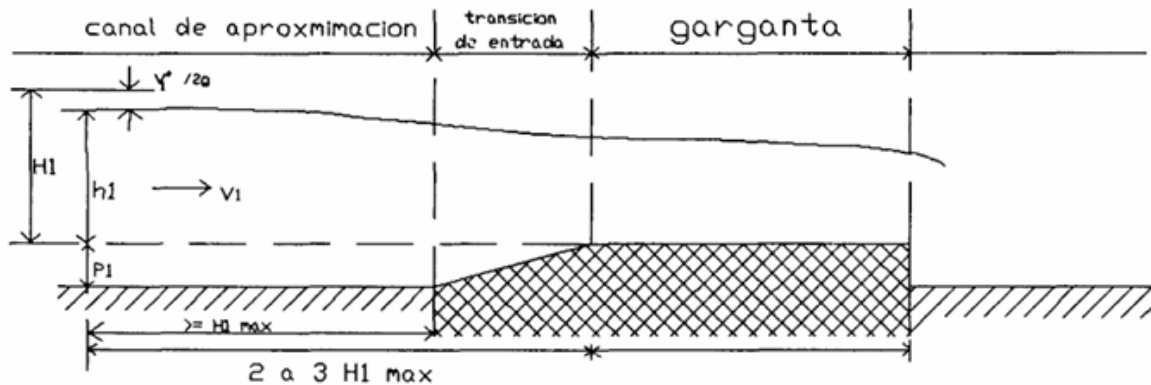


Figura 12. Ubicación del punto de medición del tirante (Martínez y Castillo, 1992)

Lo recomendable es que sea de dos a tres veces la carga, está tomada desde la sección de medición hasta el final de transición de entrada. Puesto a que en la zona de medición se poseen velocidades bajas, la carga total de energía es casi similar a tirante, por lo que se puede tomar a este como referencia, en lugar de la energía total.

En un aforador RBC el diseño más sencillo consta con únicamente contracción en el fondo y no lateral, por ello se tendrá un vertedero de cresta ancha. Si bien este diseño es el más sencillo, este genera la pérdida de carga más baja debido a que se presentan los tirantes o cargas menores con relación a la garganta del aforador, no obstante, si se analiza que para el rango completo de gastos a medir la escala correspondiente tiene una longitud establecida, igual a la variación de los tirantes en el canal, ello se define como cierta distancia sobre la escala correspondiente por cada litro por segundo escurrido, si no fuera bastante esta distancia para lograr la precisión deseada, se puede aumentar anexando una contracción lateral. Esta contracción lateral hará que el rango de variación de tirantes con respecto al gasto aumente, esto incrementará la pérdida de carga y como consecuencia se tenga que

con una reducción en la altura del escalón esto con el objetivo de no rebasar el libre bordo del canal.

Las dimensiones de la contracción lateral deben calcularse por ensayo y error, estas deben tomar en cuenta la precisión deseada, las pérdidas de carga, los tirantes máximos y necesarios permitidos aguas abajo del aforador, esto para asegurar el flujo modular.

### ***Medición del tirante***

Se requiere estar al tanto de la carga en su generalidad, aguas arriba del medidor, referida al nivel de la garganta; para medir el caudal con exactitud, esto es importante ya que con repetición el aforador fracasa o tiene éxito ya que esto depende constantemente del buen funcionamiento de la escala o el limnógrafo que se utilice. En la sección de medición es donde el nivel de referencia se toma; esto en la base del canal de llegada, en caso de no tener bien definido, se recomienda referirse a la garganta del aforador, sin embargo, esta debe estar perfectamente horizontal. Si este es el caso, se debe descontar de la tabla la altura del escalón.

El limnómetro destinado a medir el tirante debe ubicarse a una longitud suficiente aguas arriba de la obra, esto para que caiga fuera de la zona de descenso de la superficie del agua, aunque lo demasiado cerca de la obra, esto para que entre este punto y la obra la pérdida de energía sea mínima.

Se puede medir el nivel del agua con una escala graduada, ya sea vertical o inclinada, esto sobre la rampa del canal aguas arriba. Cabe mencionar que en general para las medidas eventuales, es suficiente con una sonda de punzón o un limnómetro, sin embargo, al requerir mediciones continuas es satisfactorio disponer de un limnógrafo.

Martínez y Jorge (1992) nos dicen que en el caso de contar con un totalizador volumétrico de igual manera puede servir un limnógrafo, no obstante, esto necesita más cantidad de trabajo, y que se tiene que medir el área de cada registro, si se integra el área bajo la curva del limnógrafo se puede totalizar el gasto.

### ***Escalas limnimétricas***

Estas escalas son utilizadas en casos en los que no se necesita constantemente información del caudal, o bien en aquellos casos en los que se producen gradualmente las variaciones en la cantidad de fluido, esto debido a que se pueden obtener bastantes datos realizando lecturas constantes sobre dicha escala. Esta deberá estar colocada de manera que sea fácil y posible de leer el nivel del agua.

En el Proyecto IMTA “Diseño de aforades de garganta larga” (1992) se menciona que “la forma típica y conveniente de una escala limnimétrica es aquella en que se pintan los estadales topográficos, la cual facilita su lectura”.

Cuando se tiene un canal revestido, los limnímetros se colocan sobre las paredes, en caso de tener una geometría trapezoidal al colocar la escala debe tenerse en cuenta que la longitud inclinada es superior a la correspondiente vertical del agua.

### ***Limnígrafos***

Los limnígrafos, conocidos también como registradores automáticos del nivel del agua, son instrumentos encargados de trazar gráficos, estos graban en cinta magnética, o bien, sobre una pedazo de papel con tinta, esto es en forma continua; en caso de no contar con tinta el grafico es mediante perforaciones sobre el papel, esto es conforme el nivel del agua en función del tiempo (Martínez y Castillo, 1992).

El uso de los limnígrafos posee las siguientes ventajas sobre las escalas limnimétricas ordinarias:

1. El registro permanente de aquellos canales que oscilan en el día, brinda un ámbito más adecuado para determinar el caudal diario y el volumen total.
2. Se proporcionan datos sobre el tiempo de reacción del sistema de canales a los cambios del caudal aguas arriba, ya que en los gráficos quedan grabados los niveles máximos y mínimos de agua en función del tiempo.

### **Calibración analítica**

Existen dos métodos para la obtención de la función gasto-tirante medido:

1. Método de los coeficientes:

En este método el gasto está en función de la carga de energía en la garganta, se toma en cuenta de igual manera la energía en la garganta y en la sección de medición.

En dicho método se hace uso de la ecuación de Bernoulli, esta se deberá despejar en función del tirante medido, sucesivamente se aplican los coeficientes de corrección para la pérdida de carga, forma de la garganta y la velocidad de llegada al canal.

## 2. Método de integración numérica.

En el método de integración numérica se debe calcular el perfil de flujo en tramos pequeños, desde el sitio de la desembocadura de la garganta, en el cual se muestra el tirante crítico, hasta la sección de medición del tirante.

En este método se resuelve la ecuación de la energía con el termino de pérdidas incluido y se basa principalmente en el uso del conocimiento de las condiciones hidráulicas. Si bien se tiene conocimiento que se presenta un flujo gradualmente variado, para solucionar esto se deberá ir “barriendo” el perfil, es decir, mientras se calculan los tirantes a cada pequeño aumento de  $x$  esto a partir de la sección crítica hasta llegar a aquella área en la que se desea conocer el tirante, dicha área será el punto de medición.

Cuando se habla del método de integración numérica se habla de un método por pasos, en este cada uno de ellos con el incremento  $\Delta x$  se determina el tirante adecuado por métodos iterativos, esto hasta llegar a la distancia final en el área esperada, es aquí donde se deberá colocar el limnómetro o en su caso la regla de medición.

Teniendo en cuenta la ecuación de Bernoulli simplificada para canales abiertos:

$$Y_1 + \alpha_1 \frac{U_1^2}{2g} = Y_2 + \alpha_2 \frac{U_2^2}{2g} + \Delta Z + H_f \quad (1)$$

En donde:

$Y_1, Y_2$  Tirantes en las secciones respectivas.

$U_1, U_2$  Velocidad media en las secciones respectivas.

$g$  Aceleración de la gravedad.

$\Delta Z$  Cambio en el nivel de las secciones.

$H_f$  Pérdida de energía entre secciones.

$\alpha_1, \alpha_2$  Coeficientes correctivos por el uso de la velocidad media.

Se debe tener en cuenta que la ecuación se emplea en la situación particular del aforador; la primera sección es una situada a distancia  $\Delta x$  de la crítica, esta es la segunda, entonces en la ecuación en la segunda parte hacemos el cambio del subíndice a “c” de crítico.

$$Y_1 + \alpha_1 \frac{U_1^2}{2g} = Y_c + \alpha_c \frac{U_c^2}{2g} + \Delta Z + H_f \quad (2)$$

Aquí

$Y_c$  Tirante crítico.

$U_c$  Velocidad crítica.

$\Delta Z$  Tamaño del escalón

$\alpha_c$  Coeficiente de distribución de velocidad en la sección crítica.

En la garganta se presenta la condición de flujo crítico, esta permite establecer una relación gasto-tirante, esta es definida por:

$$Q = \sqrt{\frac{gA_c^3}{T_c \alpha_c}} \quad (3)$$

Donde:

$Q$  Gasto

$A_c$  área crítica

$T_c$  ancho de la superficie de la sección crítica

Para la ejecución de un “barrido” del perfil es importante comenzar desde la garganta, aquí gracias a la ecuación del gasto se conoce la condición de frontera, esto es el tirante crítico. Así mismo al utilizar la ecuación 3 se puede calcular el tirante en la sección contigua a la garganta, siempre que esta separada a una distancia  $\Delta x$  de ella. Si se simplifica el procedimiento la ecuación 1 aún se puede seguir calculando los tirantes en subsecuentes secciones, esto hasta llegar al tirante deseado, es decir, donde se quiere establecer la relación tirante-gasto. Es importante mencionar que la diferencia del procedimiento anterior es que en él se necesitan métodos iterativos, esto debido a que el tirante no está en forma explícita.

Debido a que se sabe la geometría del aforador, resta como incógnita la pérdida de carga  $H_f$  en cada  $\Delta x$ . Para este caso en el cálculo se utiliza una ecuación semiempírica tal es el caso de la ecuación de Chezy o la ecuación de Manning; sin embargo, puesto que se utilizan distancias cortas, se opta por métodos más precisos, por ello se aplica la teoría de la capa límite.

Schlichting y Gersten (2016) en el libro “Boundary-Layer Theory” nos dicen que la pendiente de fricción se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$S_f = C_f R^{-1} \frac{U^2}{2g}$$

En donde:

$S_f$  = pendiente de fricción.

$R$  = radio hidráulico del escurrimiento.

$C_f$  = Coeficiente de fricción.

$U$  = Velocidad media del flujo en la sección considerada.

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que:

$$S_f = \frac{H_f}{L}$$

$L$  = longitud considerada ( $\Delta x$ ).

Ahora bien, la pérdida de carga se expresa como:

$$H_f = C_f R^{-1} L \frac{U^2}{2g}$$

Sin embargo, en esta ecuación hay un inconveniente y es que  $C_f$  no está definido como se evalúa, el coeficiente de fricción es una función de la rugosidad del canal y del número de Reynolds, no obstante, puede usarse una expresión proveniente por Blasius, cabe aclarar que esta expresión da resultados puntuales para  $Rx < 10000$ , esta expresión es:

$$C_f = \frac{1.328}{R_x^{\frac{1}{2}}}$$

$Rx$  = número de Reynolds.

$$Rx = \frac{UX}{\gamma}$$

$\gamma$  = viscosidad cinemática del agua.

$X$  = Longitud de la garganta.

Cuando se tiene el caso de una capa límite turbulenta, se puede usar la siguiente expresión:

$$\frac{0.544}{\sqrt{C_f}} - 5.67 \sqrt{C_f} + 0.638 + \ln \left( \frac{1}{Rx C_f} + \frac{1}{4.84 \frac{x}{k} \sqrt{C_f}} \right)$$

En esta expresión  $k$  es la rugosidad de las paredes, esta ecuación tiene solución mediante un método iterativo, ya que no es una ecuación explícita.

### **Ventajas del aforador RBC**

Los aforadores RBC tienen el beneficio de que son adaptables varios canales, sin importar su geometría, por lo que se considera la mejor herramienta para la medición de caudal en canales abiertos.

Clemmens et al. (1986) mencionan entre sus principales ventajas:

- Debido a que el aforador tiene una construcción sencilla se cuida que la superficie de la cresta sea horizontal teniendo así una geometría que es compatible con planos de diseño.
- Tiene un económico costo de construcción, este es aproximadamente del 10% al 20% menor que el costo de los aforadores Parshall y 50% menos que los vertederos de tamaño grande.
- A diferencia del aforador Parshall, su pérdida de carga típica en canales pequeños ronda entre los 5cm, esto es la cuarta parte de otros aforadores típicos.
- Son adaptables a cualquier tipo de canales revestidos sin tener que reconstruirlo, esto gracias a que su geometría es adaptable a condiciones reales.
- Se tiene un problema de sedimentación nulo en canales revestidos en donde el flujo está limpio o tiene una concentración mínima de sedimentos.
- No necesita una calibración en gabinete ya que basta con calibrarlo analíticamente, esto da la posibilidad de realizar correcciones consecuentes a la construcción.
- En caso de que en la zona de la garganta se presente el régimen crítico, es posible la elaboración de una tabla de calibración con un error  $<2\%$  esto para cualquier mezcla de garganta y canal de entrada prismático.
- La sección de garganta se puede diseñar de tal forma que pueda medir con exactitud el rango de caudales esperados.

### 7.3 Características hidráulicas

Es importante saber que cuando se habla de características hidráulicas estas deben ser medidas en el tramo donde el aforador será construido, las características hidráulicas a calcular son las siguientes:

- 1) Velocidad de flujo ( $V$ )

Esta características es posible determinarla mediante métodos con flotadores o molinetes hidráulicos, sin embargo, de igual manera tenemos la formula teórica, la cual es:

$$V = \frac{Q}{A}$$

## 2) Área mojada (A)

Para calcular el área hidráulica se necesitan ciertas dimensiones, esto depende de la geometría del canal. En caso de una geometría rectangular se necesitan las medidas del tirante y el ancho, su fórmula es la siguiente:

$$A = by$$

Donde

b= ancho

y= tirante

## 3) Tirante de agua (y)

Se conoce como el espesor del flujo, se debe tener en cuenta que cuando se trabaja con canales de tierra esta característica llega a ser variada, no obstante, cuando se trabaja en con canales con una geometría rectangular el tirante será único y tendrá el mismo valor que el tirante medio. No existe una ecuación exacta para conocer el tirante, sin embargo, se puede obtener el valor mediante métodos numéricos siguiendo la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{1}{n} \times A \times R_H^{\frac{2}{3}} \times S^{\frac{1}{2}}$$

Donde

Q= Caudal

n=rugosidad

A=área

$R_H$ =radio hidráulico

$S$ = pendiente

#### 4) Número de Froude (Fr)

Esta característica será la encargada de poder determinar el régimen del flujo, este puede ser (subcrítico, crítico y supercrítico). La ecuación para su cálculo es la siguiente:

$$F = \frac{V}{\sqrt{g \times D_H}}$$

$$D_H = \frac{A}{T}$$

Donde

$V$ = velocidad.

$g$ = aceleración de la gravedad

$D_H$ = Profundidad hidráulica

$T$ =Espejo de agua

$A$ =área

## 7.4 Software WinFlume

### Origen y Desarrollo

Este software fue desarrollado en el año de 1997, por Bureau of Reclamation, esta junto con la Agricultural Research Service (ARS) trabajaron para lanzar una versión actualizada del software de diseño de canalizaciones que ya existía.

El nuevo software fue nombrado "WinFlume", este programa esta utiliza la misma teoría hidráulica empleada en sus predecesores, sin embargo, tiene un interfaz de usuario mejorada, si bien su actualización incluyó un nuevo módulo de diseño. (Wahl et al., 2008).

“Propuesta para la elaboración del prototipo de un aforador tipo RBC como herramienta didáctica para la capacitación en medición de caudales con ayuda del software WinFlume”

Reclamation es la empresa encargada de la programación de este software, esto con el objetivo de facilitar su mantenimiento y mejor en años posteriores. WinFlume sigue el lenguaje de programación “Visual Basic”, la salida grafica es brindada gracias a que se utiliza una biblioteca gráfica, dicha biblioteca está integrada de terceros y es distribuida gratuitamente con el software.

WinFlume está orientado a objetos, esto con la definición de un canal junto con sus propiedades hidráulicas, la ventaja en el softwares es que todas estas características están contenidas en un único tipo de datos estructurado, gracias a esto en el programa se puede simplificar el almacenamiento y la recuperación de los diseños de canales que se hagan. El programa está diseñado para trabajar en unidades SI, no obstante, el usuario puede modificar dichas unidades entre la gran variedad que tiene el programa.

