



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 2

Neiva, 16 de septiembre 2019

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

Gustavo Andrés Mena Camacho, con C.C. No.1075287652 y Sergio Andrés Sánchez Marines, con C.C. No.1075298741, autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado titulado DISEÑO Y CALIBRACIÓN DE UN DISPOSITIVO HIDRÁULICO PARA EL AFORO INTRAPREDIAL EN EL DISTRITO DE RIEGO “EL JUNCAL” presentado y aprobado en el año 2019 como requisito para optar al título de Ingeniero Agrícola;

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

Gustavo Andrés Mena Camacho

Sergio Andrés Sánchez Marines

Firma:

Firma

Vigilada Mineducación



**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS**



**CARTA DE AUTORIZACIÓN**

**CÓDIGO**

**AP-BIB-FO-06**

**VERSIÓN**

**1**

**VIGENCIA**

**2014**

**PÁGINA**

**2 de 2**

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional [www.usco.edu.co](http://www.usco.edu.co), link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



**TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO:** DISEÑO Y CALIBRACIÓN DE UN DISPOSITIVO HIDRÁULICO PARA EL AFORO INTRAPREDIAL EN EL DISTRITO DE RIEGO “EL JUNCAL”.

**AUTOR O AUTORES:**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Mena Camacho	Gustavo Andrés
Sánchez Marines	Sergio Andrés

**DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Bedoya Cardoso	Marlio

**ASESOR (ES):**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE:** Ingeniero Agrícola

**FACULTAD:** Ingeniería

**PROGRAMA O POSGRADO:** Agrícola

**CIUDAD:** Neiva

**AÑO DE PRESENTACIÓN:** 2019

**NÚMERO DE PÁGINAS:** 61

**TIPO DE ILUSTRACIONES** (Marcar con una X):

Diagramas\_\_ Fotografías\_\_ Grabaciones en discos\_\_ Ilustraciones en general X Grabados\_\_  
Láminas\_\_ Litografías\_\_ Mapas\_\_ Música impresa\_\_ Planos\_ Retratos\_\_ Sin ilustraciones\_\_ Tablas o  
Cuadro X

**SOFTWARE** requerido y/o especializado para la lectura del documento:

Vigilada mieducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional [www.usco.edu.co](http://www.usco.edu.co), link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



**MATERIAL ANEXO:**

**PREMIO O DISTINCIÓN** (*En caso de ser LAUREADAS o Meritoria*):

Meritoria

**PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS**

Español	Inglés
1. Medición de caudal	Flow measurement
2. Dispositivo Hidráulico	Hydraulic device
3. Vertedero	Weir
4. Regresión no lineal	Non-linear regression
5. Calibración	Calibration

**RESUMEN DEL CONTENIDO:** (Máximo 250 palabras)

Según lo establecido en la normatividad colombiana sobre el uso eficiente y ahorro del agua consagrado en la ley 373 de 1997 y en el decreto 1090 del 2018, es requerida la utilización de instrumentos que otorguen una medición confiable de los caudales de agua empleados en los distritos de riego.

Para lograr una mayor precisión en la medición del caudal intrapredial del sistema de riego por gravedad del distrito de riego "El Juncal" se diseñó, fabricó y calibró un dispositivo hidráulico fácil de manejar, de bajo costo de adquisición y mantenimiento. La formulación de la ecuación de calibración se realizó a partir de un análisis de regresión no lineal con la herramienta Curve Fitting del software matemático Matlab R2017B versión 9.3.0.713579.

El modelo de regresión obtuvo bajos valores de  $R^2$  y altos valores del coeficiente de determinación en todas las ecuaciones y curvas de tendencia exponencial, demostrando un alto ajuste de la regresión no lineal con las medidas experimentales obtenidas durante el trabajo de campo. Lo anterior justificó la selección del vertedero rectangular utilizando la medición de la carga hidráulica con el método de flotador.

**ABSTRACT:** (Máximo 250 palabras)

As established in the Colombian regulations on the efficient use and saving of water enshrined in Law 373 of 1997 and Decree 1090 of 2018, the use of instruments that provide a reliable measurement of water flows used in the districts is required. of irrigation. To achieve greater precision in the measurement of the intrapredial flow of the gravity irrigation system of the irrigation district "El Juncal", an easy-to-handle, low-cost acquisition and maintenance hydraulic device was designed, manufactured and calibrated. The calibration equation was formulated from a non-linear regression analysis with the Curve



Fitting tool of Matlab R2017B version 9.3.0.713579 mathematical software.

The regression model obtained low values of R2 and high values of the coefficient of determination in all equations and exponential trend curves, demonstrating a high adjustment of the non-linear regression with the experimental measurements obtained during the field work. The above justified the selection of the rectangular landfill using the measurement of the hydraulic load with the float method.

### APROBACION DE LA TESIS

Director: Marlio Bedoya Cardozo

Firma:

Nombre Jurado: John Jairo Arevalo Hernandez

Firma:

Nombre Jurado: Myriam Rocío Pallares Muñoz

Firma:

DISEÑO Y CALIBRACIÓN DE UN DISPOSITIVO HIDRÁULICO PARA EL AFORO  
INTRAPREDIAL EN EL DISTRITO DE RIEGO “EL JUNCAL”

GUSTAVO ANDRES MENA CAMACHO  
SERGIO ANDRES SANCHEZ MARINEZ

Universidad Surcolombiana  
Facultad de ingeniería  
Programa de agrícola  
Neiva  
2019

DISEÑO Y CALIBRACIÓN DE UN DISPOSITIVO HIDRÁULICO PARA EL AFORO  
INTRAPREDIAL EN EL DISTRITO DE RIEGO “EL JUNCAL”

GUSTAVO ANDRES MENA CAMACHO  
SERGIO ANDRES SANCHEZ MARINEZ.

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero agrícola

Director: Marlio Bedoya Cardoso

Universidad Surcolombiana  
Facultad de ingeniería  
Programa de agrícola  
Neiva  
2019

NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

Marlio Bedoya Cardoso

---

Myriam Rocío Pallares Muñoz

---

John Jairo Arevalo Hernandez

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Surcolombiana y a ASOJUNCAL por brindarnos todas las herramientas para desarrollar este proyecto; a los profesores, familiares y amigos que nos acompañaron en este proceso de formación y en este proyecto.

## CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABLAS	8
GLOSARIO	9
RESUMEN	13
INTRODUCCIÓN	14
ANTECEDENTES.....	16
JUSTIFICACIÓN .....	17
FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	18
OBJETIVOS .....	19
1.	GENERALIDADES
	20
1.1    DISTRITO DE RIEGO “EL JUNCAL” .....	20
1.1.1    Localización .....	20
1.2    BANCO DE PRUEBAS DE LA UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA.....	21
1.2.1    Localización .....	21
2.MARCO	TEÓRICO
	22
2.1    TIPOS DE RIEGO .....	22
2.1.1    Riego por surcos .....	22
2.1.2    Riego por melgas .....	22
2.2    FLUJO EN CANALES ABIERTOS.....	23
2.2.1    Número de Reynolds.....	23
2.2.2    Número de Froude .....	23
2.3    SISTEMAS DE MEDICIÓN Y CONTROL .....	24
2.3.1    Compuertas hidráulicas.....	24
2.3.2    Canaleta Parshall o Venturi.....	24
2.3.3    Canaleta Washington State College (WSC).....	25
2.3.4    Vertederos.....	25
2.4    MODELOS MATEMÁTICOS.....	28
2.4.1    Regresión no lineal.....	28
2.4.2    Indicadores de nivel de confianza de los modelos .....	28
3.	METODOLOGÍA
	30

3.1	SELECCIÓN DE TIPO DE VERTEDERO.....	30
3.1.1	Pruebas de laboratorio .....	30
3.2	DISEÑO DEL PROTOTIPO .....	31
3.2.1	Identificación de restricciones para el diseño .....	31
3.2.2	Dimensionamiento del dispositivo .....	31
3.3	MEDICIÓN DE CAUDALES.....	34
3.3.1	Aforos intraprediales .....	34
3.4	CALIBRACIÓN DEL DISPOSITIVO.....	36
3.5	VALIDACIÓN DEL MODELO.....	36
4.	RESULTADOS	
		Y
		DISCUSIÓN
		37
4.1	VERTEDERO TRIANGULAR .....	37
4.1.1	Caudal promedio .....	37
4.1.2	Número de Froude .....	38
4.1.3	Calibración .....	39
4.2	VERTEDERO RECTANGULAR .....	42
4.2.1	Caudal promedio .....	42
4.2.2	Número de Froude .....	44
4.2.3	Calibración .....	45
4.3	VALIDACIÓN DEL MODELO.....	48
	CONCLUSIONES	49
	RECOMENDACIONES	50
	BIBLIOGRAFÍA	51
	ANEXOS	56
	ANEXO A: EVIDENCIA FOTOGRÁFICA DE LA INSTALACIÓN DEL DISPOSITIVO EN LOS PREDIOS SELECCIONADOS.....	56

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización ASOJUNCAL.....	20
Figura 2. Localización Facultad de ingeniería.....	21
Figura 3. Vista en planta y de perfil de canaleta Parshall. ....	25
Figura 4. Vista frontal de un vertedero rectangular. ....	27
Figura 5. Vista frontal de un vertedero trapezoidal. ....	27
Figura 6. Vista frontal de un vertedero triangular. ....	28
Figura 7. Módulo de prueba HM150. ....	30
Figura 8. Vertederos utilizados para las pruebas de medición de caudal en el laboratorio de hidráulica.....	31
Figura 9. Vista frontal vertedero triangular. ....	32
Figura 10. Vista frontal vertedero rectangular. ....	33
Figura 11. Vista en planta y 3D del medidor de flujo predial. ....	33
Figura 12. Gráfica H vs Q con cinta métrica para el vertedero triangular. ....	40
Figura 13. Gráfica H vs Q con la regla para el vertedero triangular. ....	41
Figura 14. Gráfica H vs Q con el flotador para el vertedero triangular. ....	42
Figura 15. Gráfica H vs Q con cinta métrica para el vertedero rectangular. ....	46
Figura 16. Gráfica H vs Q con la regla para el vertedero rectangular. ....	47
Figura 17. Gráfica H vs Q con el flotador para el vertedero rectangular. ....	47

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Listado de predios inscritos al distrito de riego “El Juncal” seleccionados para la instalación del prototipo. ....	32
Tabla 2. Dimensiones del dispositivo medidor de flujo predial.....	33
Tabla 3. Valores promedio de caudales por cada centímetro de altura para el vertedero triangular.....	37
Tabla 4. Rango de número de Froude para el vertedero triangular. ....	38
Tabla 5. Evaluación de los modelos para el vertedero triangular.....	39
Tabla 6. Valores promedio de caudales por cada centímetro de altura para el vertedero rectangular.....	43
Tabla 7. Rango de número de Froude para el vertedero rectangular. ....	44
Tabla 8. Evaluación de los modelos para el vertedero rectangular.....	45
Tabla 9. Validación del modelo.....	48

## GLOSARIO

**ACEQUIA:** Zanja o canal pequeño que conduce agua, especialmente para el riego.

**ACTIVIDAD AGROPECUARIA:** explotación de productos de la naturaleza sin hacer en ellos cambios, que pueden sin embargo, servir como materias primas a las industrias, que constituyen el sector secundario, económicamente hablando.