### **Funciones y alcance**

El software tiene 2 objetivos esenciales:

- 1) Calibración de la estructura de medida del flujo existente, con ello se pueden generar tablas con la relación  $Q$  vs  $h$  o viceversa, de igual manera puede utilizarse como herramienta de revisión de los datos de diseño, esto para identificar las deficiencias del diseño en las estructuras existentes.
- 2) Para el diseño de nuevas estructuras, dichos diseños pueden ser desarrollados por uno mismo y se analizan para asegurar un funcionamiento correcto.

El funcionamiento se basa en una pantalla grafica en donde las dimensiones son editables, como la que se ve a continuación:

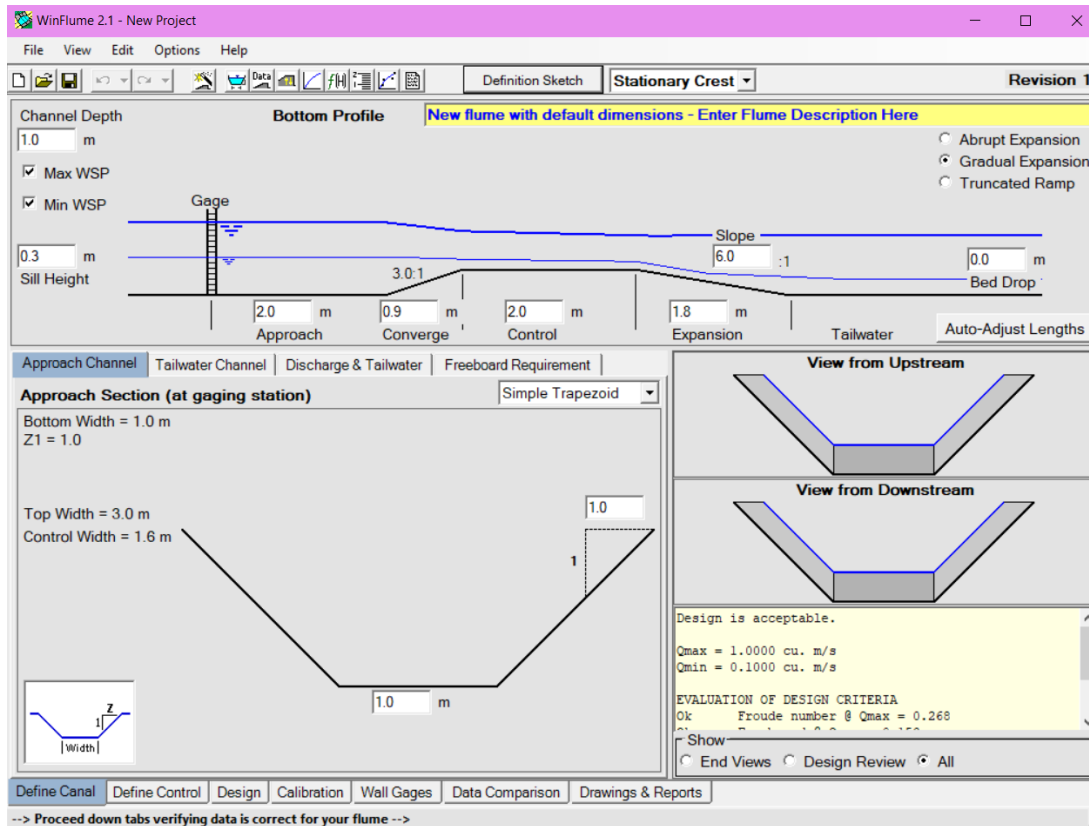


Figura 13. Pantalla gráfica del software WinFlume (Bureau of Reclamation, 2020).

Se puede observar que adicional se tienen pantallas auxiliares, estas tienen la función de especificar los requisitos de diseño, así como de otros datos importantes. Las dimensiones del perfil de fondo serán editables en la pantalla principal, sin embargo, las secciones transversales son editables en una pantalla adicional.

No obstante, además de la geometría del canal se deberán definir las propiedades hidráulicas de la estructura y los requisitos de diseño esto servirán para una evaluación y revisión del diseño.

Entre las propiedades específicas que son necesarias en el programa encontramos:

1. Rugosidad hidráulica del material de construcción.
2. Rango de caudales a medir.
3. Incertidumbre admisible en la medición del caudal mínimo y máximo.

Entre las capacidades básicas del programa WinFlume se encuentran:

“Propuesta para la elaboración del prototipo de un aforador tipo RBC como herramienta didáctica para la capacitación en medición de caudales con ayuda del software WinFlume”

1. Desarrollo de tablas de valoración.
2. Ecuaciones de valoración.
3. Resultados relacionados para estructuras existentes en el sistema.
4. Revisión de criterios en caso de elaborar un nuevo diseño.

La versión más reciente del programa incluye un conjunto de características nuevas y algunas mejoradas, entre las mejoras más relevantes se encuentra un nuevo menú superior, además de una barra de herramientas esto para tener acceso a las diferentes secciones del programa.

### **Diseño de Aforadores RBC**

Se debe tener en cuenta que el diseño hidráulico se puede llevar a cabo en dos pasos. Primeramente, se verán colocar las dimensiones de la sección de la garganta y como consecuencia determinarse la altura del umbral, sucesivamente se deberán ajustar las longitudes de los componentes del canal, esto con en base a la geometría con la cual se está trabajando, esto con el objetivo que se cumplan los requisitos de un aforador RBC (Wahl et al., 2008).

Wahl nos menciona en su artículo “WINFLUME—Windows-based software for the design of long-throated measuring flumes” criterios de diseño importantes, los cuales son:

- Mantener el tirante especificado en el canal de aproximación al caudal máximo.
- El número de Froude deberá ser menor o igual a 0.5 en el canal de aproximación al caudal máximo.
- El flujo libre se deberá mantener en la sección de control con caudal mínimo.
- El caudal libre se debe mantener en la sección de control con caudal mínimo.
- El usuario deberá cumplir con el objetivo especificado para la medición del caudal al caudal máximo.

Si bien, el primer criterio normalmente se cumple al reducir la contracción en la forma de la sección de garganta, por otra parte, para satisfacer los siguientes tres

criterios basta con aumentar la contracción del flujo en la sección de la garganta, esto se hace estrechando dicha sección.

El último criterio se cumple ajustando el ancho de la sección de garganta, la incertidumbre total normalmente tiene un valor del 2%.

WinFlume junto con el diseño proporciona informes enfocados en la revisión de varios puntos de diseño, estos se evalúan en función a los criterios mencionados con anterioridad, con el objetivo de cumplir con los criterios el usuario puede ajustar manualmente todos los parámetros.

## **7.5 Software HCanales**

### **Origen y desarrollo**

Creado en el año de 1992 por el ingeniero peruano Máximo Villón Béjar en la escuela de Ingeniería agrícola del Instituto tecnológico de Costa Rica, este programa ayuda a la simplificación de los cálculos para el diseño de canales.

Al pasar de los años la plataforma de trabajo del software ha ido modificándose, en el año de 1994 el programa estaba disponible para Windows 3.1, este solo se distribuía mediante un disquete. Cuando surgen cambios de la plataforma de Windows, por consecuencia se han ido elaborando otras versiones del programa.

Con el Windows 95 y 98 surge la segunda versión del programa, de igual manera estas se distribuían en dos disquetes, sin embargo, con el paso de los años se van actualizando las versiones.

En el año 2000 se lanza HCanales 2.1, años después surge la versión 3.1, esta versión es compatible con Windows 7, 8, 10 y en computadoras de hasta 32 bits al igual que en 64 bits (Villón, 2013).

Villón en su artículo “Desarrollo de un software para el diseño de canales y estructuras hidráulicas HCanales para Windows” nos menciona que este programa fue diseñado utilizando visual Basic 3. HCanales probó entre una variedad de

“Propuesta para la elaboración del prototipo de un aforador tipo RBC como herramienta didáctica para la capacitación en medición de caudales con ayuda del software WinFlume”

métodos numéricos para la solución de las diferentes ecuaciones, dependiendo de la situación el programa elige el método más adecuado.

### **Funciones y alcance**

Este software permite calcular el flujo uniforme, flujo crítico, resalto hidráulico y el flujo gradualmente variado, esto para las secciones de uso común.

Para el diseño de canales y de estructuras hidráulicas se enfrentan diferentes problemas, entre ellos los que destacan son:

- La solución de las ecuaciones llega a ser muy complicadas debido al uso de métodos numéricos.
- Los cálculos llegan a ser largos y difíciles.
- Las simulaciones no pueden hacerse de manera manual, debido a que para su solución necesita mucho tiempo.

Para darle solución a estos problemas surge el software WinFlume, para la solución de las distintas ecuaciones se utilizan algunos de los siguientes métodos:

1. Método Newton Raphson.
2. Método de la secante.
3. Integración gráfica.
4. Interpolación de Lagrange.
5. Algoritmo Romberg.

El funcionamiento de este programa se basa en una pantalla principal, dicha pantalla tiene una barra de herramientas en la parte superior en donde el usuario elige lo que quiere resolver:

- Tirante normal.
- Tirante crítico.
- Resalto-hidráulico.
- Remanso.
- Caudales.



Figura 14. Pantalla principal software HCanales (Villón, 2013).

En las opciones de la barra de herramientas, se encuentran otras opciones, estas están relacionadas con la geometría del canal.

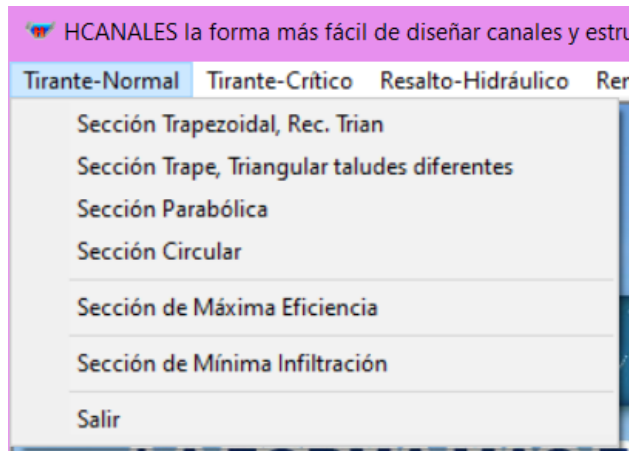


Figura 15. Opciones en la barra de opciones dependiendo de la geometría del canal (Villón, 2013).

El software HCanales está marcando una diferencia en cuanto a el diseño de canales, debido a que no solo alcanzo gran popularidad en Costa Rica, si no que, de igual manera en el resto de Latinoamérica, esto gracias a la divulgación.

## 7.6 Instrumentación y/o sensores adicionales al prototipo

Se conoce como sensor aquellos dispositivos que tienen la capacidad de detectar y medir diferentes tipos de variables ya sea químicas o físicas. Es importante mencionar que estos dispositivos pueden ser combinados con otros instrumentos esto con el objetivo de crear sistemas complejos e inteligentes, es común encontrar estos dispositivos en la industria.

Estos dispositivos son de gran importancia y claves para el desarrollo tecnológico y científico, ya que tienen como objetivo el brindar información sobre el ámbito donde son colocados y controlar ciertos procesos (Ramírez et al., 2024).

Calle S. en su documento de instrumentación y mediciones electrónicas nos menciona cuales son las características más importantes de los sensores:

### 1. Exactitud:

Esto debido a que la medición debe tener un valor relativamente alto, debido a la exactitud se debe tener un valor verdadero de la variable, este se debe detectar sin errores metódico.

### 2. Rango de medida:

Es importante contar con un rango de medida ya que esto servirá para tener en claro la magnitud en la cual puede ser aplicable es dispositivo.

### 3. Precisión:

Con esta característica se tiene en cuenta un valor de error máximo esperado.

### 4. Offset

También conocida como desviación cero, esto será el valor de la variable de salida cuando se tenga el caso de que la variable de entrada tiene un valor nulo.

### 5. Sensibilidad:

Cuando se habla de la sensibilidad de un sensor nos referimos a la relación que existe entre el valor de la magnitud de salida y, de entrada.

## 6. Rapidez de respuesta:

Si bien esta característica puede ser un tiempo determinado o bien puede depender de la variación al medir, esto va a depender de la capacidad de cada sistema.

## 7. Derivas:

Las derivas corresponden a otras variables además de las de entrada, sin embargo, estas si influyen en la variable de salida.

## Sensores ultrasónicos

Estos sensores funcionan con la emisión y recibimiento de ondas de sonido estas deben ser de alta frecuencia, es importante mencionar que dicha frecuencia se encuentra en el orden de aproximadamente 200kHz, esto está a un nivel que el oído no puede percibirlo.

Los sensores ultrasónicos tienen un funcionamiento similar al de los submarinos cuando emiten sonido, ya que estos expulsan un pulso ultrasónico hacia el objeto que se desea censar, cuando dicho pulso es detectado el tiempo es detenido por un contador que previamente fue iniciado cuando se produjo el pulso.

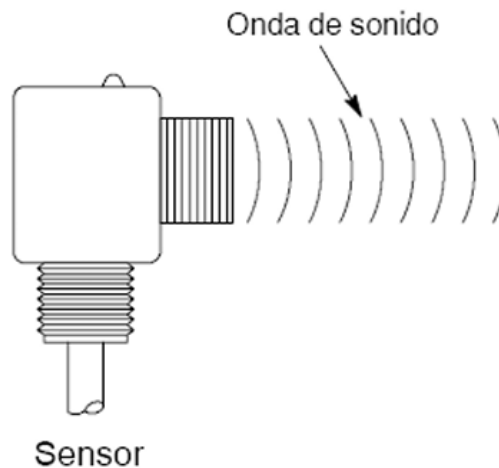


Figura 16. Funcionamiento de sensores de operación (Rosero y Simbaña, 2008).

Los sensores ultrasónicos tienen dos métodos de operación estos son:

### 1) Método opuesto:

“Propuesta para la elaboración del prototipo de un aforador tipo RBC como herramienta didáctica para la capacitación en medición de caudales con ayuda del software WinFlume”

Aquí el sensor es el encargado de la emisión de una onda de sonido mientras que del lado opuesto se encuentra el emisor, este es el encargado de recibir la onda de sonido.

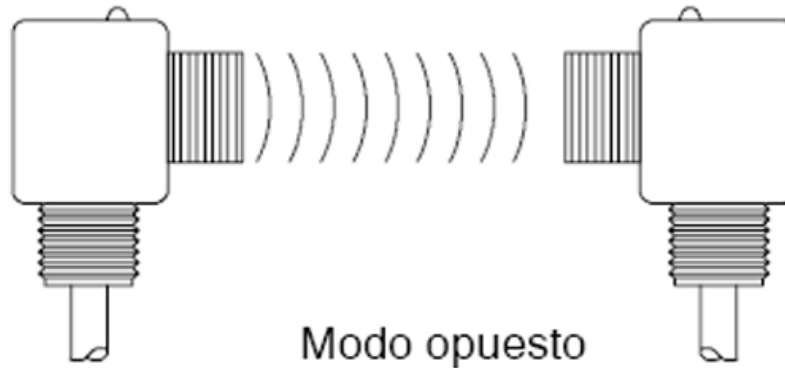


Figura 17. Método opuesto de operación en sensores ultrasónicos (Rosero y Simbaña, 2008).

## 2) Método difuso:

Este percibe una onda de eco para llegar al objeto que se quiere detectar.

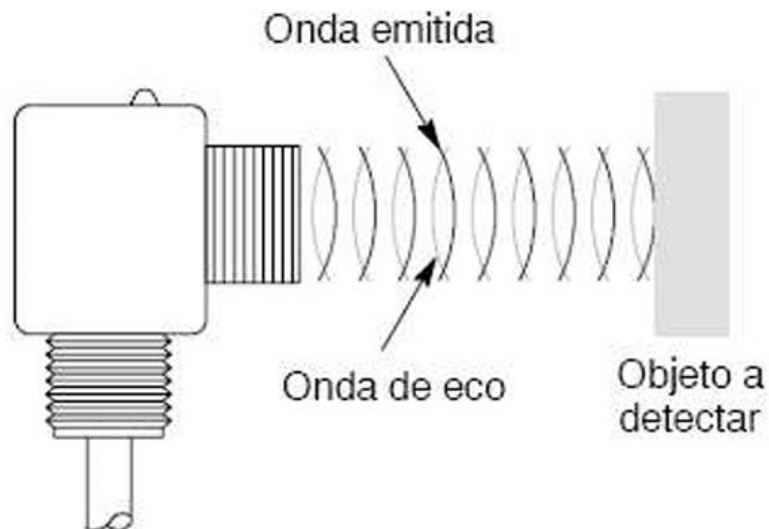


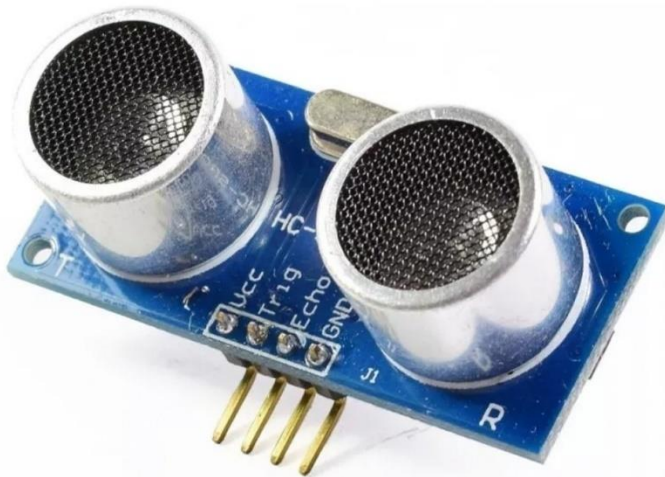
Figura 18. Método difuso de operación en sensores ultrasónicos (Rosero y Simbaña, 2008).

### **Sensor ultrasónico HC-SR04**

Copari nos menciona en su artículo que este sensor mide el nivel del agua, es popular por su bajo costo y lo fácil de instalar y usar. Su funcionamiento se basa en la utilización del sonido para que con ello pueda determinar la distancia que existe entre el sensor y la superficie del objeto, es importante mencionar que dicho sonido tiene una frecuencia muy cercana al oído.

Entre las especificaciones técnicas de este sensor se encuentran:

- Su fuente de alimentación es de +5V.
- Tiene una corriente de reposo  $<2\text{mA}$ .
- Corriente de trabajo de 15mA.
- El ángulo de trabajo de este dispositivo es de  $<15^\circ$ .
- La distancia de rango en la cual trabaja es de 24 m.
- Resolución de 0.3 cm.



*Figura 19. Sensor ultrasónico HC SR04 (Corapi et al., 2021).*

### **Sensores de presión**

Este tipo de sensores tienen una tecnología piezoresistiva, es decir, este presenta cambios en su resistencia al ser expuesto a una tensión, esto combinado con microcontroladores que serán los encargados de facilitar precisión y una fácil comunicación digital directa a una PC (Kenny, 2005).

“Propuesta para la elaboración del prototipo de un aforador tipo RBC como herramienta didáctica para la capacitación en medición de caudales con ayuda del software WinFlume”

### **Sensor de presión MPX5500DP**

Corapi utilizo este sensor en su investigación y nos menciona que está fabricado de silicio monolítico, su diseño facilita que este pueda ser utilizado en varias ramas. Este dispositivo es fácil de utilizar ya que puede ser combinado con un microcontrolador normalmente este tiene una entrada A/D.

Sus especificaciones técnicas son:

- Presión de trabajo en un rango de 0 a 500 kPa, o bien, de 0 a 72.5 psi).
- Tiene una corriente de 7mA.
- Voltaje de trabajo de 0.2 a 4.7 V.
- La exactitud en su funcionamiento es de 2.5%.
- Puede trabajar en un rango de temperaturas de -40°C a 125°C.
- Su error máximo es de 2.5% cuando se trabaja en un ángulo de 0° a 85°.



*Figura 20. Sensor de presión MPX5500DP (Corapi et al., 2021).*

## **Microcontroladores**

Los microcontroladores son circuitos integrados programables, tienen el objetivo de cumplir una función específica esta incluye en su interior al igual que una computadora 3 unidades funcionales:

1. CPU.
2. Memoria.
3. Puertos de entrada y salida.

En pocas palabras se habla de una computadora completa en un solo circuito integrado, este circuito se emplea como controlador, haciendo así que cumpla con su objetivo de realizar tareas específicas, sin embargo, tiene características limitadas al compararse con una computadora de escritorio (Cortes et al., 2009).

### ***Placa de Arduino Mega 2560***

Arduino es una plataforma electrónica que funciona mediante código abierto, está basada en el hardware y software libres.

Estas placas tienen la característica de poder leer mediante entradas, esto puede ser ya sea un sensor de luz, un mensaje de alguna red social, etc. Y posteriormente estas son convertidas en salidas, es decir, pueden activar motores, publicar cosas en línea o inclusive encender un foco led.

Las placas de Arduino pueden ser programadas y a su vez configuradas para la realización de diversas instrucciones, el software utilizado para su programación es Arduino (Corapi et al., 2021).

Entre sus características más importantes Corapi nos menciona:

- Cuenta con un microcontrolador ATmega2560.
- El voltaje en el cual opera es a 5V.
- Tensión de entrada en un rango de 7-12V.
- El límite en su voltaje de entrada es de 6V a 20V.
- Su memoria flash es de 256 kB, sin embargo, por el bootloader son usadas ya 8kB.

“Propuesta para la elaboración del prototipo de un aforador tipo RBC como herramienta didáctica para la capacitación en medición de caudales con ayuda del software WinFlume”

- Su SRAM es de 8kB.



Figura 21. Placa Arduino Mega 2560 (Corapi et al., 2021).

## 7.7 Normas mexicanas

Si bien una norma es toda regla de conducta que es obligatoria, en el país de México existen dos tipos, las normas mexicanas NMX y las normas oficiales mexicanas NOM.

Las normas mexicanas fueron creadas en el artículo 3, específicamente en el frac. X de la ley Federal sobre metrología, estas normas especifican ciertas características que los productos deben cumplir de acuerdo de sus cualidades, para saber si se cumplen dichas características incluyen los métodos de prueba para que con ello se determine su calidad, gracias a esto los productos se pueden diferenciar por su calidad y por su transparencia en las operaciones comerciales. Es importante mencionar que a diferencia de las NOM's las NMX son de carácter voluntario (Marín, 2019).

### NMX-AA-179-SCFI-2018

Esta norma lleva por nombre “Medición de volúmenes de aguas nacionales usados, explotados o aprovechados”, si bien, es la encargada de definir las características y especificaciones al momento de medir el caudal en canales abiertos.

El objetivo de esta norma se basa en que las mediciones de caudal sean precisas, y define las especificaciones que deben cumplir los instrumentos de medición de caudal, de igual manera trae ciertos criterios para la selección del medidor o sistema de medición.

Esta norma nos menciona los aforadores RBC, aquí se define sus parámetros, en su apéndice E nos habla de sus generalidades y la determinación del gasto instantáneo en este tipo de aforador, nos menciona de igual manera las condiciones que debe tener el instrumento para su operación y con ello los límites de su aplicación.

## **7.8 Aplicaciones en México del software WinFlume y aforador**

### **RBC**

A lo largo de los años el aforador RBC ha tomado un alto índice de popularidad, debido a que es económico y su instalación es fácil, de igual manera el software WinFlume debido a su instalación gratuita ha sido reconocido en diversas investigaciones, si bien, México no se queda atrás, ya que de igual manera hay diversos artículos donde se menciona el uso de estos.

Carrillo et al. (2017) en su artículo titulado “Diseño y construcción de seis canales de garganta larga para el distrito de riego número 33 del estado de México” en este proyecto se diseñaron tres aforadores de garganta larga, esto con el objetivo de mejorar la eficiencia en la medición, el diseño de estos aforadores se logró gracias a la utilización del software WinFlume 1.0, el resultado fue positivo ya que el funcionamiento de los aforadores fue apropiado no obstante a los canales se le hicieron modificaciones para una adecuada función, además, en este proyecto se incluyeron sensores que envían sus resultados por medio de la unidad de Telemetría Remota Satelital a una sede central; los resultados fueron satisfactorios.

Brigido et al. (2024) en su investigación para la modelación de tres aforadores para mínima sedimentación, en este trabajo se analizó el desempeño de los aforadores, estos fueron modificados para poder ser colocados en un canal supercrítico, de igual manera se utilizó el apoyo del software WinFlume en versión 1.06, cabe destacar

“Propuesta para la elaboración del prototipo de un aforador tipo RBC como herramienta didáctica para la capacitación en medición de caudales con ayuda del software WinFlume”

que estos aforadores se construyeron para un caudal máximo de 50 L/s. En dicha investigación se realizaron simulaciones para las secciones de diferentes geometrías entre ellas triangulares, rectangulares y trapezoidales, sin embargo, se hicieron comparaciones con las lecturas del software Iber, la comparación presento un error máximo del 3%. Los resultados en este trabajo fueron satisfactorios, sin embargo, debido a limitaciones se recomendó realizar investigaciones más detalladas respecto a este tema, con el objetivo de mejorar el desempeño.

Por último, Ramírez et al. (2010), en este artículo se ejecutó el diseño hidráulico de los aforadores RBC, el objetivo fue la elaboración de un sistema de cálculos hidráulicos, este sistema va de la mano del software WinFlume, la interacción hidráulica es un criterio de diseño, el resultado de dicha investigación fue un sistema interactivo que no solo es fácil de usar, si no, que también es rápido al diseñar.



# Capítulo 2



## Metodología



## 8. Metodología

### 8.1 Determinación de características geométricas e hidráulicas de canal rectangular mediante el software HCanales y ecuaciones propuestas.

Debido a que se propone que el prototipo sea didáctico y fácil de manipular, las medidas del canal se van a definir como sea más conveniente, ya que en base a estas se harán los cálculos para determinar sus características hidráulicas.

En el caso de esta propuesta, se plantea que las medidas del canal sean las siguientes:

- Largo 1.20 m
- Ancho 0.80 m
- Alto 0.50 m.

Ya que fueron establecidas las medidas para el canal rectangular, se deberá tener en cuenta que al colocar un aforador RBC el nivel de agua que permite transportar el máximo caudal con la mínima energía específica debe ser al menos 3-5 cm encima de la cresta, esto con el objetivo de que el flujo sea estable y medible, de igual manera no se puede tener un caudal bajo, ya que, si no apenas se cubrirá la garganta y con ello el nivel se vuelve irregular, es decir, se pueden generar pequeñas olas, flujo intermitente o aireación.

Teniendo en cuenta los criterios mencionados y la geometría del canal un caudal  $0.02 \text{ m}^3/\text{s}$  es un caudal mínimo ideal ya que también si se elige un rango más bajo no hay condiciones hidráulicas fiable.

Por otro lado el límite siempre lo va a definir la altura del canal en este caso 0.50 m, lo ideal sería tener una cresta de 0.47-0.48 m, para que con ello queden 3-2 cm libres de altura, si el caudal es grande que el tirante puede subir demasiado aguas arriba provocando rebasar la altura del canal, es decir desbordamiento o salir del rango de calibración del software WinFlume; es por ello que se propondrá como caudal máximo  $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$  ya que aproximadamente se espera que el tirante de aguas arriba llegue a 0.47-0.48 m. Se deberá tener en cuenta que no se exceda

“Propuesta para la elaboración del prototipo de un aforador tipo RBC como herramienta didáctica para la capacitación en medición de caudales con ayuda del software WinFlume”

este caudal ya que si este es el caso se pone en riesgo el prototipo y se pierde exactitud de medición.

Teniendo en cuenta los criterios para canales rectangulares y las medidas de este se calculó el tirante normal para cada uno de nuestros caudales, de acuerdo con:

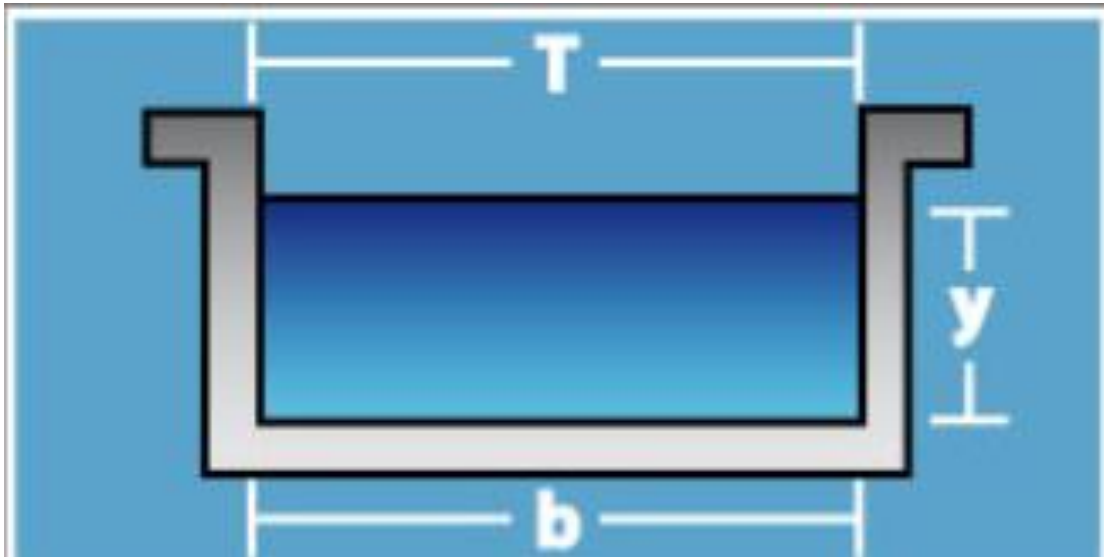


Figura 22. Representación canal rectangular (Villón, 2013).

Las fórmulas para calcular las características hidráulicas son las siguientes:

Área:

$$A = by$$

A=área

b=base

y=tirante

Perímetro mojado:

$$P = b + 2y$$

b=base

y=tirante

Radio hidráulico:

$$R_H = \frac{by}{b + 2y}$$

b=base

y=tirante

Las medidas del canal ya están establecidas, sin embargo, el tirante es desconocido, por lo que será la primera característica para calcular.

b=0.80 m

T=0.80 m

y=?

Se propone que el canal sea elaborado de acrílico, por ello su rugosidad  $n = 0.011$

Ahora, la ecuación para determinar el caudal es:

$$Q = V \times A$$

Q=caudal

V=velocidad.

A=área.

O bien:

$$Q = \frac{1}{n} \times A \times R_H^{\frac{2}{3}} \times S^{\frac{1}{2}}$$

Donde

Q= Caudal

n=rugosidad

A=área

“Propuesta para la elaboración del prototipo de un aforador tipo RBC como herramienta didáctica para la capacitación en medición de caudales con ayuda del software WinFlume”

$R_H$ =radio hidráulico

$S$ = pendiente

La pendiente recomendada para la elaboración del canal es 0.0001%, debido a que se necesita un perfil prácticamente plano.

Primero se determinaron las características hidráulicas para el  $Q_{mín} = 0.02 \frac{m^3}{s}$ , sustituyendo las ecuaciones y valores que ya se tienen del canal se tienen la siguiente expresión:

$$0.02 \frac{m^3}{s} = \frac{1}{0.011} \times 0.80y \times \left( \frac{0.80y}{0.80 + 2y} \right)^{\frac{2}{3}} + \sqrt{0.00001}$$
$$0.02 \frac{m^3}{s} = 0.287479 \times \left( \frac{0.8y^{\frac{5}{3}}}{(0.8 + 2y)^{\frac{2}{3}}} \right)$$

Esta ecuación debido a su complejidad debe ser resuelta iterando con Excel.

y	Q
0.1	0.004269950
0.12	0.005636843
0.14	0.007107011
0.16	0.008665841
0.18	0.010301606
0.2	0.012004717
0.22	0.013767216
0.24	0.015582418
0.26	0.017444655
0.28	0.019349075
0.3	0.021291496
0.32	0.023268287
0.34	0.025276280
0.36	0.027312694
0.38	0.029375078
0.4	0.031461259
0.42	0.033569305

Figura 23. Iteración de caudal mínimo mediante Excel (Elaboración propia a partir de Excel HCanales, 2025).

$$y_{\min} \approx 0.28 \text{ m}$$

Sucesivamente se hace el cálculo de las demás características reemplazando el valor de  $y_{\min}$  en las ecuaciones.

1. Área

$$A = by$$

$$A = (0.80\text{m})(0.28\text{m})$$

$$A \approx 0.224\text{m}^2$$

2. Perímetro mojado:

$$P = b + 2y$$

$$P = 0.80\text{m} + 2(0.28\text{m})$$

$$P \approx 1.36\text{m}$$

3. Radio hidráulico:

$$R_H = \frac{by}{b + 2y}$$

$$R_H = \frac{(0.80\text{m})(0.28\text{m})}{0.80 \text{ m} + 2(0.28\text{m})}$$

$$R_H \approx 0.1647 \text{ m}$$

4. Velocidad flujo:

$$V = \frac{Q}{A}$$

$$V = \frac{0.020 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0.224 \text{ m}^2}$$

$$V = 0.0892 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

## 5. Número de Fraude

$$F = \frac{V}{\sqrt{g \times D_H}}$$

$$D_H = \frac{A}{T}$$

Donde

V= velocidad.

g= aceleración de la gravedad

D<sub>H</sub>= Profundidad hidráulica

T=Espejo de agua

A=área

$$D_H = \frac{0.224m^2}{0.80m} = 0.28 m$$

$$F = \frac{0.0892 \frac{m}{s}}{\sqrt{9.81 \frac{m}{s^2} \times 0.28 m}}$$

$$F = 0.05$$

*F < 1 flujo subcritico*

Ahora bien, ya teniendo los cálculos para el flujo mínimo, se repite el cálculo para el

$$Q_{max} = 0.04 \frac{m^3}{s}$$

$$0.04 \frac{m^3}{s} = \frac{1}{0.011} \times 0.40y \times \left( \frac{0.80y}{0.80 + 2y} \right)^{\frac{2}{3}} + \sqrt{0.00001}$$

$$0.04 \frac{m^3}{s} = 0.287479 \times \left( \frac{0.8y^{\frac{5}{3}}}{(0.8 + 2y)^{\frac{2}{3}}} \right)$$

y	Q
0.1	0.004269950
0.12	0.005636843
0.14	0.007107011
0.16	0.008665841
0.18	0.010301606
0.2	0.012004717
0.22	0.013767216
0.24	0.015582418
0.26	0.017444655
0.28	0.019349075
0.3	0.021291496
0.32	0.023268287
0.34	0.025276280
0.36	0.027312694
0.38	0.029375078
0.4	0.031461259
0.42	0.033569305
0.44	0.035697492
0.46	0.037844275
0.48	0.040008265
0.5	0.042188211
0.52	0.044382980

Figura 24. Iteración de caudal máximo mediante Excel (Elaboración propia a partir de Excel, 2025).

$$y_{\text{máx}} \approx 0.48 \text{ m}$$

Se procedió al cálculo de las demás características.