**AFORO:** Método para medir la cantidad de agua que lleva una corriente.

**AGRICULTURA:** Conjunto de actividades y conocimientos desarrollados por el hombre, destinados a cultivar la tierra y cuya finalidad es obtener productos vegetales para la alimentación del ser humano y del ganado.

**AGUA:** Sustancia líquida sin olor, color ni sabor que se encuentra en la naturaleza en estado más o menos puro formando ríos, lagos y mares, ocupa las tres cuartas partes del planeta Tierra y forma parte de los seres vivos.

**ÁREA DE INFLUENCIA:** espacio en el que un elemento urbano influye, dependiendo de su función.

**ATMÓSFERA:** Capa gaseosa que envuelve un astro; especialmente, la que rodea la Tierra.

**BOCATOMA:** estructura hidráulica destinada a derivar desde unos cursos de agua, río, arroyo, o canal; o desde un lago; o incluso desde el mar, una parte del agua disponible en esta, para ser utilizada en un fin específico, como pueden ser abastecimiento de agua potable, riego, generación de energía eléctrica, acuicultura, enfriamiento de instalaciones industriales, etc.

**BOMBA:** Máquina que se usa para extraer, elevar o impulsar líquidos y gases de un lugar a otro.

**CABALLÓN:** Porción de tierra levantada que queda entre surco y surco al labrar, especialmente el que se hace para separar bancales o para contener y dirigir las aguas en los riegos.

**CANAL ABIERTO:** conducto por el cual circula un flujo, que tiene una superficie libre expuesta a la atmósfera.

**CANALETA WSC:** aforador de profundidad crítica de un diseño similar al Parshall, que resulta particularmente útil como aforador portátil para mediciones eventuales de pequeños caudales en corrientes o canales sin revestir.

**CARGA:** altura del agua.

**CAUDAL:** Cantidad de agua que lleva una corriente o que fluye de un manantial o fuente.

**Coeficiente de Determinación ( $R^2$ ):** Esta es la medida utilizada para establecer la calidad de ajuste de un modelo particular.

**COMPUERTA HIDRÁULICA:** dispositivo hidráulico-mecánico o puerta movable plana o curva, que se coloca en las esclusas de canales, presas, obras de derivación u otra estructura hidráulica, utilizada en la mayoría de los casos a regular el pasaje de agua u otro fluido en una tubería, también como emergencia y cierre para mantenimiento en los otros.

**CONDICIONES EDAFOLÓGICAS:** condiciones del suelo.

**CONSERVACIÓN DE ENERGÍA:** ley física que postula que la energía no puede ser creada ni destruida, sólo se transforma de una forma en otra.

**CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL:** ente corporativo de carácter público, integrado por las entidades territoriales, encargado por ley de administrar dentro del área de su jurisdicción el medio ambiente y los recursos naturales renovables, y propender por el desarrollo sostenible del país.

**CRESTA:** arista o superficie más elevada del vertedero, que está en contacto con el agua.

**DEMANDA:** Petición o solicitud de algo, especialmente si consiste en una exigencia o se considera un derecho.

**DIQUE:** Muro construido para contener la fuerza del agua, embalsarla o reconducirla.

**DISPOSITIVO:** Pieza o conjunto de piezas o elementos preparados para realizar una función determinada y que generalmente forman parte de un conjunto más complejo.

**DISTRITO DE RIEGO:** áreas geográficas donde se proporciona el servicio de riego mediante obras de infraestructura hidroagrícola, como vasos de almacenamiento, derivaciones directas, plantas de bombeo, pozos, canales y caminos.

**DRENAJE:** salida de líquidos o de la excesiva humedad por medio de cañerías, tubos o zanjas.

**EMPÍRICO:** Que está basado en la experiencia y en la observación de los hechos.

**ESTADO FENOLÓGICO:** cada una de las etapas por las que pasan a lo largo de un período vegetativo.

**FORMALETA PARSHALL:** elemento primario de caudal con una amplia gama de aplicaciones para medir el caudal en canales abiertos, puede ser usado para medir el flujo en ríos, canales de irrigación y/o de desagüe, salidas de alcantarillas, aguas residuales, vertidos de fábricas, etc.

**FUENTE HÍDRICA:** corrientes de agua, ya sean subterráneas o sobre la superficie; de las cuales los seres humanos aprovechan para la generación de energía o el uso personal.

**HIDROLOGÍA:** Estudio de las propiedades físicas, químicas y mecánicas del agua continental y marítima, su distribución y circulación en la superficie de la Tierra, en el suelo y en la atmósfera.

**INFILTRACIÓN:** acción de introducir suavemente un líquido entre los poros de un sólido.

**IRRIGAR:** Regar o esparcir agua sobre la tierra o sobre una planta para beneficiarla.

**MITIGAR:** se usa para referirse a que algo debe ser contrarrestado, moderado.

**MONITOREAR:** controlar el desarrollo de una acción o un suceso a través de uno o varios monitores

**OBRA HIDRÁULICA:** Construcción de bienes que tengan naturaleza inmueble destinada a la captación, extracción, desalación, almacenamiento, regulación, conducción, control y aprovechamiento de las aguas.

**PENDIENTE:** forma de medir el grado de inclinación del terreno.

**PRECIPITACIÓN:** caída de agua desde la atmósfera hacia la superficie terrestre.

**PREDIO:** Finca, tierra o posesión inmueble.

**RIEGO:** procedimiento que consiste en el aporte artificial de agua a un determinado terreno, generalmente con la intención de intentar con el mismo facilitar el crecimiento de vegetales.

**RIEGO SUPERFICIAL:** Sistema de riego que utiliza la superficie del terreno como parte del sistema de distribución, sólo necesita que el agua llegue a la parcela.

**SISTEMA PRESURIZADO:** sistema que mantiene la presión de un espacio cerrado, independientemente de la del exterior.

**SUELO:** Superficie de la corteza terrestre.

**SURCO:** Hendidura longitudinal que se hace en la tierra con el arado.

**TOPOGRAFÍA:** Técnica que consiste en describir y representar en un plano la superficie o el relieve de un terreno.

**UMBRAL:** Altura o cota de la cresta, referida al fondo del canal

**VERTEDERO:** llamado también aliviadero, es el nombre de una estructura hidráulica cuya finalidad es la de permitir que pase el agua a los escurrimientos superficiales.

## RESUMEN

Según lo establecido en la normatividad colombiana sobre el uso eficiente y ahorro del agua consagrado en la ley 373 de 1997 y en el decreto 1090 del 2018, es requerida la utilización de instrumentos que otorguen una medición confiable de los caudales de agua empleados en los distritos de riego.

Para lograr una mayor precisión en la medición del caudal intrapredial del sistema de riego por gravedad del distrito de riego “El Juncal” se diseñó, fabricó y calibró un dispositivo hidráulico fácil de manejar, de bajo costo de adquisición y mantenimiento. La formulación de la ecuación de calibración se realizó a partir de un análisis de regresión no lineal con la herramienta Curve Fitting del software matemático Matlab R2017B versión 9.3.0.713579.

El modelo de regresión obtuvo altos coeficientes de determinación ajustado ( $R^2_{\text{ajustado}}$ ) y bajos valores de raíz cuadrada del error medio en todas las ecuaciones y curvas de tendencia exponencial, demostrando un alto ajuste de la regresión no lineal con las medidas experimentales obtenidas durante el trabajo de campo. Lo anterior justificó la selección del vertedero rectangular utilizando la medición de la carga hidráulica con el método de flotador.

Palabras clave: Medición de caudal, dispositivo hidráulico, vertedero, regresión no lineal, calibración.

## INTRODUCCIÓN

Según Cisneros: “El riego agrícola, por su estrecha relación con el uso, el manejo y la conservación del agua, es una de estas áreas dentro de la agricultura que requiere de mayores estudios, avances tecnológicos y de la aplicación de estos sin deteriorar el medio ambiente.”

Gran parte de los distritos de riego en el mundo emplean el sistema de riego por gravedad o superficie para irrigar los cultivos ubicados en el área de influencia, empleando grandes cantidades de agua para suplir la demanda del territorio, en algunos casos dicho suministro no se realiza de forma eficiente ocasionando el desperdicio y deterioro de los recursos.

En Colombia aproximadamente el 4,5% de los distritos reportados por la agencia de desarrollo rural (ADR) son de mediana y gran escala, en los que se utilizan canales a cielo abierto como medio de transporte del agua, dichos canales conducen grandes cantidades de agua bajo el principio de conservación la energía y cantidad de movimiento (Mejía, 2004).

Los medidores implementados para este medio de transporte son las compuertas de control, las formaletas Parshall, las canaletas Washington State College (WSC), entre otros. Los datos obtenidos sobre los volúmenes de los canales principales son poco precisos debido a su tedioso mantenimiento y mal manejo por parte de los operarios y/o usuarios; además, dichos medidores no ofrecen medición de los caudales entrantes a las parcelas.

Además, la inexistencia de un dispositivo que cuantifique el agua suministrada por los distritos a cada uno de los predios ocasiona que no existan registro de los caudales que recibe cada usuario, contando solo con datos del caudal diario que atraviesa los canales principales del sistema de riego ofrecidos por los medidores anteriormente nombrados.

Es evidente la necesidad de mejoras del sistema de medición de caudales intrapredial que utilizan los distritos de riego para dar cumplimiento a la legislación colombiana sobre el uso eficiente y ahorro del agua.

Con el objetivo de tener mediciones eficientes y precisas de los caudales entregados en cada lote se llevó a cabo el desarrollo de este proyecto de grado, en el distrito de riego “El Juncal” que fue construido para suministrar de manera eficiente y eficaz el recurso hídrico a los predios del área de influencia logrando mejorar la calidad de vida de los usuarios y la producción de los terrenos.

Para el correcto desarrollo de este proyecto se llevaron a cabo pruebas de campo en algunos predios según directrices del distrito para la caracterización de la zona,

la identificación de los dispositivos hidráulicos existentes en el distrito, la selección del dispositivo óptimo para las condiciones de los predios, la determinación de los criterios de diseño del nuevo dispositivo y su posterior aforo y calibración para lograr una mayor precisión de los datos obtenidos.

## ANTECEDENTES

Montero Martinez, 1999, indica que:

“El regadío es una actividad técnica, socioeconómica y medioambiental encaminada a garantizar la producción de alimentos y materias primas de origen vegetal. Tradicionalmente se ha considerado al regadío como un elemento dinamizador de las zonas rurales tanto desde la perspectiva económica y de desarrollo de nuevas actividades ligadas a la comercialización y transformación de la producción agraria y a los servicios, como desde la óptica de la generación de empleo, la redistribución de la riqueza y la fijación de la población en el medio rural.”

La producción agrícola a nivel mundial tiene como misión básica suplir la demanda de alimentos en la población humana de una manera socioeconómicamente desarrollada y sostenible, aunque debido a la escasez de agua evidenciada en algunas zonas áridas y de poca precipitación ha hecho que este recurso sea valioso (Santos Pereira, De Juan Valero, Picornell Buendía & Tarjuelo, 2004).

Los primeros sistemas de riego de los que se tienen evidencias arqueológicas datan del año 1650 a.C. con el descubrimiento de un gran canal del que se nacían una red de canales secundarios y terciarios en la antigua Mesopotamia. Mientras que el riego por aspersion tuvo orígenes a principios del siglo, pero evolucionó de forma rápida ocasionando que su uso tuviera un rápido ascenso a nivel mundial y fuese empleado en diferentes tipos de cultivos. Los sistemas de riego por aspersion actuales han logrado mejorar la eficiencia en la aplicación de agua, aumentar la productividad de la tierra cultivada y disminuir el número de personas involucradas en el proceso debido a una serie de mejoras y avances tecnológicos sufridos a través del tiempo. (Montero Martínez, 1999)

En el 2011 el departamento del Huila presentó un aumento en el desarrollo de su estructura agropecuaria gracias a la incorporación de infraestructura de irrigación y el apoyo a los componentes técnicos, administrativos y financieros por parte de la Unidad de adecuación de tierras permitiendo un crecimiento económico y social, mejores niveles productivos y la incorporación de productos de mejor calidad en mercados nacionales e internacionales (Perdomo Álvarez, Flórez Aristizabal, González, 2011).

## JUSTIFICACIÓN

El crecimiento socioeconómico de un país depende de las posibilidades de alcanzar una productividad que satisfaga las necesidades alimentarias del mismo y cuente con los medios para poder generar una sobreproducción y originar exportaciones a otros países. Para alcanzar esos niveles de producción se deben agregar superficies aptas para la agricultura a través de proyectos de riego y mejorar los sistemas y prácticas existentes, con el objetivo de asegurar un uso eficiente de este recurso (Gurovich, 1985).

Además, la optimización de los sistemas de riego es fundamentales para la productividad de los predios, tal como nos indica Montero Martinez, 1999: “La correcta utilización del agua regante para conseguir un uso eficiente de la misma, requiere de la aplicación de las técnicas de programación de riegos, que indican el momento y la cuantía de cada riego, y un adecuado manejo de las redes de distribución y del proceso de aplicación de agua para conseguir una aportación uniforme de agua a la parcela.”

Una de las principales dificultades de los distritos de riego en Colombia es el ineficaz control de la cantidad de agua que se le entrega a cada parcela, debido a la inexistencia de un dispositivo que mida de manera eficiente los volúmenes de agua utilizados por los predios inscritos al distrito, así como la falta de infraestructura y la poca inversión en tecnología para el aprovechamiento eficiente del recurso hídrico en la captación y entrega de este para el sector agrícola.

En la legislación colombiana existen lineamientos específicos para el uso eficiente y ahorro del agua, dichos lineamientos se contemplan en el art. 43 de la ley 99 de 1993, el art. 01 de la ley 393 de 1997 y en el decreto 1090 del 2018.

En Colombia el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), las Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible (CAR), el Centro Nacional del Agua (CNA), entre otras instituciones gubernamentales proponen y evalúan alternativas para el suministro eficiente del recurso hídrico.

## FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La carencia de un dispositivo comercial con bajo riesgo de atascamiento y obstrucción para la medición de caudales intraprediales, además del obligatorio cumplimiento de la normatividad vigente sobre el uso eficiente y ahorro del agua, hacen evidente la necesidad de diseñar y fabricar un dispositivo de fácil instalación, manejo y operatividad, que otorgue mediciones precisas de los caudales de agua entregadas a cada parcela inscrita al distrito, con bajo costo inicial y de mantenimiento.

## OBJETIVOS

### Objetivo general

Diseñar, fabricar y calibrar un dispositivo hidráulico que permita medir con gran precisión el caudal entregado por el distrito a nivel predial.

### Objetivos específicos

- Diagnosticar el estado actual del problema para identificar los factores que influyen en la medida de la entrega del recurso hídrico a nivel predial.
- Calibrar el dispositivo para generar una ecuación de calibración a través de aforos.
- Seleccionar el tipo de dispositivo adecuado a las características de varios predios del distrito de riego "El Juncal".

## 1. GENERALIDADES

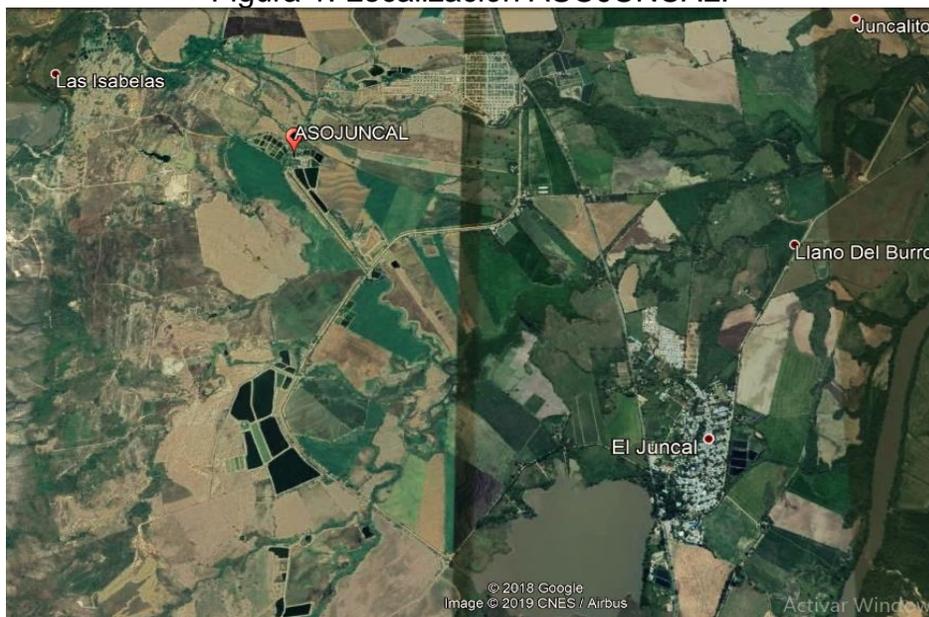
### 1.1 DISTRITO DE RIEGO “EL JUNCAL”

El distrito de riego “El Juncal” propiedad de la Asociación De Usuarios Del Distrito De Adecuación De Tierras De Mediana Escala El Juncal “ASOJUNCAL” ofrece servicio de riego, maquinaria, insumos y piscícola. Su principal fuente hídrica es la laguna El Juncal alimentada por el río Magdalena mediante un sistema de bombeo a través de un canal.

Está constituido por 343 predios con un área de influencia de 5100 Ha donde predomina la producción de arroz con riego artificial y ganadería extensiva, 3100 Ha se benefician y 2600 Ha son dedicadas al monocultivo; con una temperatura media de 28 °C y precipitación media de 1250 mm/año el clima de la zona es clasificado como Bosque Seco Tropical (BST). (ASOJUNCAL, 2019)

#### 1.1.1 Localización

Figura 1. Localización ASOJUNCAL.



Fuente: Google Earth 2019, Google Inc.

El distrito de riego el Juncal está ubicado sobre la margen izquierda del río Magdalena en la inspección del Juncal, municipio de Palermo, a 13 kilómetros de la ciudad de Neiva capital del departamento del Huila. Cuenta con cuatro vías de acceso terrestre Neiva - Asojuncal con una distancia de 13 Km, Asojuncal - Represa de Betania (29 Km), Palermo Limites con Teruel (19 km) y Cruce el Juncal Betania - Limite con Yaguará (48 km). (ASOJUNCAL, 2019)

## 1.2 BANCO DE PRUEBAS DE LA UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

El programa de Ingeniería Agrícola adscrito a la facultad de Ingeniería de la Universidad Surcolombiana sede Neiva cuenta con un laboratorio de hidráulica, dotado con herramientas adecuadas para la realización de diferentes pruebas y ensayos sobre la mecánica de los fluidos.