Área

$$A = by$$

$$A = (0.80\text{m})(0.48\text{m})$$

$$A \approx 0.384 \text{ m}^2$$

Perímetro mojado:

$$P = b + 2y$$

$$P = 0.80\text{m} + 2(0.48\text{m})$$

$$P \approx 1.76\text{m}$$

Radio hidráulico:

“Propuesta para la elaboración del prototipo de un aforador tipo RBC como herramienta didáctica para la capacitación en medición de caudales con ayuda del software WinFlume”

$$R_H = \frac{by}{b + 2y}$$

$$R_H = \frac{(0.80m)(0.48m)}{0.80 m + 2(0.48m)}$$

$$R_H \approx 0.2181 m$$

Velocidad flujo:

$$V = \frac{Q}{A}$$

$$V = \frac{0.040 \frac{m^3}{s}}{0.384 m^2}$$

$$V = 0.10416 \frac{m}{s}$$

Número de Fraude

$$F = \frac{V}{\sqrt{g \times D_H}}$$

$$D_H = \frac{A}{T}$$

$$D_H = \frac{0.384m^2}{0.80m} = 0.48 m$$

$$F = \frac{0.10416 \frac{m}{s}}{\sqrt{9.81 \frac{m}{s^2} \times 0.48 m}}$$

$$F = 0.048$$

$$F < 1 \text{ flujo subcritico}$$

Sucesivamente se hacen los cálculos en el software HCanales, para esto primero debemos tener en claro que se está trabajando con un canal rectangular, por lo que debemos elegir el cálculo de tirante normal para esa geometría.



Figura 25. Selección de cálculo de tirante normal, en geometría rectangular (Elaboración propia a partir del software HCanales, 2025).

Ya teniendo la selección del cálculo, ponemos los datos requeridos, para los distintos caudales, es decir, para caudal máximo y caudal mínimo.

Lugar:	<input type="text" value="Puebla"/>	Proyecto:	<input type="text" value="Propuesta de protoripo"/>
Tramo:	<input type="text"/>	Revestimiento:	<input type="text" value="Acetato"/>

<b>Datos:</b>	
Caudal (Q):	<input type="text" value="0.020"/> m <sup>3</sup> /s
Ancho de solera (b):	<input type="text" value="0.80"/> m
Talud (Z):	<input type="text" value="0"/>
Rugosidad (n):	<input type="text" value="0.011"/>
Pendiente (S):	<input type="text" value="0.00001"/> m/m

Figura 26. Colocación de datos para cálculo de tirante normal en caudal mínimo en software HCanales (Elaboración propia a partir del software HCanales, 2025).

“Propuesta para la elaboración del prototipo de un aforador tipo RBC como herramienta didáctica para la capacitación en medición de caudales con ayuda del software WinFlume”

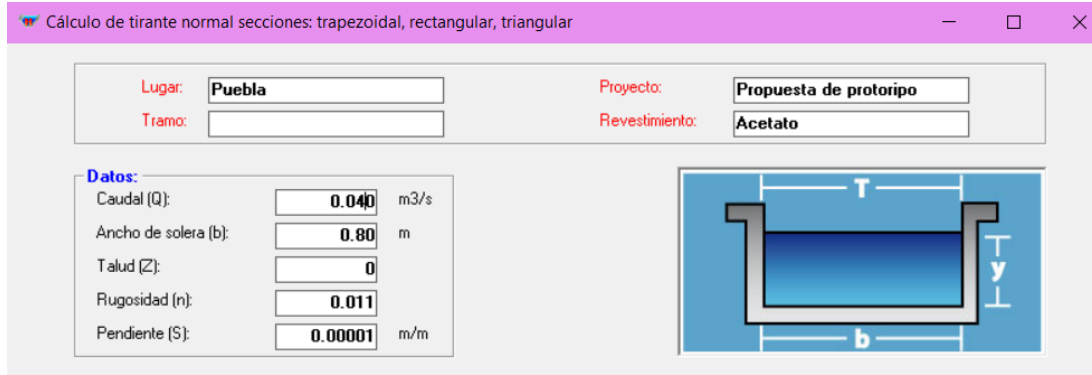


Figura 27. Colocación de datos para cálculo de tirante normal en caudal máximo en software HCanales (Elaboración propia a partir del software HCanales, 2025).

## 8.2. Calculo para el dimensionamiento del aforador RCB

Para el dimensionamiento del aforador RBC se utilizarán las tablas para el diseño simplificado, dichas tablas se publicaron por la USBR en el año 2001, en el manual de medición del agua.

Para este caso se usará la tabla que corresponde a la sección de garganta rectangular en canales, dicha tabla tiene medidas métricas.

$q = K_1(h_1 + K_2)^U$  where  $q$  is the unit discharge in  $m^3 s^{-1}$  per meter of throat width, and  $h_1$  is the sill referenced head in meters  
 $Q = qb_c$  where  $Q$  is the total discharge in  $m^3 s^{-1}$  and  $b_c$  is the throat width in meters

Parameters	$0.1 \leq b_c \leq 0.2 \text{ m}, L = 0.2 \text{ m}$			$0.2 \leq b_c \leq 0.3 \text{ m}, L = 0.35 \text{ m}$			$0.3 \leq b_c \leq 0.5 \text{ m}, L = 0.5 \text{ m}$		
	$p_1 = 0.05 \text{ m}$	$p_1 = 0.1 \text{ m}$	$p_1 = \infty$	$p_1 = 0.1 \text{ m}$	$p_1 = 0.2 \text{ m}$	$p_1 = \infty$	$p_1 = 0.1 \text{ ft}$	$p_1 = 0.2 \text{ ft}$	$p_1 = \infty$
$K_1$	2.449	2.194	1.817	2.271	2.012	1.744	2.276	2.017	1.731
$K_2$	0.0003	0	0	0.0014	0	0	0.0013	0.0007	0
$U$	1.608	1.581	1.530	1.612	1.562	1.517	1.615	1.574	1.517
$h_1$ , range	0.014–0.130	0.014–0.146	0.026–0.130	0.025–0.235	0.025–0.235	0.025–0.330	0.035–0.330	0.035–0.330	0.035–0.330
$q$ , range	0.003–0.092	0.003–0.091	0.003–0.079	0.006–0.221	0.006–0.200	0.006–0.192	0.011–0.381	0.011–0.353	0.011–0.353
$\Delta H$ , m	0.012	0.018	$0.4H_1$	0.025	0.030	$0.4H_1$	0.027	0.044	$0.4H_1$

Parameters	$0.5 \leq b_c \leq 1.0 \text{ m}, L = 0.75 \text{ m}$				$1.0 \leq b_c \leq 2.0 \text{ m}, L = 1.0 \text{ m}$			
	$p_1 = 0.1 \text{ m}$	$p_1 = 0.2 \text{ m}$	$p_1 = 0.3 \text{ m}$	$p_1 = \infty$	$p_1 = 0.2 \text{ m}$	$p_1 = 0.3 \text{ m}$	$p_1 = 0.4 \text{ m}$	$p_1 = \infty$
$K_1$	2.316	2.081	1.973	1.709	2.095	1.976	1.887	1.702
$K_2$	0.003	0.003	0.003	0	0.004	0.0027	0	0
$U$	1.641	1.611	1.594	1.516	1.627	1.598	1.560	1.519
$h_1$ , range	0.050–0.360	0.050–0.500	0.050–0.500	0.050–0.500	0.070–0.670	0.070–0.670	0.070–0.670	0.070–0.670
$q$ , range	0.019–0.438	0.018–0.689	0.018–0.660	0.018–0.595	0.030–1.110	0.030–1.059	0.030–1.028	0.030–0.925
$\Delta H$ , m	0.028	0.048	0.063	$0.4H_1$	0.046	0.066	0.086	$0.4H_1$

Parameters	$b_c \geq 2.0 \text{ m}, L = 1.5 \text{ m}$			
	$p_1 = 0.2 \text{ m}$	$p_1 = 0.4 \text{ m}$	$p_1 = 0.6 \text{ m}$	$p_1 = \infty$
$K_1$	2.108	1.933	1.854	1.677
$K_2$	0.005	0.007	0.006	0
$U$	1.641	1.618	1.596	1.540
$h_1$ , range	0.12–0.70	0.12–0.95	0.12–0.97	0.1–1.0
$q$ , range	0.067–1.20	0.067–1.80	0.067–1.80	0.051–1.689
$\Delta H$ , m	0.053	0.092	0.122	$0.4H_1$

$L_a = h_{1 \max}$  and  $L_b = 2$  to 3 times  $p_1$  and  $L_a + L_b = 2$  to 3 times  $h_{1 \max}$ .  
 $\Delta H = 0.1H_1$ , or value listed, whichever is greater, for flumes discharging into a rectangular tailwater channel of the same width as the crest,  $b_c$ .  
 $\Delta H = 0.4H_1$ , or value listed, whichever is greater, for flumes with an abrupt expansion into a tailwater channel wider than the crest width,  $b_c$ .

Figura 28. Tabla para el diseño simplificado del aforador RBC (USBR, 2001).

En esta tabla se observa un gráfico inferior, el cual contiene las medidas.

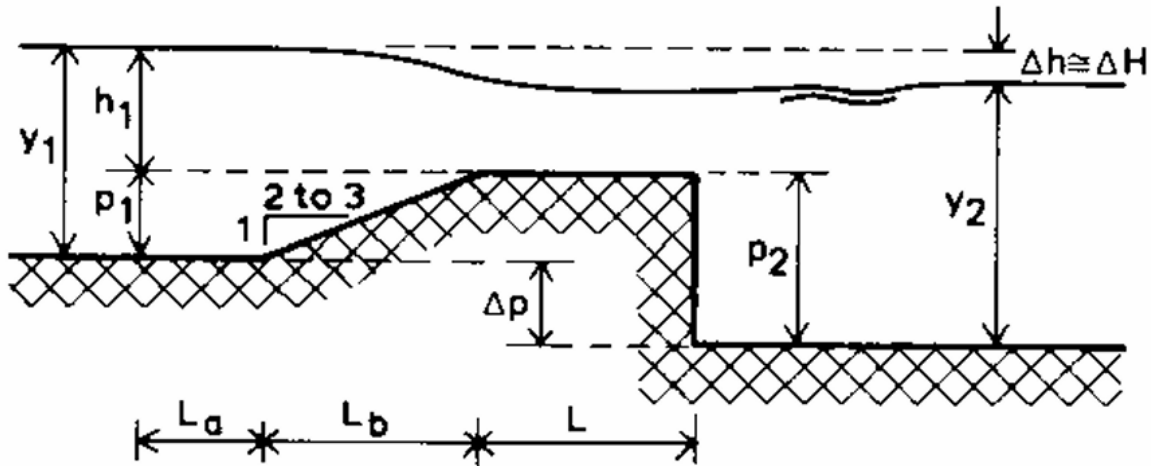


Figura 29. Gráfico de aforador RBC (USBR, 2001).

Una vez que se obtengan las medidas proporcionadas por la tabla, se deberán hacer los cálculos para el dimensionamiento de las demás partes del aforador RBC.

Se puede observar que contiene un corte longitudinal del aforador, el flujo del agua va dirección de izquierda a derecha, en la zona aguas arriba se observa la profundidad que tiene el flujo en la zona de medición de la regla, esto es la altura del escalón  $p_1$  desde el fondo hasta la parte superior del escalón esto más la cabeza de agua sobre el vertedero de pared gruesa  $h_1$ , cabe mencionar que  $P_1+h_1$  es igual a la profundidad aguas arriba del escalón del aforador, se debe recordar que el aforador contiene una regla limnimétrica, es importante mencionar que su ubicación es la distancia  $L_a$ , esto al inicio de la garganta y llegando al escalón de fondo, se puede observar que la longitud de la rampa se muestra como  $L_b$ , por último, la longitud de la garganta se representa como  $L$ .

La altura del flujo en el canal aguas abajo es  $y_2$ ,  $\Delta H$  es conocido como pérdida de carga a lo largo del aforador, en ocasiones en la salida se requiere dar mayor altura al escalón y que con ello exista  $\Delta P$  entre el fondo de la entrada y de salida del aforador, es importante mencionar que no siempre es así.

Ahora bien, en la tabla se tienen 3 de las dimensiones del aforador, 2 de ellas están en la representación y una de ellas corresponde a la planta.

Se determino el ancho de garganta apropiado para el rango de caudales, se usó ayuda de Excel.

Q <sub>máx</sub>	0.04	m <sup>3</sup> /s
Q <sub>min</sub>	0.02	m <sup>3</sup> /s
bc (m)	q <sub>min</sub> (m <sup>3</sup> /s)/m	q <sub>máx</sub> (m <sup>3</sup> /s)/m
0.1	0.2000	0.4000
0.15	0.1333	0.2667
0.2	0.1000	0.2000
0.25	0.0800	0.1600
0.3	0.0667	0.1333
0.35	0.0571	0.1143
0.4	0.0500	0.1000
0.45	0.0444	0.0889
0.5	0.0400	0.0800
0.55	0.0364	0.0727
0.6	0.0333	0.0667
0.65	0.0308	0.0615
0.7	0.0286	0.0571
0.75	0.0267	0.0533
0.8	0.0250	0.0500
0.85	0.0235	0.0471
0.9	0.0222	0.0444
0.95	0.0211	0.0421
1	0.0200	0.0400
1.05	0.0190	0.0381
1.1	0.0182	0.0364

Figura 30. Iteración para la determinación del ancho de garganta (Elaboración propia a partir de Excel, 2025).

De acuerdo con la iteración tenemos un rango de valores para el valor del ancho de garganta que son compatibles con el rango de caudales que se quieren medir, sin embargo, para definir el ancho de garganta hay otro aspecto importante a tomar en cuenta, esto es que la canaleta debe tener un ancho menor o igual al ancho al canal que se está aforando, nuestros valores son aptos si son menores de 0.80 m, se optó por utilizar el valor medio, por ello nuestro valor de  $b_c$  es 0.65 m, de acuerdo con la tabla para un ancho de garganta de 0.65 m la longitud tiene que ser 0.75 m, la tercera dimensión es la altura del escalón, para esa longitud puede ser 0.1m, 0.2 m y 0.3m, en este caso se decidió utilizar un valor intermedio, es decir 0.2 m.

Sucesivamente se determinaron las alturas  $H_1$  para ellos se utilizó la siguiente ecuación:

$$q = \frac{Q}{b_c} = k_1(h_1 + k_2)^u$$

Donde:

$q$ =caudal unitario.

$Q$ =Caudal total.

$b_c$ = ancho de garganta.

$h_1$ =altura de referencia.

Hay que recordar que se obtuvieron dos caudales unitarios, esto de acuerdo con la iteración realizada.

$$q_{\min} = 0.038 \frac{m^3}{s}$$

$$q_{\max} = 0.0615 \frac{m^3}{s}$$

Reemplazando dichos valores se obtiene:

$$0.038 \frac{m^3}{s} = 2.081(h_{1\min} + 0.003)^{1.611}$$

$$0.0615 \frac{m^3}{s} = 2.081(h_{1\min} + 0.003)^{1.611}$$

$$h_{1\min} = 0.08034 \text{ m}$$

$$h_{1\max} = 0.10937 \text{ m}$$

Continuamente se calculó el valor de:

$$y_{1\min} = h_{1\min} + P_1$$

$$y_{1\max} = h_{1\max} + P_1$$

Reemplazando los valores en la ecuación se tiene:

$$y_{1\min} = 0.08034 \text{ m} + 0.20 \text{ m}$$

“Propuesta para la elaboración del prototipo de un aforador tipo RBC como herramienta didáctica para la capacitación en medición de caudales con ayuda del software WinFlume”

$$y_{1\text{mín}} = 0.28034 \text{ m}$$

$$y_{1\text{máx}} = 0.10937 \text{ m} + 0.20 \text{ m}$$

$$y_{1\text{máx}} = 0.30937 \text{ m}$$

Se definieron algunas dimensiones adicionales que están en función de  $h_{1\text{máx}}$

$$L_a = h_{1\text{máx}} = 0.11 \text{ m}$$

$$L_b = 2P_1 = 0.22 \text{ m}$$

Por último, se hicieron hacer las verificaciones correspondientes

La primera verificación corresponde al borde libre, deben quedar por lo menos 0.05 cm de borde libre:

$$BL_{\text{mín}} = 0.05 \text{ m}$$

$$y_{1\text{máx}} = 0.30937 \text{ m}$$

$$D = 0.50 \text{ m}$$

$$D = y_{1\text{máx}} + B_L$$

$$BL = 0.50 - 0.30937 \text{ m}$$

$$BL = 0.1906 \text{ m}$$

Se corroboró que, si cumple, por lo tanto, esta verificado.

Por último, se hace la verificación encargada de corroborar el número de Froude en la zona limnimétrica, esto ya que es conveniente que el régimen sea subcrítico.

$$Fr = \frac{V_1}{\sqrt{gD_1}} < 0.50$$

$$V_1 = \frac{Q_{\text{máx}}}{A_1} = \frac{Q_{\text{máx}}}{b_c y_{1\text{máx}}}$$

$$V_1 = \frac{0.04 \frac{m^3}{s}}{0.65 m (0.30937 m)}$$

$$V_1 = 0.1989 \frac{m}{s}$$

$$D = y_{1m\acute{a}x} = 0.30937 m$$

$$Fr = \frac{0.1989 \frac{m}{s}}{\sqrt{\left(9.81 \frac{m}{s^2}\right) (0.30937)}} < 0.50$$

$$Fr = 0.1141 < 0.50$$

Se puede comprobar que se cumple la verificación.

### 8.3 Dimensionamiento del aforador en software WinFlume

Ya que tenemos el cálculo de las dimensiones del aforador, se procede a colocar los datos necesarios en el software WinFlume, primero se define uno de los cuatro criterios de diseño.

Para un correcto funcionamiento del aforador el número de Froude debe ser menos de 0.2 en una distancia aproximadamente 30 veces el valor de  $H_1$ , esto se tiene que especificar en el software WinFlume. (Bustamante, 2021).

De igual manera se deben cumplir la incertidumbre admisible en la medición del caudal, lo recomendable para el caudal mínimo es un 8% de incertidumbre, mientras que para el caudal máximo es un 4%, esto de igual manera debe colocarse en el programa, cabe mencionar, que debido a ser los valores recomendados el software WinFlume los coloca, sin embargo, es posible la modificación de estos valores.

Para mayor exactitud se coloca el intervalo de medición y la duración, esto es la totalización o promedio, en este caso se colocó de 1 segundo, todo lo mencionado puede observarse en la figura 30.

“Propuesta para la elaboración del prototipo de un aforador tipo RBC como herramienta didáctica para la capacitación en medición de caudales con ayuda del software WinFlume”

The screenshot shows the 'Head Measurement' tab in WinFlume. It includes three main sections: 'Head Measurement Method', 'Allowable Flow Measurement Uncertainty', and 'Totalizing or Averaging'. The 'Standard' method is selected with a staff gage in a stilling well and a friction coefficient of 0.2, resulting in an uncertainty of 0.005 m. The allowable uncertainty is set to 8.0% at minimum flow and 4.0% at maximum flow. The totalizing duration and measurement interval are both set to 1.0 seconds.

Figura 31. Criterio de número de Froude e incertidumbre en el software WinFlume. (Elaboración propia a partir del software WinFlume, 2025).

Ahora como se mencionó tenemos un caudal mínimo de  $0.020 \text{ m}^3/\text{s}$  y un caudal máximo de  $0.040 \text{ m}^3/\text{s}$  esto debe ser colocado en el software al igual que el método para determinar los tirantes de agua, en este caso el método utilizado es la ecuación de Manning cuando se conoce el valor de  $n$ , es decir, la rugosidad y la pendiente  $S$ .

The screenshot shows the 'Discharge & Tailwater' tab in WinFlume. It includes two main sections: 'Range of Flume Operation' and 'Tailwater Calculations'. The range of operation is set from a minimum flow of 0.02 m³/s to a maximum flow of 0.04 m³/s. The tailwater calculations use Manning's equation with a Manning's  $n$  of 0.011 and a bed slope of 0.001 m/m. A list of channel types is provided, including lined channels, excavated channels, and closed conduits.

Figura 32. Criterio de tirantes aguas abajo aceptables (Elaboración propia a partir del software WinFlume, 2025).

Al momento de colocar las dimensiones del canal en una vista frontal se debe tener en cuenta la geometría de este, que en el caso de la propuesta es rectangular, esto se especifica en el software, de igual manera se coloca el ancho del canal en la base.

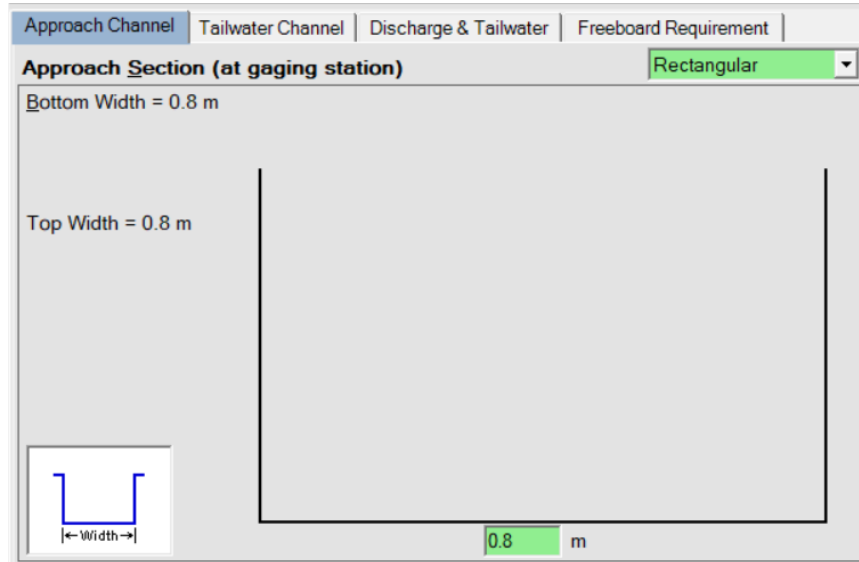


Figura 33. Dimensiones del canal en vista frontal (Elaboración propia a partir del software WinFlume, 2025).

En la sección de control al trabajar con un canal rectangular, la dimensión del ancho del canal es igual, aquí de igual manera se especifica la geometría rectangular.

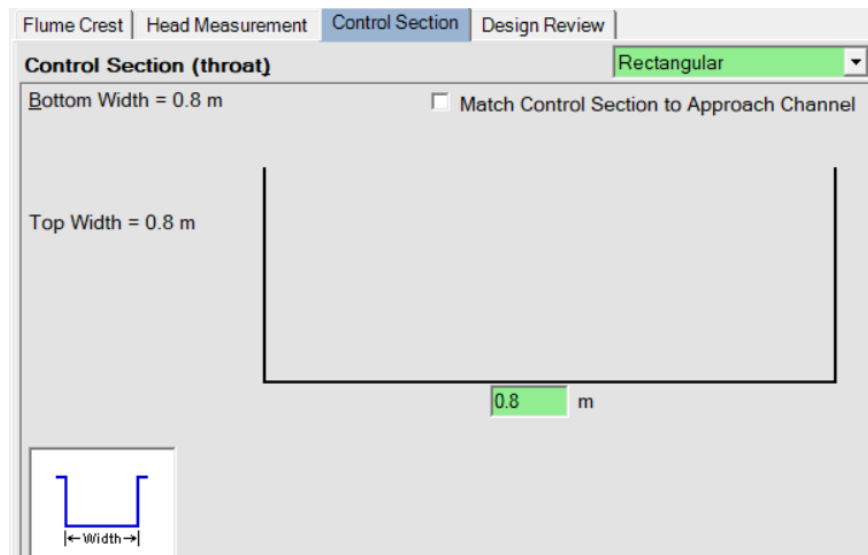


Figura 34. Dimensiones del canal en la sección de control (Elaboración propia a partir del software WinFlume, 2025).

“Propuesta para la elaboración del prototipo de un aforador tipo RBC como herramienta didáctica para la capacitación en medición de caudales con ayuda del software WinFlume”

Debido a la importancia de contar con una rampa de salida ya que se desea convertir la energía cinética en energía potencial, esto en aguas debajo de la garganta, teniendo esto en cuenta, se colocan las dimensiones para el desagüe y omitiendo una rampa de salida del diseño.

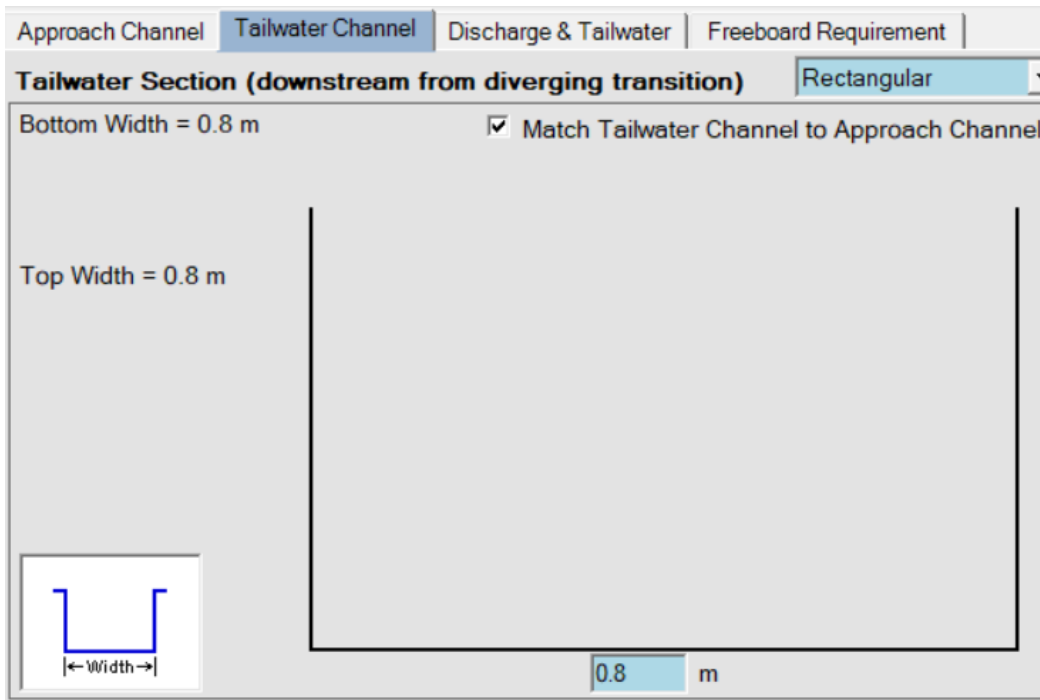


Figura 35. Dimensionamiento en canal de desagüe (Elaboración propia a partir del software WinFlume, 2025).

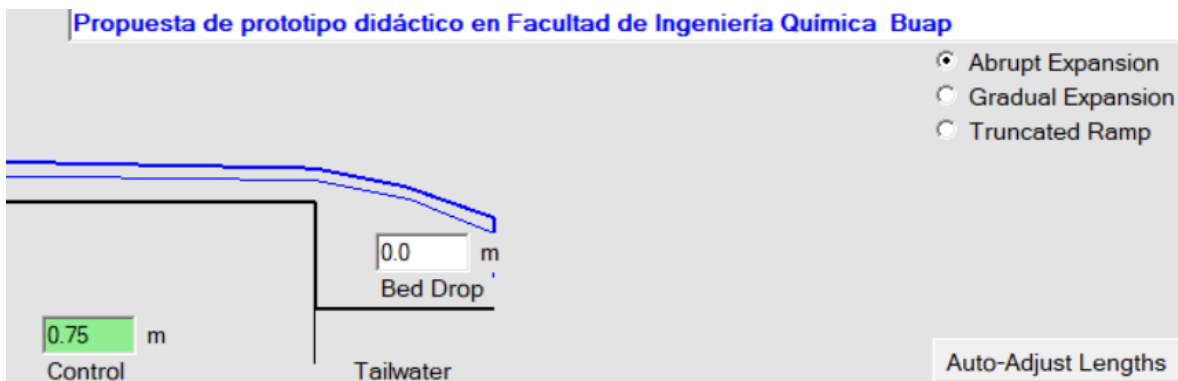


Figura 36. Eliminación de la rampa de salida en el canal de salida, esto es  $Bed Drop=0$  (Elaboración propia a partir del software WinFlume, 2025).

Por último, se colocan el dimensionamiento del aforador RBC, de acuerdo con los cálculos hechos anteriormente.

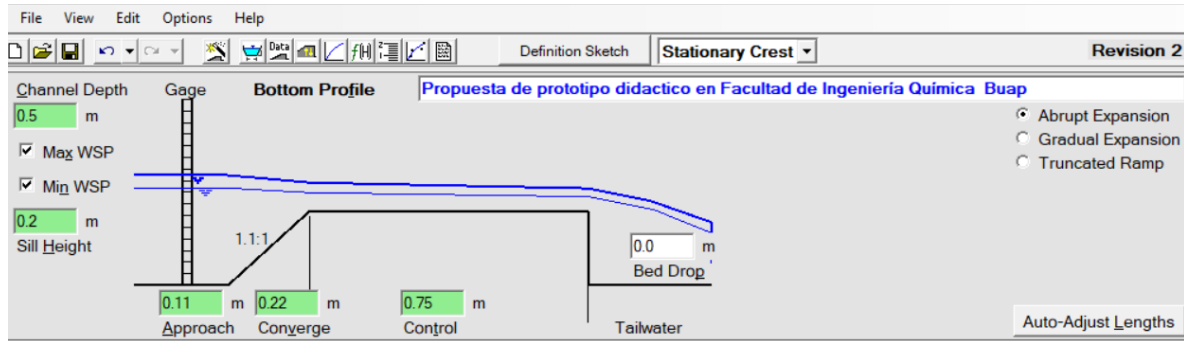


Figura 37. Dimensiones aforador RBC (Elaboración propia a partir del software WinFlume, 2025).

Una vez teniendo todas las dimensiones y criterios de diseño, se puede consultar el informe y la solución a la ecuación de Manning, junto con esto la gráfica Q vs H para ver cómo se comporta el prototipo, junto con esto se puede descargar el boceto de cada parte del aforador ya con sus dimensiones correspondientes.

#### 8.4. Diseño de la propuesta del prototipo en el software “AutoCAD” en vista 2D y 3D.

Una vez que el software “WinFlume” genero las tablas y graficas esperadas en el software “AutoCAD” se procederá al diseño del prototipo, esto en una vista 2D y 3D, este diseño se apegará lo más posible en la realidad

Para la elaboración se trabajó con unidades métricas, de igual manera con capas de diferente color para lograr diferenciar cada artículo.

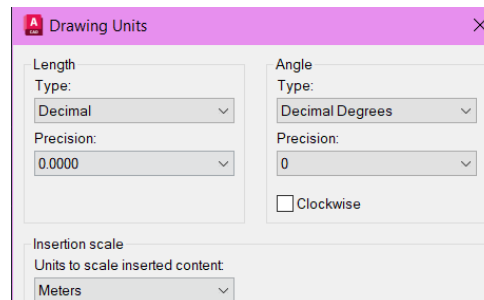


Figura 38. Elección de unidades métricas en software AutoCAD (Elaboración propia a partir del software AutoCAD, 2025).



Capítulo 3

Resultados y discusión



## 9. Resultados

Con el cálculo de las características hidráulicas, cuando hablamos del caudal mínimo, es decir,  $Q_{\min} = 0.02 \frac{m^3}{s}$ , el tirante resultante es:

$$y_{\min} \approx 0.28 \text{ m}$$

Sustituyendo este valor y dándole solución a las demás ecuaciones se tiene:

Área:

$$A = 0.224 \text{ m}^2$$

Perímetro mojado:

$$P \approx 1.36 \text{ m}$$

Radio hidráulico:

$$R_H \approx 0.1647 \text{ m}$$

Velocidad:

$$V = 0.0892 \frac{m}{s}$$

Número de Froude

$$F = 0.05$$

$$F < 1 \text{ flujo subcritico}$$

Por otro lado, cuando hablamos del caudal máximo, tenemos:

$$y_{\max} \approx 0.48 \text{ m}$$

Sustituyendo para darle solución a las demás características obtenemos:

Área:

$$A \approx 0.384 \text{ m}^2$$

Perímetro mojado:

$$P \approx 1.76m$$

Radio hidráulico:

$$R_H \approx 0.2181 m$$

Velocidad:

$$V = 0.10416 \frac{m}{s}$$

Número de Froude

$$F = 0.048$$

$$F < 1 \text{ flujo subcritico}$$

Con la solución de las ecuaciones tenemos las características geométricas e hidráulicas del canal rectangular, cuando se tienen diferentes caudales; estas son:

Caudal	Tirante normal (y)	Área hidráulica	perímetro	Radio hidráulico	Velocidad	No. Froude
<b>0.02 m<sup>3</sup>/s</b>	0.028 m	0.224 m <sup>2</sup>	1.36 m	0.1647 m	0.0892 m/s	0.05
<b>0.04 m<sup>3</sup>/s</b>	0.48 m	0.384 m <sup>2</sup>	1.76 m	0.2181 m	0.1041 m/s	0.048

Tabla 2. Características geométricas e hidráulicas del canal rectangular a partir de ecuaciones (Elaboración propia, 2025).