### 1.2.1 Localización

El laboratorio de hidráulica se encuentra en la facultad de ingeniería de la subsele Central de la Universidad Surcolombiana sede Neiva ubicada en la Avenida Pastora Borrero con Carrera 1 en la ciudad de Neiva departamento del Huila.

Figura 2. Localización Facultad de ingeniería.



Fuente: Google Earth 2019, Google Inc.

## 2. MARCO TEÓRICO

Colombia tiene un potencial considerable para expandir el territorio bajo riego debido a su hidrología y calidad de suelos con óptimas condiciones que ofrecen variedad de cultivos, desde los tropicales hasta los de clima templado (CAR, 2010). Como es de conocimiento de todos, el agua está ligada a la agricultura desde los tiempos más antiguos, pero es de resaltar que el presente y el futuro de la civilización depende de la forma en que se resuelvan los problemas asociados al suministro inadecuado y desigual del recurso hídrico (Villalobos, García, & Ávila, 2017).

Como parte integral del desarrollo agrícola y rural, los sistemas de riego y drenaje han sido potencialmente importantes desde el Siglo XX, cuando las condiciones topográficas naturales, en particular en épocas de invierno, provocaban inundaciones y encharcamientos que provenían de algún río limitante con la zona, obstaculizando permanentemente el uso de estos suelos para la agricultura y el cultivo de especies (CAR, 2010). Generalmente los distritos de riego de gran y mediana escala tienen una característica en común, el cual consiste en la utilización de sistemas de riego por gravedad (superficial); aplicando el agua en la parte superior de los predios, de modo que el caudal de riego disminuye a lo largo del predio debido a la infiltración del terreno (Faci González & Playan Jubillar, 1994).

### 2.1 TIPOS DE RIEGO

#### 2.1.1 Riego por surcos

El método de riego por surco se realiza haciendo “correr” el agua en pequeños canales que la llevan a través de toda la parcela, por medio de este el agua llega hasta las raíces de los cultivos, infiltrándose hacia los lados y hacia el fondo del surco de riego. Este método de riego es el que más se aplica en la agricultura, y la nivelación del terreno es el punto clave para que el agua corra sin dificultad, sin encontrar obstáculos en su recorrido, pero sin causar erosión (FRAG, 1999).

#### 2.1.2 Riego por melgas

Consiste en distribuir el agua a partir de un punto o toma ubicado en la acequia de cabecera, se requiere contar con volúmenes apropiados de agua para reducir el tiempo de riego. Es necesario adecuar previamente el terreno construyendo fajas de longitudes variable tanto en ancho como en largo, dependiendo esta variación de la textura del suelo, del caudal que se posea, de la pendiente, etc. No es aconsejable su uso en terrenos arenosos y tampoco arcillosos, exige que la topografía sea plana y con pendientes no mayores al 3% (Cano, Murillo, Zambrano & Bonfiglioli, 2013).

Por lo tanto es necesario llevar a cabo diferentes alternativas para mitigar el desaprovechamiento del recurso hídrico, una de ellas es la medición de caudales para

controlar la cantidad de agua que se utiliza en una residencia o en un predio; el aforo como es conocido en el ámbito hidráulico se puede desarrollar de diferentes métodos y su elección depende del objetivo del monitoreo, la facilidad de acceso o tiempo con que se cuente y de las características de la fuente superficial que se pretenda medir (Universidad de Medellín, Comunicaciones Corantioquia, Subdirección de calidad Ambiental, 2014).

## 2.2 FLUJO EN CANALES ABIERTOS

El flujo en canales abiertos puede clasificarse en los siguientes cuatro tipos de regímenes: laminar-supercrítico, turbulento-subcrítico, laminar-supercrítico y turbulento-supercrítico. Los números empleados para realizar dicha clasificación son: el número de Reynolds y el número de Froude. (Zucarelli, Morresi, 2019)

### 2.2.1 Número de Reynolds

El efecto de la viscosidad relativo al de inercia, puede representarse por el número de Reynolds, que se define como: (Zucarelli, Morresi, 2019)

$$\text{Re} = \frac{V * D}{U} \quad (1)$$

Donde:

V: Velocidad media

D: Profundidad de flujo.

U: Viscosidad cinemática

Valores pequeños de Re se utilizan para describir el flujo laminar, mientras que valores mayores corresponden al flujo turbulento. El rango intermedio corresponde a flujo en transición.

Re<1000 Flujo laminar

Re>3000 Flujo turbulento

### 2.2.2 Número de Froude

El estado del flujo en canales abiertos está gobernado por los efectos de viscosidad y gravedad relativa a las fuerzas de inercia del flujo. El efecto de la gravedad se representa por una relación de las fuerzas de inercia a las fuerzas de gravedad. Esta relación se define por el número de Froude y es el cociente entre la velocidad media y la celeridad relativa de la onda dinámica: (Zucarelli, Morresi, 2019)

$$Fr = \frac{Vt}{\sqrt{gL}} \quad (2)$$

Donde:

Fr: número de Froude.

Vt: velocidad promedio total de la lámina de agua (m/s).

g: aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>)

L: distancia desde el instrumento de medición al vertedero (m)

Mediante este número se clasifica el flujo en subcrítico, supercrítico o crítico.

Fr<1 Flujo subcrítico

Fr>1 Flujo supercrítico

## 2.3 SISTEMAS DE MEDICIÓN Y CONTROL

Existen muchos dispositivos para medir el flujo. Algunos miden el flujo volumétrico en forma directa, mientras que otros miden una velocidad promedio del flujo que se convierte a flujo volumétrico por medio de la ecuación de caudal. Algunos proporcionan mediciones primarias directas, en tanto otros requieren de calibración o la aplicación de un coeficiente de descarga a la salida observada del instrumento. (Mott, 2006).

### 2.3.1 Compuertas hidráulicas

Este tipo de aforador está compuesto por una puerta móvil mecánica utilizada para el control de flujo de agua y mantenimiento en los diferentes proyectos de ingeniería, tales como presas, canales y proyectos de irrigación; son muy útiles para el control de inundaciones, sistemas de drenaje, control de la entrada de agua intrapredial, entre otros (Amaya Cueva, 2016).

### 2.3.2 Canaleta Parshall o Venturi

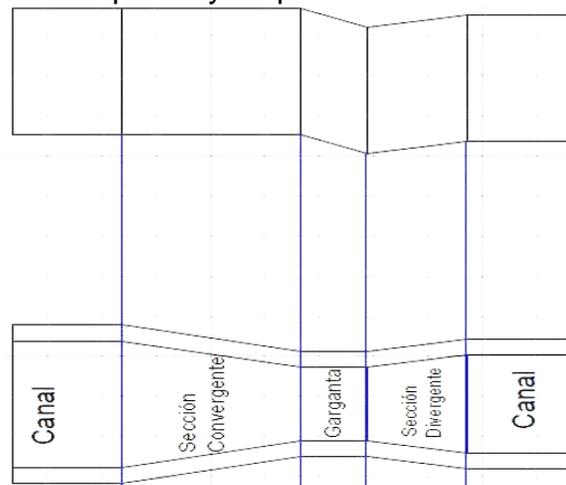
El aforador Parshall es una estructura hidráulica experimental que permite medir la cantidad de agua que pasa por la sección de un canal, consta de cuatro partes: la transición de entrada donde el piso se eleva sobre el fondo original del canal con una pendiente suave, la sección convergente donde el fondo es horizontal y el ancho va disminuyendo, la garganta es en la parte donde el piso vuelve a bajar para terminar en con otra pendiente ascendente en la última parte del aforador llamada sección divergente (Pedroza González, 2011).

### 2.3.3 Canaleta Washington State College (WSC)

El aforador de profundidad crítica WSC cuenta con un diseño similar al Parshall, puede fabricarse en fibra de vidrio o en láminas de metal, es útil como aforador portátil para mediciones de caudales pequeños en corrientes o canales sin revestir (Chamberlain, 1952).

Es necesario investigar a profundidad para asegurar mediciones exactas y disminuir la incertidumbre en la lectura del dispositivo.

Figura 3. Vista en planta y de perfil de canaleta Parshall.



Fuente: Autores.

### 2.3.4 Vertederos

Son diques o paredes que presentan una escotadura de forma regular a través de la cual fluye la corriente líquida (Marbello Pérez, 2005), cuentan con ventajas como mayor precisión en los aforos, son fáciles de construir, poca posibilidad de obstrucción con materiales flotantes presentes en el agua, además de una duración relativamente larga (Lux Monroy, 2010).

Los vertederos se clasifican según su forma geométrica (triangulares, rectangulares, trapezoidales, parabólicos, etc.) y/o según su espesor de pared (pared gruesa o pared delgada); independientemente de su clasificación sus partes constitutivas serán: la cresta, umbral o coronamiento del vertedero a la arista o superficie inferior de la escotadura, la longitud del vertedero a la distancia entre las paredes verticales que lo limitan sobre el umbral, la altura o espesor de la masa líquida existente sobre el nivel del umbral aguas arriba de éste se denomina carga (Pérez, 2005).

Según Creus, 2012 cada tipo de vertedero cuenta con una ecuación de calibración o patronamiento generada de forma empírica, sin embargo, obedece a la ecuación

general de los vertederos donde el caudal es proporcional a la diferencia de alturas. Dicha fórmula se presenta a continuación:

$$Q = K * L * H^m \quad (3)$$

Donde:

Q: Caudal (m<sup>3</sup>/s).

K: Coeficiente de descarga.

L: Longitud del vertedero (m).

H: Carga hidráulica o diferencia máxima de alturas (m).

m: Exponente

n: Número de contracciones.

Cabe aclarar que la variable n sólo aparece para vertederos con contracciones, además que los valores de K y m son valores constantes que dependen del tipo de vertedero.

#### 2.3.4.1 Vertedero rectangular

James B. Francis realizó una serie de experimentos entre 1848 y 1852 en determinadas condiciones para encontrar la expresión del coeficiente de descarga en vertederos de pared delgada (Ngamalieu Nengoue, 2015). Las condiciones límites de sus experiencias se mencionan a continuación.

Longitud del vertedero  $L = 3.05\text{m}$

Carga sobre el vertedero  $0.18 \leq H \leq 0.58\text{m}$

Altura del umbral  $0.6 \leq P \leq 1.5\text{m}$

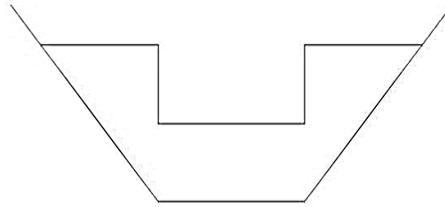
$$Q = 1,84 * L * H^{\frac{3}{2}} \quad (4)$$

Si se considera un vertedero con contracciones laterales se tiene que:

$$Q = 1,84 * \left( L - \frac{n * H}{10} \right) * H^{\frac{3}{2}} \quad (5)$$

La figura 2 muestra la vista frontal de un vertedero rectangular de pared delgada con dos contracciones.

Figura 4. Vista frontal de un vertedero rectangular.



Fuente: Autores.

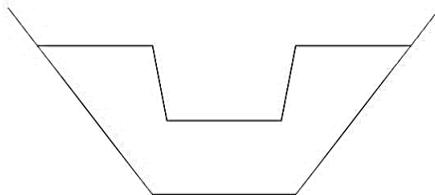
#### 2.3.4.2 Vertedero trapezoidal

Cipolletti concibió la idea de encontrar cuánto debían inclinarse los lados de un vertedero rectangular para que se logre, por este concepto, una descarga triangular que compense la disminución de descargar por efecto de las contracciones laterales del vertedero rectangular. La ecuación que representa el caudal de este tipo de vertedero resulta de igualar el caudal de la sección rectangular y el caudal de las contracciones laterales, teniendo como resultado la siguiente expresión:

$$Q = 1,86 * L * H^{\frac{3}{2}} \quad (6)$$

Donde la velocidad de aproximación se considera despreciable (Chereque Moran, 1987). La vista frontal de un vertedero trapezoidal o Cipolletti de pared delgada se muestra en la figura 3.

Figura 5. Vista frontal de un vertedero trapezoidal.



Fuente: Autores.

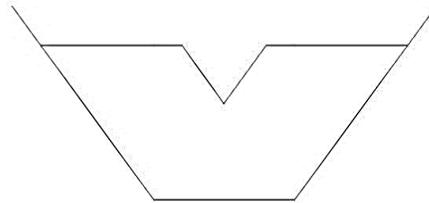
#### 2.3.4.3 Vertedero triangular o en V

Cuando los caudales son pequeños, es conveniente aforar usando vertederos en forma de V debido a que, como la presión varía con la altura, se produce un gradiente de velocidad entre la parte inferior del triángulo y la parte superior produciéndose una variación en la lectura de la carga hidráulica H más representativa, según lo anterior se tiene la siguiente expresión:

$$Q = 1,4 * H^{\frac{5}{2}} \quad (7)$$

Esta ecuación es válida cuando el ángulo de escotadura  $\beta$  es igual a  $90^\circ$  (Frutos Caravaca, 2014). La figura 4 muestra la vista frontal de un vertedero triangular de pared delgada.

Figura 6. Vista frontal de un vertedero triangular.



Fuente: Autores.

## 2.4 MODELOS MATEMÁTICOS

El modelamiento matemático se realiza a partir una ecuación o un conjuntos de ecuaciones que describen el comportamiento de un sistema; existen dos tipos de modelamiento: lineal y no lineal; los modelos lineales tienen múltiples aplicaciones debido al ajuste de los parámetros, la interpretación y/o análisis de sus resultados pueden hacerse de forma sencilla, sin embargo existen fenómenos que no pueden ser explicados a través de este tipo de modelos, es decir, que los parámetros utilizados se ajustan mejor cuando se modelan de manera no lineal (Rivas M, López P & Velasco M, 1993).

### 2.4.1 Regresión no lineal

La regresión no lineal se usa cuando se quieren estimar los parámetros de un modelo no lineal que relaciona una respuesta "Y" con algunas variables control o predictores.

Los modelos no lineales se originan cuando un investigador obtiene, por el desarrollo de una teoría o por otra situación, una relación funcional en la que los parámetros son no lineales. Es necesario la realización de estimaciones de mínimos cuadrados y la producción de un resumen estadístico por aproximación lineal; además de verificar si el ajuste del modelo es adecuado o no, es decir, si las estimaciones son significativas (Rivas M, López P & Velasco M, 1993).

### 2.4.2 Indicadores de nivel de confianza de los modelos

"Error medio: Es el estadístico principal para medir la bondad de ajuste del modelo de tendencia a la serie. Puede estimarse como el valor absoluto de la media aritmética de las diferencias entre valores observados y esperados

o simplemente como el valor absoluto de la suma de esas diferencias. Mientras más cercano esté el error medio a 0 más adecuado será el modelo de tendencia.

**Error cuadrático medio (MSE):** Esta medida es la media aritmética de la suma de las diferencias cuadráticas entre valores de la serie y valores producidos por el modelo para iguales momentos de tiempo. Tiene el inconveniente de venir expresado en unidades cuadradas de la media de la variable en la serie. Para comparaciones entre diferentes clases de modelos probados a la tendencia de una misma serie, mientras menor sea, más adecuado el modelo.

**Error absoluto medio (MAE):** Esta medida es la media aritmética de la suma de las diferencias absolutas entre valores de la serie y valores obtenidos con el modelo en iguales momentos de tiempo. Mientras el error medio viene dado por el valor absoluto de la suma de diferencias, el error absoluto medio viene dado por la suma de diferencias absolutas. Para comparaciones entre clases diferentes de modelos de tendencia ajustados a una serie, mientras menor sea, más adecuada la clase de modelos.

**Porcentaje de error cuadrático medio (% MSE):** Este indicador es el mismo error cuadrático medio, pero expresado en porcentaje. Tiene como finalidad salvar los inconvenientes del error cuadrático medio de expresarse como el cuadrado de las unidades de medida de las observaciones. Con fines de comparación, mientras menor sea, más adecuado el modelo de tendencia.

**Porcentaje de error absoluto medio (% MAE):** Es el mismo error absoluto medio expresado en porcentaje. Tiene la misma finalidad del anterior, relativo al error absoluto medio. En comparaciones entre modelos de tendencia, mientras menor sea, más adecuado el modelo.

**Porcentaje de error medio:** Es el mismo error medio expresado en porcentaje. Tiene la misma finalidad que los estimadores anteriores, pero es de uso menos frecuente. Mientras menor sea, más adecuado será el modelo.

**Suma de error cuadrático:** Este estadístico es el numerador del error cuadrático medio. Tiene el mismo inconveniente del error cuadrático medio. Mientras menor sea, más adecuado será el modelo.

**Raíz del error medio cuadrático (RMSE):** Esta medida es la raíz cuadrada del promedio de la suma de diferencias cuadráticas entre valores observados en la serie y los esperados según el modelo de tendencia. Al igual que los anteriores, mientras menor sea, más adecuado el modelo.” (Aguirre Jaime, 1994).

### 3. METODOLOGÍA

Para el diseño del prototipo se realizó la revisión y prueba de vertederos disponibles en el laboratorio de hidráulica para reconocer los instrumentos que ofrecían las mejores mediciones para diferentes condiciones de caudal; posteriormente se diseñó y fabricó el dispositivo que luego fue probado en el distrito de riego de “El Juncal”.

#### 3.1 SELECCIÓN DE TIPO DE VERTEDERO

##### 3.1.1 Pruebas de laboratorio

Se realizaron pruebas de medición de caudales a partir del método volumétrico con el uso del módulo HM150 con los vertederos disponibles en el laboratorio de hidráulica de la facultad de Ingeniería (rectangular y triangular), generando curvas de calibración que consisten en la representación de manera gráfica de los datos de Altura (cm) vs Caudal (L/s) con el fin de identificar los vertederos que tuvieran un mejor funcionamiento en diferentes condiciones de caudal.

Figura 7. Módulo de prueba HM150.



Fuente: Autores.

Figura 8. Vertederos utilizados para las pruebas de medición de caudal en el laboratorio de hidráulica.



Fuente: Autores.

## 3.2 DISEÑO DEL PROTOTIPO

### 3.2.1 Identificación de restricciones para el diseño

Se realizó el reconocimiento de las entradas intraprediales a los lotes indicados por el jefe operativo de Asojuncal especificados en la tabla 1, para identificar los espacios disponibles donde se deberían instalar los dispositivos, esto con el fin de lograr un dimensionamiento adecuado para las condiciones existentes.

### 3.2.2 Dimensionamiento del dispositivo

Posterior a la identificación de las condiciones estructurales donde se observaron tuberías de salida con tramos de dispersión amplios y estructuras de aducción y conducción en las parcelas visitadas, se dimensionó el dispositivo de manera que satisficiera las necesidades existentes.

Asimismo, se determinó que el vertedero sería fabricado en fibra de vidrio con grosor de 4mm debido a su alta resistencia, versatilidad, ligereza, durabilidad y bajo costo; además de contar con dos refuerzos de acero a lo largo de la canaleta y dos más a lo ancho.

El diseño del dispositivo se basó en las características hidráulicas de la canaleta Parshall, seleccionando una zona de convergencia adecuada para aumentar la velocidad de flujo y disminuir de esta manera la posibilidad de sedimentación de las partículas y una zona de divergencia que redujera la velocidad del flujo al igual que la posibilidad de erosión.

La altura total de la canaleta se dimensionó para casos donde el caudal supere los 60 L/s con el fin de satisfacer las necesidades expresadas según la información proporcionada por el distrito de riego, dicha información indica que la dotación es

de 3 L/s\*ha con existencia de parcelas de hasta 40 ha. La tabla 1 nos muestra los predios caracterizados en el distrito de riego el Juncal:

Tabla 1. Listado de predios inscritos al distrito de riego “El Juncal” seleccionados para la instalación del prototipo.