Como se puede observar las ecuaciones planteadas fueron suficientes para darle solución a las características geométricas e hidráulicas, sin embargo, ahora va la parte de comparación con el software HCanales.

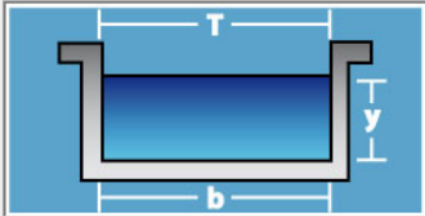
Con ayuda del software HCanales se obtiene:

“Propuesta para la elaboración del prototipo de un aforador tipo RBC como herramienta didáctica para la capacitación en medición de caudales con ayuda del software WinFlume”

Lugar:	<input type="text"/>	Proyecto:	<input type="text" value="Prototipo"/>
Tramo:	<input type="text"/>	Revestimiento:	<input type="text" value="Acrilico"/>

<b>Datos:</b>	
Caudal (Q):	<input type="text" value="0.04"/> m3/s
Ancho de solera (b):	<input type="text" value="0.8"/> m
Talud (Z):	<input type="text" value="0"/>
Rugosidad (n):	<input type="text" value="0.011"/>
Pendiente (S):	<input type="text" value=".00001"/> m/m

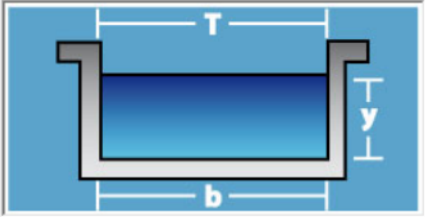
<b>Resultados:</b>			
Tirante normal (y):	<input type="text" value="0.4799"/> m	Perímetro (p):	<input type="text" value="1.7598"/> m
Área hidráulica (A):	<input type="text" value="0.3839"/> m <sup>2</sup>	Radio hidráulico (R):	<input type="text" value="0.2182"/> m
Espejo de agua (T):	<input type="text" value="0.8000"/> m	Velocidad (v):	<input type="text" value="0.1042"/> m/s
Número de Froude (F):	<input type="text" value="0.0480"/>	Energía específica (E):	<input type="text" value="0.4805"/> m-Kg/Kg
Tipo de flujo:	<input type="text" value="Subcrítico"/>		

Figura 39. Verificación de resultados para caudal máximo mediante software HCanales (Elaboración propia a partir del software HCanales, 2025).

Lugar:	<input type="text"/>	Proyecto:	<input type="text" value="Prototipo"/>
Tramo:	<input type="text"/>	Revestimiento:	<input type="text" value="Acrilico"/>

<b>Datos:</b>	
Caudal (Q):	<input type="text" value="0.020"/> m3/s
Ancho de solera (b):	<input type="text" value="0.80"/> m
Talud (Z):	<input type="text" value="0"/>
Rugosidad (n):	<input type="text" value="0.011"/>
Pendiente (S):	<input type="text" value="0.00001"/> m/m

<b>Resultados:</b>			
Tirante normal (y):	<input type="text" value="0.2867"/> m	Perímetro (p):	<input type="text" value="1.3735"/> m
Área hidráulica (A):	<input type="text" value="0.2294"/> m <sup>2</sup>	Radio hidráulico (R):	<input type="text" value="0.1670"/> m
Espejo de agua (T):	<input type="text" value="0.8000"/> m	Velocidad (v):	<input type="text" value="0.0872"/> m/s
Número de Froude (F):	<input type="text" value="0.0520"/>	Energía específica (E):	<input type="text" value="0.2871"/> m-Kg/Kg
Tipo de flujo:	<input type="text" value="Subcrítico"/>		

Figura 40. Verificación de resultados para caudal mínimo mediante software HCanales (Elaboración propia a partir del software HCanales, 2025).

Los resultados de forma simplificada se muestran en la tabla 3.

Caudal	Tirante normal (y)	Área hidráulica	perímetro	Radio hidráulico	Velocidad	No. Froude
<b>0.02 m<sup>3</sup>/s</b>	0.02867 m	0.2294 m <sup>2</sup>	1.3735 m	0.1670 m	0.0872 m/s	0.0520
<b>0.04 m<sup>3</sup>/s</b>	0.4799 m	0.3839 m <sup>2</sup>	1.7598 m	0.2182 m	0.1042 m/s	0.048

Tabla 3. Tabla 2. Características geométricas e hidráulicas del canal rectangular a partir de software HCanales (Elaboración propia, 2025).

Comparando los resultados se comprobó la similitud con ambos métodos, por lo que podemos decir que la ejecución de los cálculos fue correcta.

Una vez que se obtuvieron los resultados se calcularon las dimensiones en la zona de control del aforador RBC, se obtuvo lo siguiente:

Parte	Dimensión
<b>b<sub>c</sub></b>	0.65 m
<b>L</b>	0.75m
<b>P<sub>1</sub></b>	0.2 m

Tabla 4. Dimensionamiento de la zona de control del aforador RBC (Elaboración propia, 2025).

Los siguientes cálculos fueron a partir de ecuaciones, los resultados fueron los siguientes;

Parte del aforador	b <sub>c</sub>	L	P <sub>1</sub>	La	Lb
<b>Dimensión</b>	0.65	0.75	0.2	0.11	0.22

Tabla 5. Dimensiones para el aforador RBC (Elaboración propia, 2025).

“Propuesta para la elaboración del prototipo de un aforador tipo RBC como herramienta didáctica para la capacitación en medición de caudales con ayuda del software WinFlume”

Estas dimensiones se colocaron en el software WinFlume, una vez que el software nos dio luz verde aceptando estas dimensiones se obtienen las tablas y grafica deseadas.

Primero podemos observar un reporte en donde se nos muestran los valores de la altura en cierto punto de medición, se pueda observar que los valores de la descarga teórica tienen unidades de  $m^3/s$ , de igual manera se pueden apreciar los valores obtenido con la ecuación de descarga.

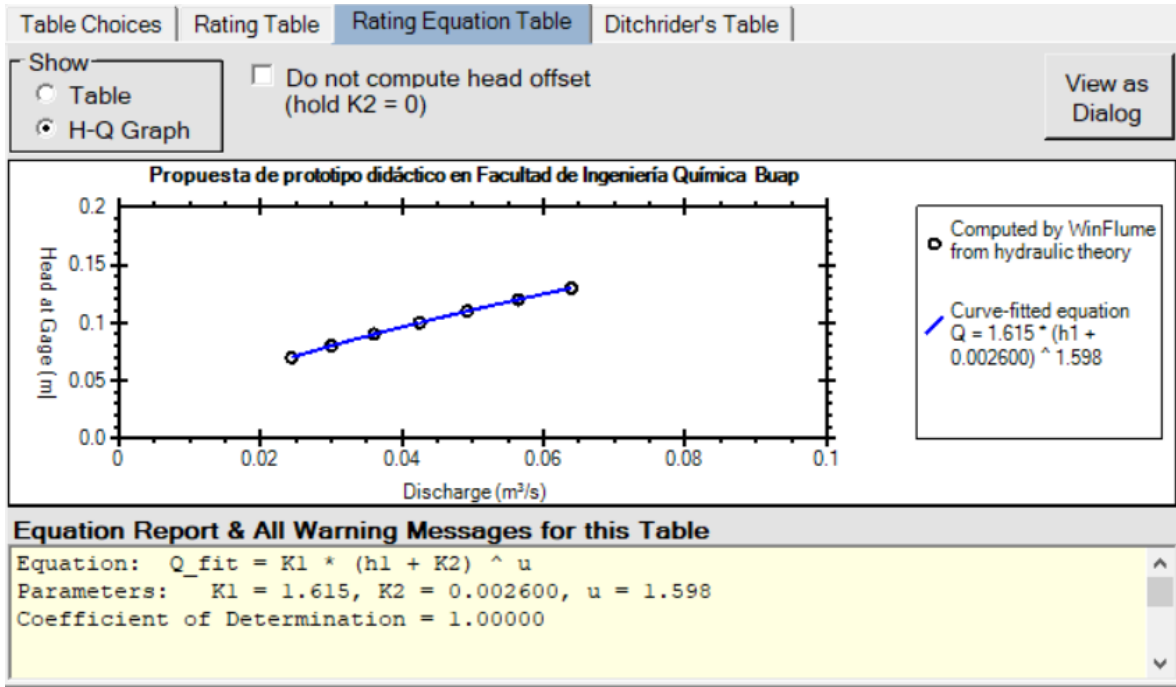
Sill Referenced Head at Gage $h_1$ (m)	Theoretical Discharge $Q$ ( $m^3/s$ )	Curve Fit Equation $Q_{fit}$ ( $m^3/s$ )	Difference $Q_{fit} - Q$ $D$ ( $m^3/s$ )	Difference $D/Q * 100$ (%)	Warnings
0.070	0.024	0.024	0.000	0.027	10
0.080	0.030	0.030	0.000	-0.012	10
0.090	0.036	0.036	0.000	-0.018	10
0.100	0.042	0.042	0.000	-0.017	10
0.110	0.049	0.049	0.000	-0.003	10, 12
0.120	0.056	0.056	0.000	0.006	10, 12

**Equation Report & All Warning Messages for this Table**

Equation:  $Q_{fit} = K_1 * (h_1 + K_2)^u$   
 Parameters:  $K_1 = 1.615$ ,  $K_2 = 0.002600$ ,  $u = 1.598$   
 Coefficient of Determination = 1.00000

Figura 41. Valores proporcionados por la ecuación que maneja el comportamiento del sistema (Elaboración propia a partir del software WinFlume, 2025).

Una vez obtenida la tabla se consiguió la gráfica que es resultado de la misma ecuación generada, en esta gráfica se muestra en el eje de las abscisas se tiene al caudal en  $m^3/s$ , mientras que en el eje de las ordenadas tenemos la altura de medición en metros. Se puede observar que a medida que el caudal aumenta se tiene un comportamiento lineal.



Gráfica 2. Gráfica que define el comportamiento del sistema (Elaboración propia a partir del software WinFlume, 2025).

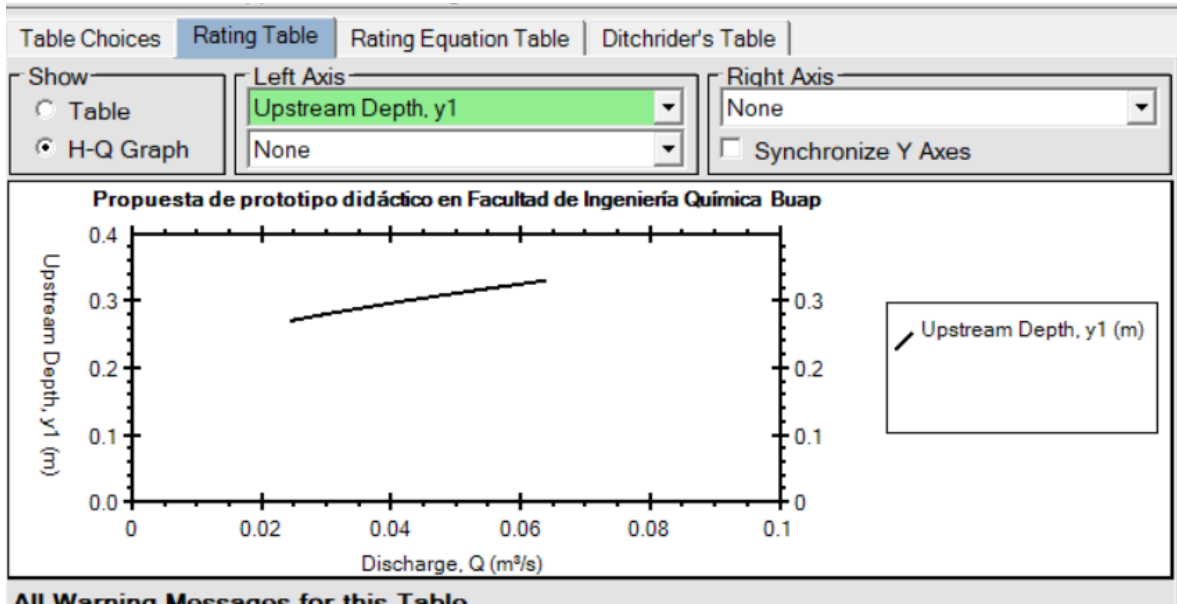
A continuación, se puede ver la tabla generada por el software WinFlume, esta tabla muestra cada característica en cada instante.

Head at Gage h1 (m)	Discharge Q (m <sup>3</sup> /s)	Warnings	Froude Number Fr	Required Head Loss H1-H2 (m)	Head to Crest Length Ratio H1/L	Upstream Energy Head H1 (m)
0.070	0.024	10	0.069	0.019	0.094	0.071
0.080	0.030	10	0.081	0.021	0.108	0.081
0.090	0.036	10	0.092	0.023	0.122	0.091
0.100	0.042	10	0.103	0.024	0.136	0.102
0.110	0.049	10, 12	0.114	0.026	0.149	0.112
0.120	0.056	10, 12	0.124	0.027	0.163	0.123
0.130	0.064	10, 12	0.135	0.028	0.177	0.133

Figura 42. Opciones de tabla de datos (Elaboración propia a partir del software WinFlume, 2025).

“Propuesta para la elaboración del prototipo de un aforador tipo RBC como herramienta didáctica para la capacitación en medición de caudales con ayuda del software WinFlume”

Con la obtención de esta gráfica, se elabora la su gráfica, dicha grafica muestra la respuesta de caudal con relación a la altura en el punto de medición, esto simboliza el comportamiento del sistema dentro de los valores de caudal.



Gráfica 3. Comportamiento del caudal en función de la altura (Elaboración propia a partir del software WinFlume, 2025).

Para finalizar el reporte proporcionado por el software WinFlume muestra los dibujos del diseño del aforador con sus respectivas dimensiones.

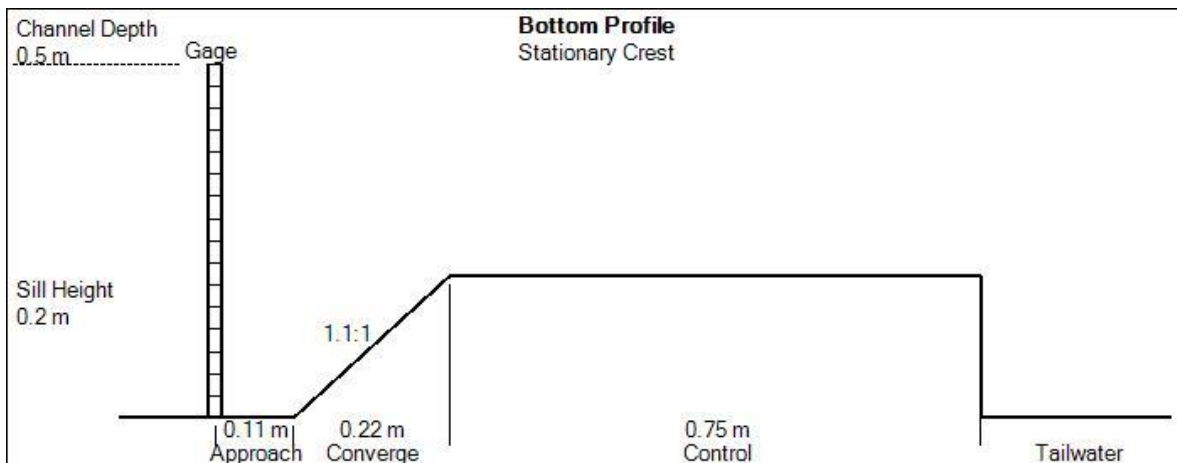


Figura 43. Perfil de fondo con dimensiones (Elaboración propia a partir del software WinFlume, 2025).