Nombre predio	Coordenadas*		Dotación (L/s)	Extensión sembrada (Ha)	Abastecido por
	Norte	Este			
Trapichito	804293	861370	50	40	Canal Juncal
La Esmeralda	806710	863061	30	10	Canal Juncal
El Lago	809113	861207	48	16	Canal principal
El Naranjo	811011	861659	24	8	Canal lateral 4C
Juventus	808502	860184	33	11	Canal lateral 3
El Samán	808551	860272	36	12	Canal lateral 3
La Conquista	803575	861406	24	8	Canal 5
La Planicie	803692	861495	30	10	Canal 5
Gualanday	805276	861632	80	26	Canal Juncal
Las Margaritas	807724	861470	60	20	Canal lateral 2
La Florida	810082	861011	24	8	Canal lateral 4B
El Palmar	807783	861758	36	12	Canal lateral 2

\* Sistema de coordenadas Datum Magna Sirgas origen Bogotá WGS 84

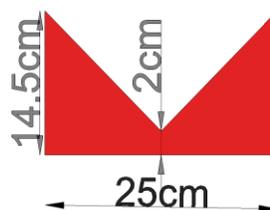
\* Todos los predios visitados se encuentran ubicados en la Vereda El Juncal, Palermo, Huila.

Fuente: Autores.

Este dispositivo cuenta con tres sistemas de medición de altura, la cinta métrica, la regla y el flotador, donde el funcionamiento de este último se logró a través de una ranura en la garganta y una cajilla de 6,25 cm<sup>2</sup> de área transversal.

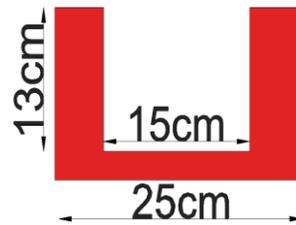
Se diseñaron dos vertederos para la medición de caudales a partir de 3 L/s, uno de forma rectangular con 2 contracciones y otro con forma triangular sin contracciones. Teniendo en cuenta que los vertederos se ubican a la salida de la garganta de la canaleta, la longitud total de estos es igual al ancho de garganta de la canaleta; el dimensionamiento de los vertederos se calculó con la ecuación 5 y 7 respectivamente. Las dimensiones de dichos vertederos se muestran en las figuras 9 y 10:

Figura 9. Vista frontal vertedero triangular.



Fuente: Autores.

Figura 10. Vista frontal vertedero rectangular.



Fuente: Autores.

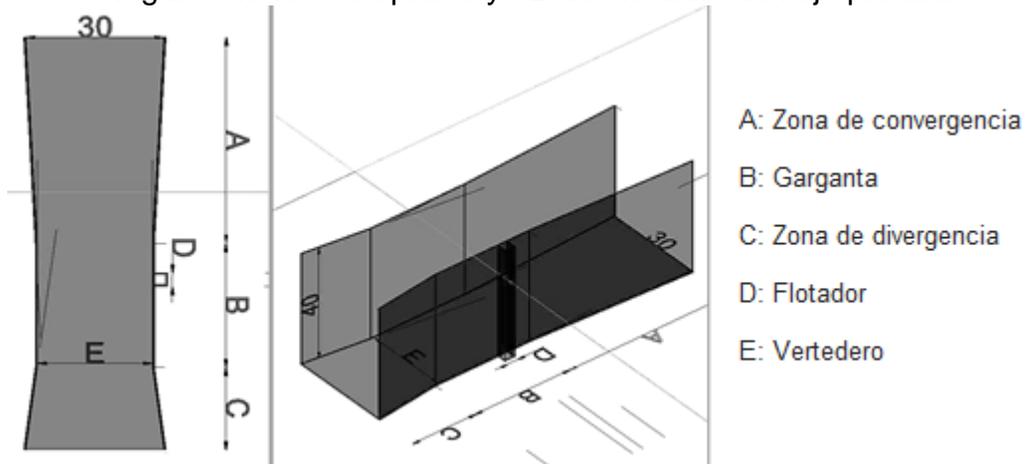
Como la altura de los vertederos y la canaleta no es igual, la altura restante se asumió como un vertedero rectangular sin contracciones. Las dimensiones del dispositivo se evidencian en la tabla 2 y su respectivo plano con vista en planta y 3D en la figura 11:

Tabla 2. Dimensiones del dispositivo medidor de flujo predial.

Componente	Ítem	Dimensiones (cm)				
		Largo	Alto	Ancho		
				Entrada	Salida	
Canaleta	Zona de convergencia	50	40	30	25	
	Garganta	30	40	25	25	
	Zona de divergencia	20	40	25	30	
Medidor de flujo	Vertedero	Rectangular	15	13	-	-
		Triangular	25	14,5	-	-
Medidor de altura	Flotador	Ubicado a 20 cm del vertedero				

Fuente: Autores.

Figura 11. Vista en planta y 3D del medidor de flujo predial.



- A: Zona de convergencia
- B: Garganta
- C: Zona de divergencia
- D: Flotador
- E: Vertedero

Fuente: Autores.

### 3.3 MEDICIÓN DE CAUDALES

#### 3.3.1 Aforos intraprediales

El dispositivo se instaló en los predios previamente visitados asegurando una pendiente cero en la superficie de entrada al lote, en algunos casos fue necesaria la adecuación del terreno para garantizar dicha condición y una medición correcta.

Para la medición de las velocidades se utilizó un minimolinete OTT C2 calibrado suministrado por el distrito de riego, este instrumento se localizó en tres puntos diferentes a lo ancho de la entrada del vertedero y cada 5 cm de la altura del dispositivo según la condición de medición logrando crear diferentes perfiles de velocidad. Con cada uno de los vertederos diseñados e instalados en la canaleta se tomaron 1737 datos de velocidad con los cuales se realizaron 579 perfiles de velocidad, de ellos se calcularon 119 caudales.

La siguiente ecuación tomada del manual del minimolinete OTT C2 se utiliza para calcular la velocidad.

$$n = \frac{U}{t} \quad (8)$$

Donde:

n: revoluciones por segundo.

U: Revoluciones de la hélice.

t: Tiempo de medición (s).

La velocidad de la corriente se halla con la ecuación establecida por el fabricante para la hélice No 3.

$$V = 0,2520 * n + 0,006 \quad (9)$$

Donde:

V: Velocidad del flujo (m/s).

n: Revoluciones por segundo.

La siguiente expresión se utilizó para determinar la velocidad promedio de cada perfil.

$$V_{prom} = \frac{V_{p1} + V_{p2} + \dots + V_{pn}}{n} \quad (10)$$

Donde:

Vprom: Velocidad promedio a esa altura del molinete (m/s).

Vp<sub>1</sub>, Vp<sub>2</sub> Y Vp<sub>n</sub>: Velocidad calculada a cada uno de muestra (m/s).

$$V_t = \frac{\sum V_{prom}}{N} \quad (11)$$

Donde:

Vt: Velocidad promedio total de la lámina de agua (m/s).

Vprom: Velocidades promedio de las alturas de molinete (m/s).

N: Número de alturas de molinete en el ensayo.

La determinación del área de flujo de cada uno de los vertederos se calculó a partir de la ecuación del área correspondiente a sus formas geométricas.

$$A_{tr} = \frac{b * h}{2} \quad (12)$$

$$A_{rec} = b * h \quad (13)$$

Donde:

Atr: Área del triángulo (m<sup>2</sup>).

Arec: Área del rectángulo (m<sup>2</sup>).

b: Ancho de garganta (m).

h: Carga hidráulica a la entrada del vertedero (m).

La ecuación 11 se utilizó para el cálculo del área de flujo cuando este superó la altura del vertedero.

$$A_{total} = A_{ver} + A_{rest} \quad (14)$$

Donde:

Atotal: Área total ocupada por el fluido.

Avert: Área del vertedero (m<sup>2</sup>).

Arest: Área restante (m<sup>2</sup>).

El caudal correspondiente a cada promedio de velocidad se calculó a partir de la ecuación de continuidad indicada a continuación.

$$Q = (A_{total} * V_{prom}) * 1000 \quad (15)$$

Donde:

Q: Caudal (L/s).

A<sub>total</sub>: Área total ocupada por el fluido (m<sup>2</sup>).

V<sub>t</sub>: Velocidad promedio total de la lámina de agua (m/s).

El número de Froude se calculó con la ecuación (2) para clasificar el flujo que atravesaba el vertedero y los instrumentos de medición según la velocidad promedio.

### 3.4 CALIBRACIÓN DEL DISPOSITIVO

Con el 84 % de los datos obtenidos experimentalmente de cada serie de datos tomados con cada instrumento se crearon gráficas de altura (cm) vs caudal (L/s).

Para ajustar posibles modelos de tendencia específica de las series de datos de dichas gráficas y determinar los valores de la raíz del error cuadrático medio y coeficiente de determinación ajustado del modelo se utilizó la herramienta Curve Fitting del software matemático Matlab R2017B versión 9.3.0.713579.

A partir de la información obtenida se estableció el modelo exponencial como el modelo específico que mejor representaba la tendencia de cada serie de datos. Una vez ajustado el modelo, se generó la ecuación de la curva, es decir, la ecuación de calibración del prototipo.

### 3.5 VALIDACIÓN DEL MODELO

Una vez ajustado el modelo, se procedió a la verificación o validación de este, para esto se utilizaron los datos restantes, es decir, el 16% de los datos obtenidos experimentalmente.

Para dicha comprobación se utilizó el coeficiente de determinación ajustado ( $R^2_{\text{ajustado}}$ ) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) para medir la bondad de ajuste de los modelos, además el error medio absoluto (MAE) y el error cuadrático medio relativo (RRMSE) se utilizaron como parámetros de evaluación para la validación del modelo propuesto y selección del tipo de vertedero, así como del método de medición de altura.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 VERTEDERO TRIANGULAR

#### 4.1.1 Caudal promedio

En el aforo de la canaleta con el vertedero triangular se recolectaron 119 datos de caudal utilizando los diferentes métodos de medición de altura ya mencionados. En la tabla 3 se muestra los caudales promedios obtenidos a partir de cada uno de los métodos de medición de altura.

Tabla 3. Valores promedio de caudales por cada centímetro de altura para el vertedero triangular.

Rangos de altura (cm)	Caudal promedio (L/s)		
	Cinta métrica	Regla	Flotador
<10	<1	-	-
12-12,9	1,49	-	1
13-13,9	-	1	2,50
14-14,9	3,51	4	4,52
15-15,9	5,90	6,73	6,80
16-16,9	6,59	6,32	6,14
17-17,9	8,69	9,86	7,81
18-18,9	11,38	11,28	12,00
19-19,9	12,73	12,60	11,82
20-20,9	15,90	15,50	16,44
21-21,9	19,15	19,01	18,59
22-22,9	20,93	20,28	20,18
23-23,9	23,21	24,04	23,06
24-24,9	27,73	28,43	27,54
25-25,9	31,83	30,10	32,91
26-26,9	32,74	33,94	33,50
27-27,9	37,14	35,18	35,46
28-28,9	40,32	45,70	40,32
29-29,9	44,69	44,49	45,33
30-30,9	52,18	50,40	51,97
31-31,9	54,06	53,55	53,46
32-32,9	63,66	60,30	60,99
33-33,9	65,69	65,89	65,76
34-34,9	72,65	69,30	68,74
35-40	73-90	73-90	73-90

Fuente: Autores.

Según los datos obtenidos con las mediciones de altura por los tres métodos utilizando este tipo de vertedero, el caudal máximo que puede ser medido es de 90 L/s. La medición de caudales mayores a 1 L/s se pudieron realizar a partir de 12 cm de altura, es por esto que la medición de la dotación por hectárea mínima establecida por el distrito se logró con alturas mayores a 13,9 cm. La incoherencia de algunos valores de caudal respecto a la altura pudo deberse a errores en la medición de la velocidad realizada con el minimolinete o en la medición de la altura. La diferencia entre los valores de caudal consecutivos aumentó a partir de los 28 cm aproximadamente.

#### 4.1.2 Número de Froude

En la tabla 4 se muestran los valores máximos y mínimos del número de Froude para cada instrumento de medición evaluado para este tipo de vertedero:

Tabla 4. Rango de número de Froude para el vertedero triangular.

Altura (cm)	Número de Froude					
	Cinta métrica		Regla		Flotador	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
<10	0,0393	0,0393	0,0555	0,0555	0,0393	0,0393
11-11,9	-	-	-	-	0,0717	0,0717
12-12,9	0,0717	0,0717	0,1015	0,1015	0,1032	0,1032
14-14,9	0,1817	0,1032	0,2570	0,1460	0,1817	0,1817
15-15,9	0,2175	0,2175	0,3783	0,2515	0,2675	0,2175
16-16,9	0,2675	0,1779	0,3166	0,2614	0,2052	0,1779
17-17,9	0,2598	0,2155	0,5931	0,2902	0,2598	0,2155
18-18,9	0,4194	0,2235	0,4885	0,3188	0,4194	0,2235
19-19,9	0,3464	0,2254	0,4898	0,3161	0,3126	0,2254
20-20,9	0,4501	0,3006	0,6365	0,3941	0,4501	0,3134
21-21,9	0,4818	0,3074	0,6814	0,4252	0,4818	0,2786
22-22,9	0,4928	0,3339	0,5722	0,4722	0,4928	0,3074
23-23,9	0,4988	0,3661	0,6969	0,5397	0,4988	0,3599
24-24,9	0,4924	0,4326	0,7054	0,6198	0,4790	0,4383
25-25,9	0,5544	0,4674	0,4868	0,7334	0,5544	0,4910
26-26,9	0,5388	0,3442	0,7840	0,5839	0,6872	0,3442
27-27,9	0,6872	0,4205	0,9719	0,5573	0,5574	0,4205
28-28,9	0,6985	0,3941	0,9878	0,6418	0,6985	0,3941
29-29,9	0,6256	0,4820	0,8746	0,6817	0,6256	0,4820
30-30,9	0,6703	0,5988	0,9189	0,8468	0,6806	0,5988
31-31,9	0,6848	0,5145	0,9625	0,7276	0,6848	0,5145

Fuente: Autores.

Tabla 4. Continuación

Altura (cm)	Número de Froude					
	Cinta métrica		Regla		Flotador	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
32-32,9	0,7236	0,6781	1,0233	0,9298	0,7121	0,6721
33-33,9	0,7474	0,6911	1,0570	0,9675	0,7474	0,6911
34-34,9	0,7476	0,6861	1,0572	0,9679	0,7474	0,6861
35-40	0,7687	0,6844	1,0871	1,0080	0,7687	0,6844

Fuente: Autores.

Los incrementos graduales de los números de Froude respecto a las alturas medidas con los tres métodos, se deben al aumento de velocidad ocasionado por el incremento del caudal.

Para los datos correspondientes a las mediciones realizadas con la cinta métrica y el flotador, los resultados fueron menores a 1 indicando que el flujo en el punto de medición era subcrítico, es decir que se cumplieron las condiciones ideales en las entradas intraprediales para que las mediciones de las alturas fueran confiables. Mientras los resultados para la regla presentaron números de Froude mayores a 1 a alturas mayores a 32 cm; esto indica que el estado del flujo es supercrítico, esta condición puede deberse a la ubicación del instrumento (10 cm del vertedero) donde la velocidad de flujo era mayor respecto a la velocidad existente en la ubicación de los otros dos métodos (20 cm del vertedero). En caudales superiores a 60 L/s el flujo es muy turbulento dificultando la medida exacta en la regla.

#### 4.1.3 Calibración

Como indican Hussain, Ahmad & Asawa, 2011, Kumar, Ahmad & Kothiyari, 2010, Hussain, Ahmad & Asawa, 2011 y Hashid, Hussain & Ahmad, 2015, para la calibración de este tipo de ensayos se utiliza más del 80% de los datos experimentales para la generación del modelo. Los resultados obtenidos para evaluar cada modelo se observan en la Tabla 5.

Tabla 5. Evaluación de los modelos para el vertedero triangular

Instrumento	$R^2_{ajustado}$	RMSE
Cinta métrica	0,9605	4,3586
Regla	0,9708	3,7482
Flotador	0,9589	4,4435

Fuente: Autores.

Los modelos de tendencia generados a partir de los datos de altura medidos con los tres métodos de medición de altura para el vertedero triangular con la herramienta Curve Fitting tuvieron una alta bondad de ajuste, indicando que los modelos

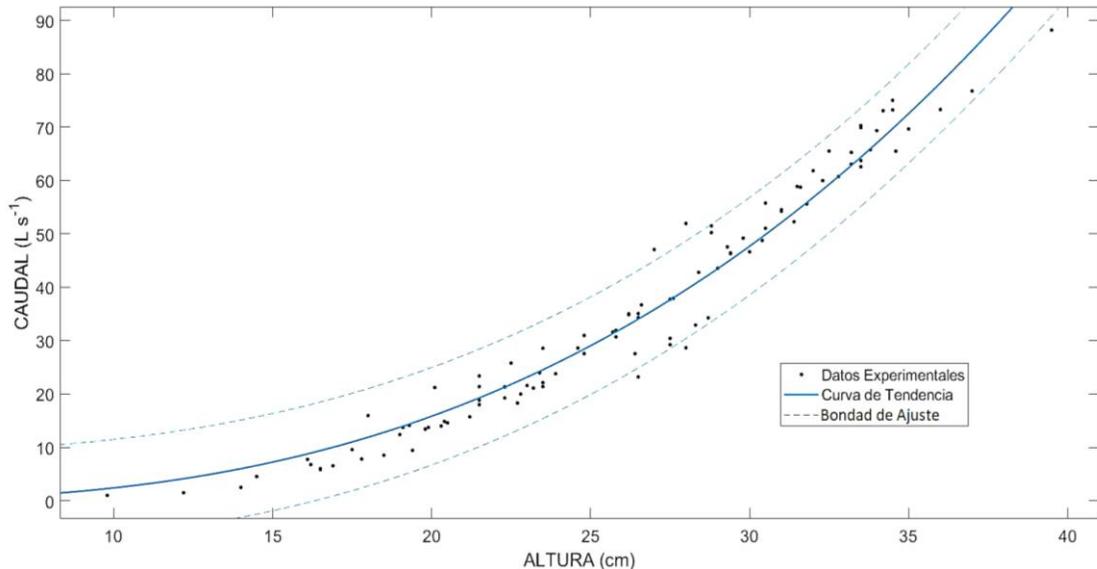
escogidos fueron los apropiados para los datos experimentales, como lo señalan Emiroglu, Agaccioglu & Kaya, 2011 y Hashid, Hussain & Ahmad, 2015 quienes afirman que un coeficiente ajustado mayor al 90% es un valor aceptable. Además, las mediciones son confiables según Sandoval Mendoza, Juárez Bonilla, Brown Manrique, Mujica Cervantes, Bonilla Rocha & Gallardo Bautista, 2017 porque los valores de error no superan el 5%.

#### 4.1.3.1 Calibración de la cinta métrica

A continuación se presenta la ecuación generada por la herramienta Curve Fitting para la cinta métrica con el vertedero triangular y su respectiva grafica de H vs Q (ver figura 12):

$$Q = 0.00458 * H^{2.72} \quad (16)$$

Figura 12. Gráfica H vs Q con cinta métrica para el vertedero triangular.



Fuente: Autores.