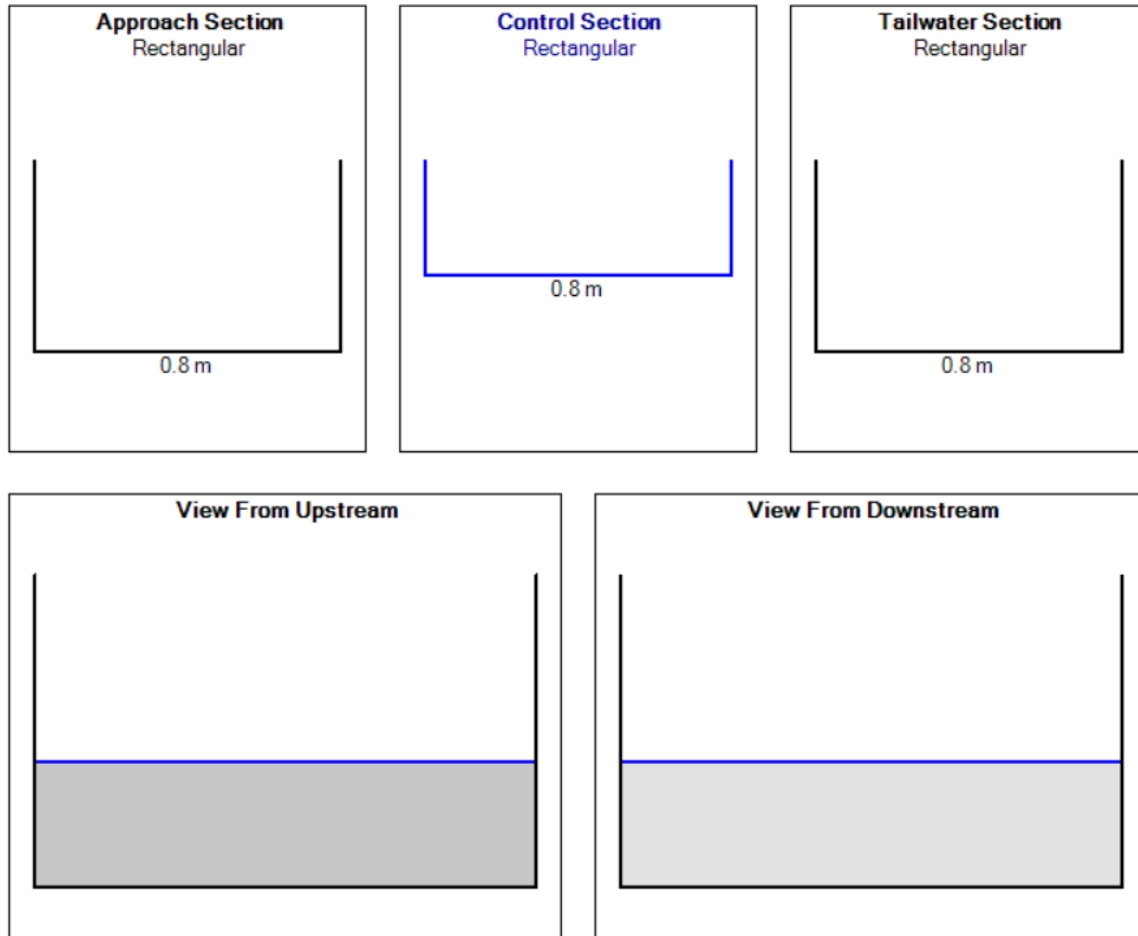


Figura 44. Dimensiones (Elaboración propia a partir del software WinFlume, 2025).

Por último, se hace el diseño del prototipo en el software AutoCAD, el diseño debe ser en 2D y 3D.

Lo primero que se diseñó en el software fue el canal con las medidas ya establecidas:

- Largo 1.20 m
- Ancho 0.80 m
- Alto 0.50 m.

Como se mencionó el material destinado es de acrílico, por lo que en su vista 3D se colocó ese material.

“Propuesta para la elaboración del prototipo de un aforador tipo RBC como herramienta didáctica para la capacitación en medición de caudales con ayuda del software WinFlume”

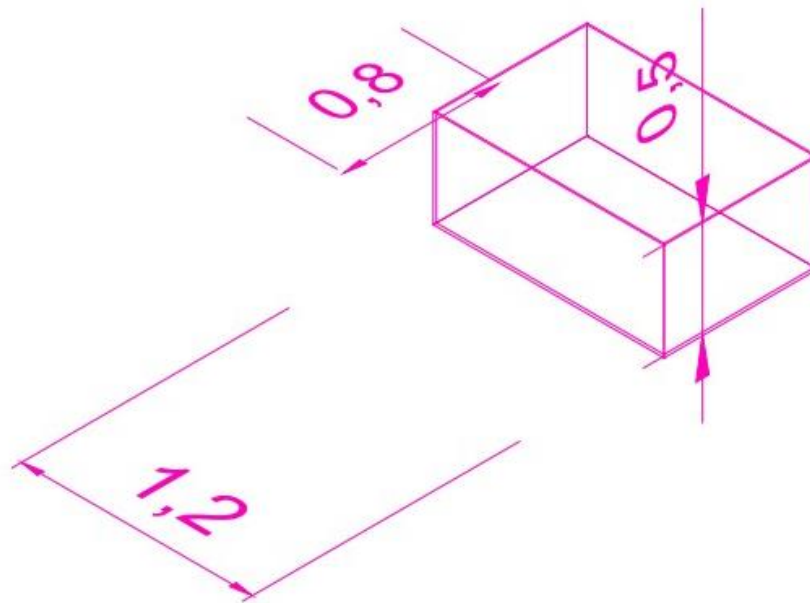
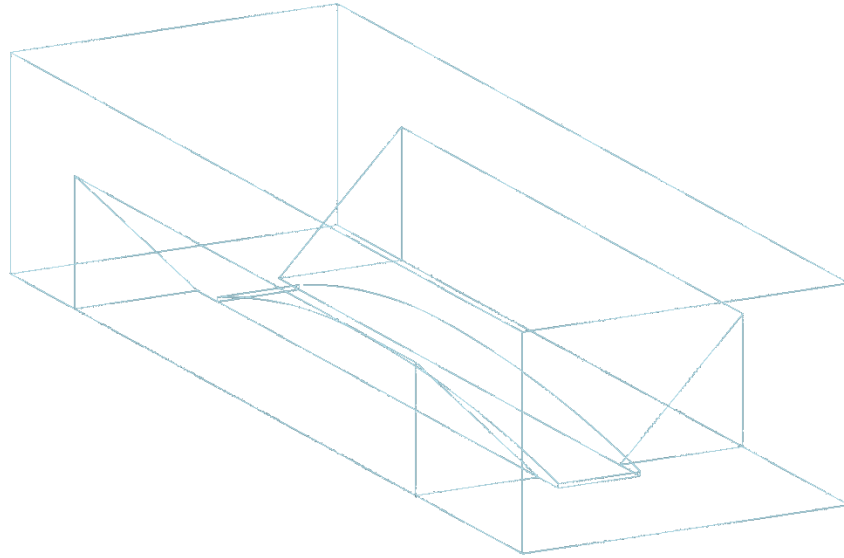


Figura 45. Prototipo de canal en 2D (Elaboración propia a partir del software AutoCAD, 2025).

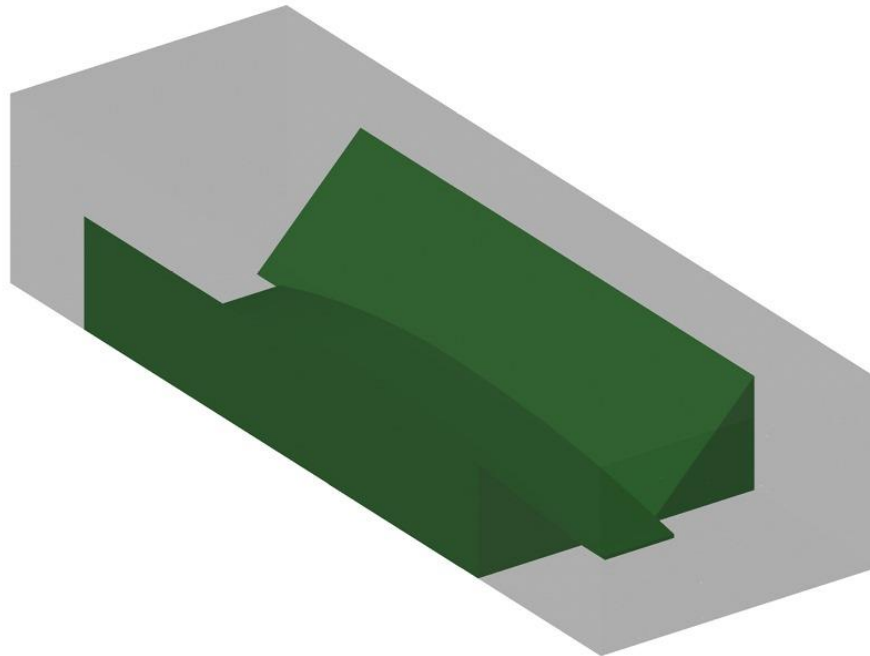


Figura 46. Prototipo de canal en 3D con material de acetato (Elaboración propia a partir del software AutoCAD, 2025).

Lo siguiente que se diseñó fue el aforador RBC, este colocado ya dentro del canal, este se diseñó con las dimensiones que fueron calculadas anteriormente.



*Figura 47. Prototipo de canal con aforador RBC en 2D (Elaboración propia a partir del software AutoCAD, 2025).*



*Figura 48. Prototipo de canal con aforador RBC en 3D (Elaboración propia a partir del software AutoCAD, 2025).*

“Propuesta para la elaboración del prototipo de un aforador tipo RBC como herramienta didáctica para la capacitación en medición de caudales con ayuda del software WinFlume”

De igual manera se elaboraron los sensores que están considerados en la propuesta de este prototipo, estos son:

- Sensor de presión MPX5500DP
- Sensor ultrasónico HC-SR04
- Placa de Arduino Mega 2560

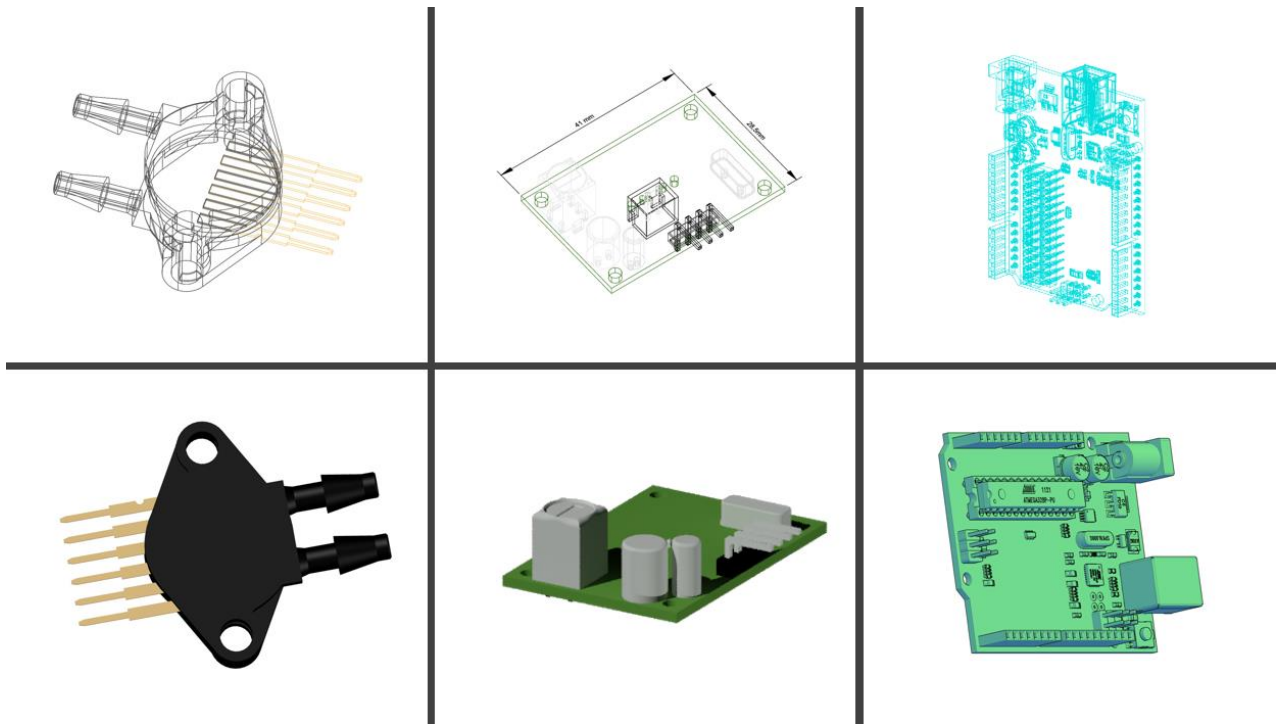


Figura 49. Diseño de sensores para prototipo (Elaboración propia a partir del software AutoCAD, 2025).

Finalmente se realizó la elaboración de todo el prototipo didáctico que se está planteando, para tener como resultado lo siguiente:

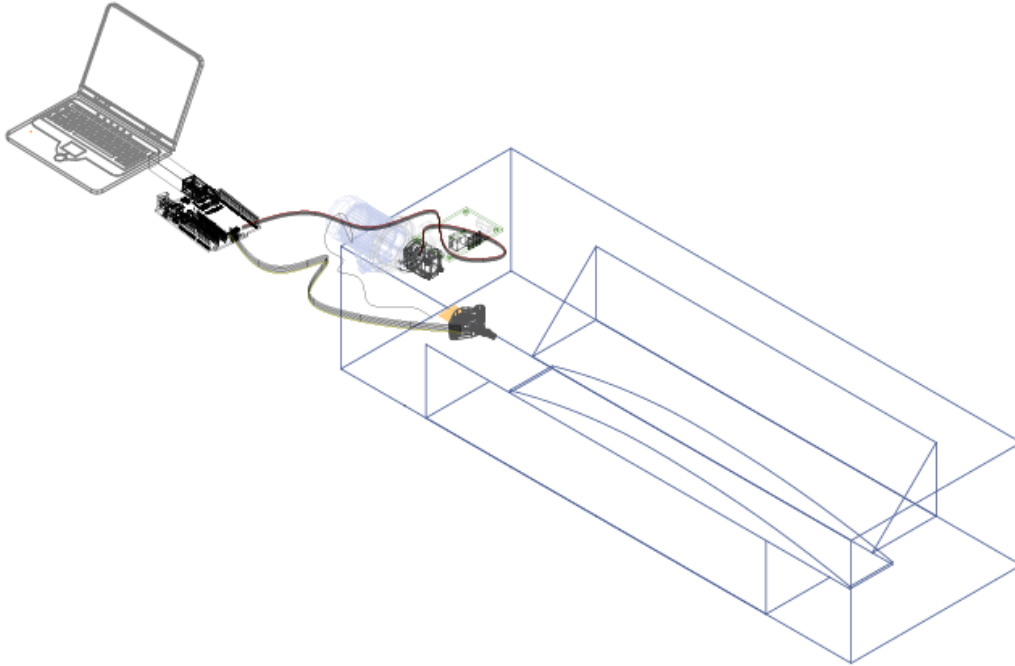


Figura 50. Prototipo elaborado en vista 2D (Elaboración propia a partir de software AutoCAD, 2025).

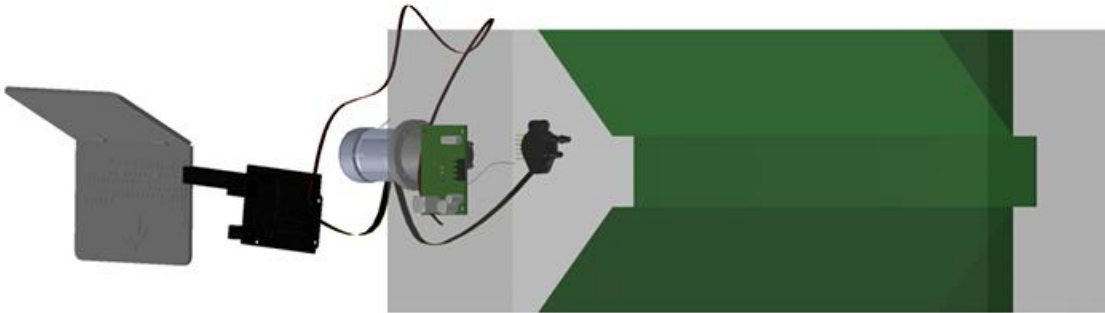
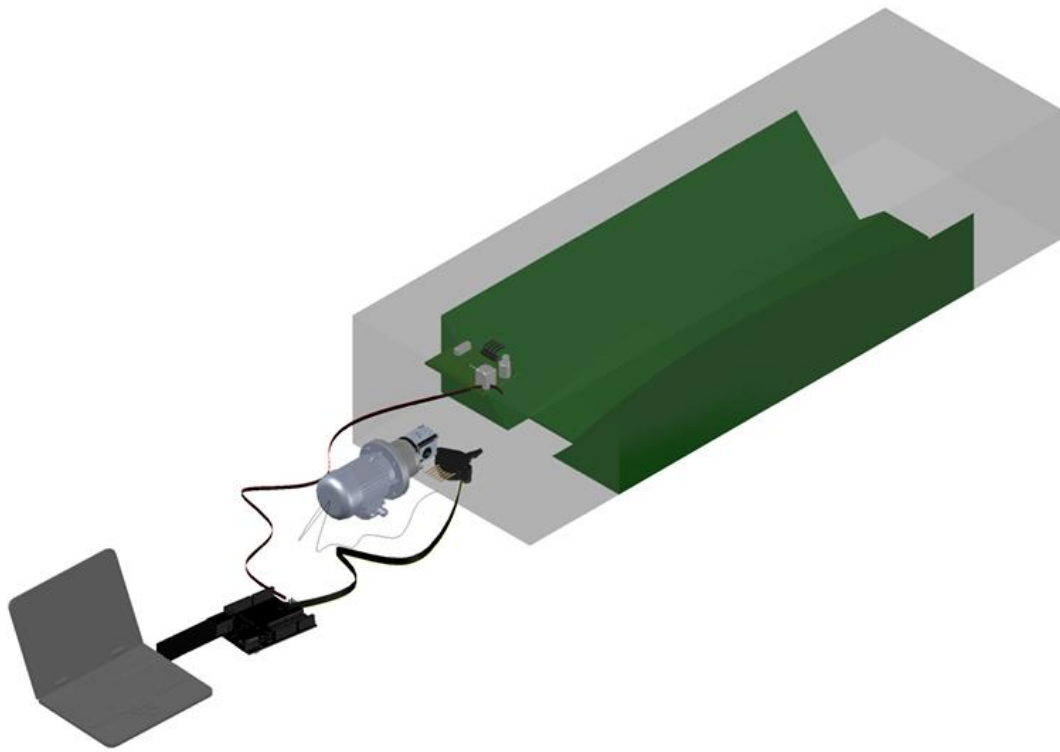


Figura 51. Prototipo elaborado en vista 3D (Elaboración propia a partir de software AutoCAD, 2025).

“Propuesta para la elaboración del prototipo de un aforador tipo RBC como herramienta didáctica para la capacitación en medición de caudales con ayuda del software WinFlume”



*Figura 52. Figura 51. Prototipo elaborado en vista 3D otra vista (Elaboración propia a partir de software AutoCAD, 2025).*

## 10. Discusión

En la década de 1980 se creó el aforador RBC a lo largo de los años el uso de este se ha popularizado gracias a su bajo costo y lo fácil que es de instalar, es común reemplazar el aforador Parshall por uno RBC, debido a que su precio es menor en un 10-20% aproximadamente, comparado con otras investigaciones, en el presente trabajo se plantea la propuesta para la elaboración del prototipo de un aforador RBC este siendo enfocado para su utilización como una herramienta didáctica, además, este se complementa con herramientas de simulación y diseño como es el caso del software WinFlume, HCanales y AutoCAD.

El software WinFlume ha sido utilizado como auxiliar en investigaciones en temas de hidráulica, específicamente cuando hablamos de un canal y un aforador, sin embargo, los aportes en el ámbito de la docencia son limitados, por lo que esta propuesta se enfoca en brindar una herramienta de apoyo para la enseñanza, con ello los estudiantes podrán relacionar los conocimientos teóricos con los prácticos permitiendo que analicen y comprendan el comportamiento de un fluido sin necesidad de contar con equipo especializado y de precios elevados, como es el caso de los equipos de operaciones unitarias.

Al determinar las características geométricas e hidráulicas del canal rectangular se obtuvieron resultados satisfactorios, se cumplieron los criterios de diseño, al momento de calcular el tirante normal cuando tenemos un caudal máximo se obtuvo como resultado 0.47 m, con ello se respeta que el límite para la cresta que debía estar en un rango de 0.47-0.48 m.

Al obtener resultados  $< 0.2$  del número de Froude se comprobó lo establecido por Bustamante (2021) en su tesis "Diseño del aforador tipo RBC en el sector hidráulico menor Chira-Capilla Alta, empleando el software WinFlume" ya que al tener el número de Froude en el caudal máximo igual a 0.048 y en el caudal mínimo igual a 0.052 se garantizó un correcto funcionamiento del aforador. Al realizar el cálculo teórico se comprobó que la selección de la pendiente ( $S=0.00001$ ) fue la correcta,

ya que esta permitió mantener una velocidad uniforme y como consecuencia se tiene un flujo estable, evitando así turbulencias.

El programa HCanales no solo facilito el cálculo de las características geométricas e hidráulicas, si no que nos brindó una herramienta de verificación comparando sus resultados con los obtenidos mediante ecuaciones teórica, al compararlos los resultados presentaban una diferencia  $<2\%$ , con ello se confirmó la eficiencia del software.

Al hacer el dimensionamiento del aforador RBC los resultados fueron satisfactorios, ya que la dimensión del largo no supera el 1.20 m de largo de nuestro canal, dichas dimensiones cumplen con los parámetros del apéndice E de la NMX-AA-179-SCFI-2018, no obstante, las dimensiones fueron validadas hasta ser colocadas en el software WinFlume en donde se obtuvieron las gráficas Q vs h, en donde se muestra la relación con las dimensiones calculadas teóricamente.

El modelo planteado en la propuesta de acuerdo con los resultados muestra coherencia y un flujo estable, ya que se evitan turbulencias, al momento de diseñar el prototipo en el software AutoCAD nos brindó una idea más clara de la geometría del canal, esto ayudo a tener en claro una ubicación correcta de los sensores propuestos, con el fin de no desviarse de la idea principal la cual es que este prototipo sea didáctico, esto para fines educativos.

A pesar de tener resultados satisfactorios se tuvo una limitante, esta es que no se tuvo la oportunidad de ejecutar pruebas experimentales debido a que el prototipo no se construyó, sin embargo, gracias al diseño digital se tuvo una herramienta para un análisis teorico, cabe destacar que en un futuro se propone la construcción del prototipo ya que esto abre la puertas a más campos de estudio.

Debido a los resultados favorables no solo se puede demostrar que la incorporación de prototipos en la enseñanza en temas de hidráulica permite a los estudiantes la relación de los conceptos teóricos con los prácticos, sino que también expone que la propuesta planteada es un proyecto con oportunidades futuras.

## 11. Conclusiones

- Con base a la referencia bibliográfica se logró constatar que el aforador RBC es el aforador más conveniente y fácil de usar, no solo por su capacidad de adaptarse a una gran variedad de formas, sino también porque puede ser utilizado en zonas revestidas o no revestidas, este dispositivo puede medir un extenso rango de descargas. Este dispositivo es de bajo costo y puede ser construido por una gran variedad de materiales.
- Con la presente investigación se demostró la importancia de la implementación de materiales didácticos para la enseñanza en temas de hidráulica, ya que con ello el estudiante tendrá la capacidad de relacionar los conceptos teórico con lo práctico.
- A pesar de ser utilizado en diversas investigaciones internacionales y nacionales el software WinFlume sigue teniendo un uso limitado en el ámbito académico, puesto que no es muy conocido y muchos estudiantes no tienen conocimiento de que el acceso a este es completamente gratuito y no solo permite entender el comportamiento del flujo, sino también ayuda al diseño o rediseño a un aforador existente.
- La aplicación de las diferentes herramientas de simulación ayuda a perfeccionar los recursos educativos para tener una mayor precisión en el estudio de los diversos temas y así ahorrar al estudiante tiempo en los cálculos o diseños esperados.
- Los resultados obtenidos en esta investigación brindan las bases para una futura construcción del prototipo didáctico.

“Propuesta para la elaboración del prototipo de un aforador tipo RBC como herramienta didáctica para la capacitación en medición de caudales con ayuda del software WinFlume”

- La propuesta planteada sirve como guía para la elección de materiales, sensores y dimensiones, haciendo que el prototipo pueda construirse en un futuro en diferentes escalas dependiendo del caudal al cual se quiere trabajar.

## 12. Bibliografía

- Bos, M. (1989). *Discharge Measurement Structures*. Third edition revised. Publication 20. International Institute for Land Reclamation and Improvement, PO Box 45, 6700 AA Wageningen, The Netherlands, 401 pp.
- Brigido, J., Carrillo, M., Prado, J., y Flores, J. (2024). Modelación hidráulica de tres aforadores para mínima sedimentación. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15(1). <https://doi.org/10.29312/remexca.v15i1.3317>
- Bureau of Reclamation (2020). WinFlume (2.0) [Software de computación]. Bureau of Reclamation. <https://www.ars.usda.gov/research/software/>
- Bustamante, D. (2021). Diseño del aforador tipo RBC en el sector hidráulico menor Chira-Capilla Alta, empleando el software WinFlume [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria la Molina].
- Calle, S. (30 de septiembre de 2011). *Instrumentación y mediciones electrónicas: Sensores*. Slideshare. <https://es.slideshare.net/slideshow/tipos-de-sensores-27429965/27429965#12>
- Carrillo, M., Gómez, Y., Navarro, H., Prado, J., & Arellano, R., (2017). Design and construction of six long-throated flumes for irrigation district number 33 in the state of Mexico. *2017 ASABE Annual International Meeting*. <https://doi.org/10.13031/aim.201700748>
- Clemmens, A. J., Bos, M. G., & Replage, J. A. (1984). Portable RBC flumes for furrows and earthen channels. *Transactions of the ASAE*, 27(4), 1016-1021. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.32915>
- Clemmens, A. J., Bos, M. G., & Replage, J. A. (1986). *Flow measuring flumes for open channel systems* (Vol. 1). International Institute for Land Reclamation and Improvement.

- Clemmens, A. J., Wahl, T. L., Bos, M. G., & Replogle, J. A. (2001). Water measurement with flumes and weirs (ILRI Publication 58). International Institute for Land Reclamation and Improvement.
- Comisión Nacional del Agua. (2025). ¿Por qué es tan importante la tecnificación del riego en México? gov.mx. <https://www.gob.mx/conagua/es/articulos/por-que-es-tan-importante-la-tecnificacion-del-riego-en-mexico?idiom=es>
- Coordinación de Estudios de la Dirección General de Infraestructura Agraria y Riego. (2015). *Manual N° 5 Medición de agua*.
- Corapi, P., Chacón, X., Nieto, J., y Bajaña, W. (2021) Sistema de monitoreo de caudal y tirante para el Laboratorio Piloto de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas. *Investigación, Tecnología e Innovación*, 13(14), 1-17. <https://doi.org/https://doi.org/10.53591/iti.v13i14.1305>
- Cornejo, J. y García, H. (2022). *Uso del simulador PhET en la demostración de la ecuación de continuidad en forma diferencial e integral al tomarse en cuenta vectores* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua].
- Cortés, O., Mendoza, J. & Muriel J. (2009). Criterios de selección de las herramientas de desarrollo para microcontroladores PIC. *Scientia Et Technica*, XV (43), 187-192.
- Das, R., Nayek, M., Das, S., Dutta, P., Mazumdar, A. (2017). Design and analysis of 0.127m (5") Cutthroat flume. *Ain Shams Engineering Journal*, 8(3), 295–303. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2015.07.017>
- Espiritu C, E. (2014). Hidráulica Aforo de caudales <https://www.slideshare.net/EdgarEspirituC/hidraulica-aforo>
- González, A. Hinojos, E. (2014). Manejo y distribución del agua en distritos de riego: breve introducción didáctica (G. A. M. Ocampo, Ed.). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

- Hameed, A. H. S., & Al Thamiry, H. A. (2024). Investigation of the Performance of Miniature Model of Venturi Flume. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4499678/v1>
- Heyrani, M., Mohammadian, A., Nistor, I., & Dursun, O. F. (2022). Application of Numerical and Experimental Modeling to Improve the Efficiency of Parshall Flumes: A Review of the State-of-the-Art. In *Hydrology* (Vol. 9, Issue 2). <https://doi.org/10.3390/hydrology9020026>
- Huerta, C. (1998). Las Normas Oficiales Mexicanas en el ordenamiento jurídico mexicano. *Boletín Mexicano De Derecho Comparado*, 1(92). <https://doi.org/10.22201/ijj.24484873e.1998.92.3543>
- Ibañez, P. [Ibañez Pili]. (24 de febrero de 2021). *Dimensionamiento aforador RBC COMPLETO*. [Video]. <https://www.youtube.com/watch?v=6fYRARfqAyE&t=1202s>
- Instruments, T. (2025, 21 Julio). Common Challenges Faced in Flow Measurement and How to Overcome Them. *Thermal Instrument*. <https://thermalinstrument.net/5-common-challenges-faced-in-flow-measurement-and-how-to-overcome-them/>
- Kenny, T. (2005). first-page-pdf. In J. Wilson (Ed.), *Sensor Technology Handbook* (pp. 501–529). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-075067729-5/50059-8>
- Kittila, A., Zurich, E. (2019). Weirs and Flumes. Institute of Geophysics, Geothermische Energie. Geofluide. Sonneggstrasse. <https://mineclosure.gtk.fi/weirs-and-flumes/>
- Komiskey, M. J., Stuntebeck, T. D., Cox, A. L., Frame, D. R. (2013). Implications of Flume Slope on Discharge Estimates from 0.762-meter H Flumes Used in Edge-of-Field Monitoring. U.S. Geological Survey Open-File Report, 2013-1082.
- López, A., Chung, J. (2023). *Estudio experimental de un vertedero triangular y modelación con OpenFOAM* [Tesis de licenciatura, Universidad Peruana de ciencias aplicadas]

- Marín, M. (25 de julio de 2019). Importancia de la Normatividad Mexicana en la Industria de Recubrimientos. *Pyrolac*. <https://www.pyrolac.com/importancia-de-la-normatividad-mexicana-en-la-industria-de-recubrimientos/>
- Martínez, P. y Castillo, J. (1992). *Diseño de aforadores de garganta larga* (IMTA, Ed.; IMTA, Vol. 1).
- Mejía, A. J. (2023). Bombas Hidráulicas y Vertederos. *Bombas Hidráulicas y Vertederos*.
- Ramírez, J., Olvera, E., Mercado, R., Ruiz, de León, B., Perea, H., & Ortega, R. (2010). MSC-AGL, sistema de apoyo a la integración de proyectos ejecutivos de aforadores de garganta larga. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 1 (3), 109-118.
- Ramírez, R., Hernández, A., Aguilar, D., & Pérez, J. (2024). Sensores y tipos de sensores. *TEPEXI Boletín Científico de La Escuela Superior Tepeji Del Río*, 11(21), 50–52. <https://doi.org/10.29057/estr.v11i21.11779>
- Rosas Flores, FS, Tejeda Flores, SP, & Canaza Rojas, F. (2021). Estimación del caudal a partir de la técnica de velocimetría por imágenes de partículas a gran escala aplicadas en flujo a superficie libre. *Gaceta Técnica*, 22 (1), 53-65. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28763.08480>
- Rosero, J. y Simbaña, G. (2008). *Diseño y construcción de un módulo didáctico para la medición de un caudal en canales abiertos*. [Tesis de licenciatura, Escuela politécnica nacional] <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/999>
- Samani, Z. (2017). Three Simple Flumes for Flow Measurement in Open Channels. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(6). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001168](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001168)
- Santiago, M., Mosqueda, Z., Gonzalez, A., Villanueva, A., Aguilar, M., y Riesco, J. (2023). “Intercambiador de calor de tubos y coraza para uso didáctico.” <https://doi.org/10.59920/KQKV5606>

- Schlichting, H., y Gersten, K. (2016). Boundary-Layer Theory. In *Boundary-Layer Theory* (9th ed.). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-52919-5>
- Secretaría de economía (SE). (2018). NMX-AA-179-SCFI-2018. Medición de volúmenes de aguas nacionales usados, explotados o aprovechados. Ciudad de México.
- SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES. (2020). Programa Nacional Hídrico 2020–2024. Gobierno de México. In *Diario Oficial*. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/642632/PNH\\_2020-2024\\_ptimo.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/642632/PNH_2020-2024_ptimo.pdf)
- Sibale, D., Adongo, T. A., Umkiza, E., Ntole, R., Chikavumbwa, S., Bwambale, E., & Jeremaiho, Z. (2023). REVIEW OF HYDRAULIC PERFORMANCE OF OPEN-CHANNEL FLOW-MEASURING FLUMES. In *Acta Hydrotechnica* (Vol. 36, Issue 64). <https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2023.03>
- Siguayro, H., Pasapera, J., Villanueva, C., Coila, Y., & Gamarra, C. (2022). Evaluación de fuentes contaminantes en el anillo circunlacustre del lago Titicaca (sector peruano), 2017. *Boletín Instituto Del Mar Del Perú*, 37(2), 361–386. <https://doi.org/10.53554/boletin.v37i2.378>
- Skertchly, L. (1988). *Manual de diseño de estructuras de aforo* (Vol. 1). Instituto Mexicano de Tecnología del agua.
- Soto, R. [Ronald Soto]. (6 de abril de 2022). *Cálculo del tirante normal en canal rectangular*. [Video]. <https://www.youtube.com/watch?v=ZTIDNJ-XPFO>
- Temeepattanapongsa, S., Merkley, G. P., Barfuss, S. L., and Smith, B. L. (2013). Generic Free-Flow Rating for Cutthroat Flumes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(7), 727–735. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000732](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000732)
- Torres, J., y Cruz, R., (s.f.). El Aforador RBC. Una estrategia sencilla para canales de riego. Serie divulgativa, No. 4.

- Tulip, S., Islam, M., Shoshi, U., Islam, M. T. (2018). Design and Performance Evaluation of an-H Flume. 29.
- United Nations. (2023). The Sustainable Development Goals Report 2023 (Vol. 1).
- USBR (United States Bureau of Reclamation). (2001). *WATER MEASUREMENT MANUAL* (USBR (United States Bureau of Reclamation), Ed.; Vol. 3).
- Villón, M. (1999). Desarrollo de un software para diseño de canales y estructuras hidráulicas HCANALES para Windows. *Tecnología En Marcha*, 13, 148–151.
- Villón, M. (2013). HCanales (3.1) [Software de computación]. Escuela de Ingeniería agrícola del Instituto tecnológico de Costa Rica. <https://ingeciv.com/descargas/hcanalesV3.0.rar>
- Wahl, T. L., Clemmens, A. J., Replogle, J. A., Bos, M. G. (2005). Simplified design of Flumes and Weirs. *Irrigation and Drainage*, 54, 231–247.
- Wahl, T. L., Clemmens, A. J., Replogle, J. A., Bos, M. G. (2008). WINFLUME—Windows-based software for the design of long-throated measuring flumes.