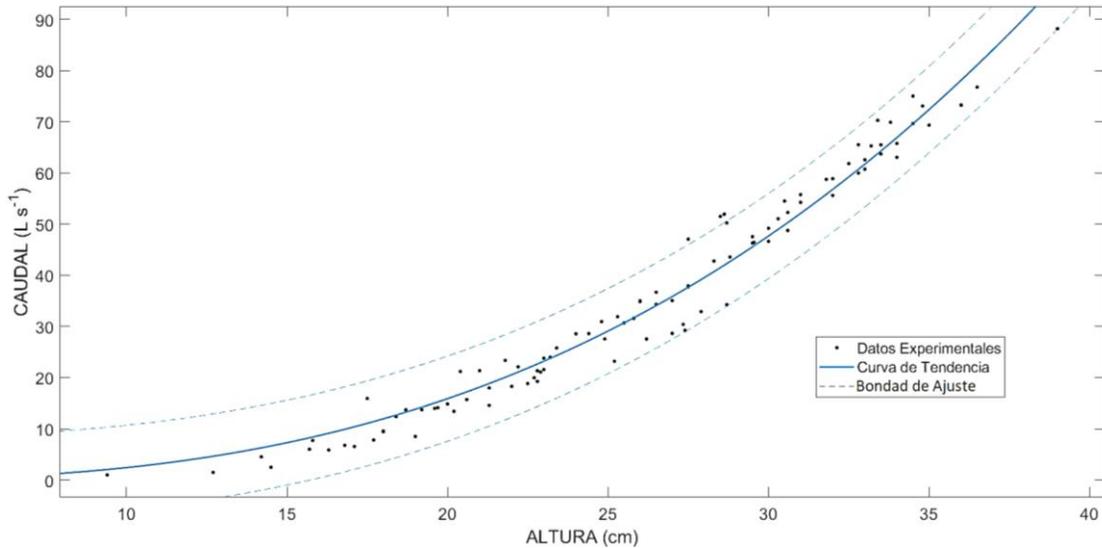
En la figura 12 se observa el ajuste de los valores de altura medidos con la cinta métrica y caudal a la curva de tendencia exponencial generada por la regresión no lineal permitiendo identificar una mayor dispersión de los datos de caudal correspondientes a alturas menores a 30 cm respecto a los datos de alturas mayores a 30 cm; además que la mayor desviación se encuentra en los caudales calculados con las mediciones realizadas entre 25-30 cm. A pesar de esto, este modelo tuvo un ajuste del 96,05% y un RSME de 4,3586.

#### 4.1.3.2 Calibración de la regla

La figura 13 muestra la curva de tendencia exponencial para la regla en el vertedero triangular y la ecuación de la curva de tendencia generada para la regla es la siguiente:

$$Q = 0.004766 * H^{2.708} \quad (17)$$

Figura 13. Gráfica H vs Q con la regla para el vertedero triangular.



Fuente: Autores.

La gráfica realizada con los datos experimentales tomados con la regla y la curva de calibración generada con el modelo de tendencia exponencial indica que la mayoría de los datos se ajustaron a la curva de calibración establecida con una bondad de ajuste del 97,08% y un RMSE de 3,748.

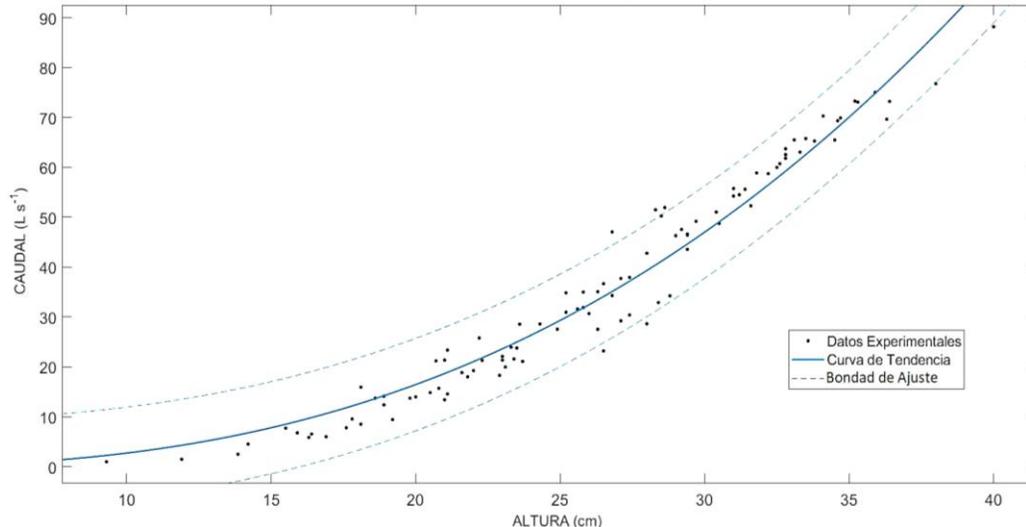
El modelo generado para este método fue el que más se ajustó a los valores tomados en campo con el dispositivo, adicionalmente su error es menor al obtenido en la calibración de la cinta métrica y el flotador.

#### 4.1.3.3 Calibración del flotador

La expresión que representa este modelo de tendencia se muestra a continuación al igual que la gráfica de H vs Q (ver figura 14):

$$Q = 0.007073 * H^{2.588} \quad (18)$$

Figura 14. Gráfica H vs Q con el flotador para el vertedero triangular.



Fuente: Autores.

Los resultados del ajuste obtenidos para los datos experimentales respecto a la curva del modelo de tendencia establecida por la herramienta Curve Fitting, muestran un error de 4,443 con un ajuste del 95,89%. En la Figura 14 se observa la dispersión de los datos a partir de alturas mayores a 25 cm; a pesar de que la desviación es baja y aceptable según la literatura, este modelo es el menos ajustado de todos los generados para este tipo de vertedero.

Según las Figuras 12, 13 y 14, las mediciones realizadas con los tres métodos presentan mayor dispersión para caudales mayores a 25 L/s, lo anterior es lógico para Marbello Pérez, 2005 debido a que los vertederos triangulares son recomendables para gastos inferiores a 30 L/s. Esto es, que para caudales como los manejados en el distrito de riego este tipo de vertedero puede ser una limitante en la medición de los caudales.

## 4.2 VERTEDERO RECTANGULAR

### 4.2.1 Caudal promedio

Se recolectaron 119 datos de caudales utilizando los métodos para medición de altura ya mencionados. Según los datos obtenidos este vertedero permite la medición de caudales entre 1-100 L/s, el caudal mínimo es medido a partir de los 5 cm de altura con cualquiera de los métodos de medición, mientras la dotación mínima del distrito se mide a partir de los 8 cm. En la tabla 6 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 6. Valores promedio de caudales por cada centímetro de altura para el vertedero rectangular.

Rangos de altura (cm)	Caudal promedio (L/s)		
	Cinta métrica	Regla	Flotador
>5	1	1	1
7-7,9	2,49	2,49	2,49
8-8,9	3,52	3,52	3,52
9-9,9	5,11	5,11	4,70
10-10,9	5,07	4,72	5,46
11-11,9	5,64	5,70	6,24
12-12,9	6,97	6,84	7,09
13-13,9	-	7,09	-
14-14,9	9,78	9,78	9,78
15-15,9	-	-	-
16-16,9	12,95	12,26	13,35
17-17,9	15,92	15,35	16,02
18-18,9	16,31	16,44	17,77
19-19,9	20,04	18,66	22,73
20-20,9	24,62	24,37	25,48
21-21,9	26,31	25,56	26,45
22-22,9	28,45	27,99	31,43
23-23,9	31,20	31,37	34,15
24-24,9	35,94	34,99	37,27
25-25,9	41,28	41,02	42,13
26-26,9	44,58	44,58	42,38
27-27,9	46,61	46,61	48,39
28-28,9	50,32	48,65	54,26
29-29,9	58,56	60,06	58,55
30-30,9	62,53	65,75	62,65
31-31,9	71,14	69,54	68,74
32-32,9	71,08	71,56	69,46
33-33,9	70,80	71,34	73,52
34-34,9	87,26	82,55	87,08
35-36,9	89,69	88,72	88,72
37-40	90-100	90-100	90-100

Fuente: Autores.

Los caudales correspondientes a alturas medidas con cinta métrica y regla presentan anomalías para alturas de 9 a 10,9 cm y entre los 32-33,9 cm, dichas anomalías pudieron ser ocasionadas por las diferentes condiciones en las que se realizaron los aforos que causaron una irregularidad en cuanto al número de datos medidos a cada altura, las diferentes presiones presentes en el canal surtidor y en las entradas a los predios. Para el rango de alturas de 13-13,9 cm sólo se registró el valor medido

con la regla debido a que los dos métodos restantes presentaron valores menores a 13 cm; sin embargo, atendiendo la afirmación de Bos, Replogle & Clemmens, 1986, se permite un error aleatorio en las lecturas de máximo 10 mm para este tipo de instrumentos de medición a unas condiciones de flujo determinadas, dichos valores fueron tomados como válidos para sus rangos correspondientes. Los valores obtenidos con este tipo de vertedero confirman lo indicado por Marbello Pérez, 2015 donde asegura que los vertederos rectangulares se recomiendan para un amplio rango de caudales.

#### 4.2.2 Número de Froude

En la tabla 7 se muestran los valores máximos y mínimos del número de Froude:

Tabla 7. Rango de número de Froude para el vertedero rectangular.

Altura (cm)	Número de Froude					
	Cinta métrica		Regla		Flotador	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Máximo	Máximo	Máximo
>5	0,1159	0,1159	0,1640	0,1640	0,1159	0,1159
7-7,9	0,1519	0,1519	0,2149	0,2149	0,1519	0,1519
8-8,9	0,2422	0,1792	0,3425	0,2534	0,2422	0,1792
9-9,9	0,2642	0,2642	0,3736	0,3736	0,2642	0,2142
10-10,9	0,2537	0,2142	0,3474	0,3029	0,2537	0,2457
11-11,9	0,2357	0,2357	0,3587	0,3333	0,2781	0,2357
12-12,9	0,2781	0,2721	0,3934	0,3934	0,2721	0,2721
13-13,9	-	-	0,3849	0,3849	-	-
14-14,9	0,3168	0,3106	0,4480	0,4393	0,3168	0,3106
16-16,9	0,3558	0,3005	0,4654	0,4250	0,3558	0,3005
17-17,9	0,3984	0,3554	0,5634	0,5027	0,3531	0,3984
18-18,9	0,3981	0,3531	0,5630	0,4994	0,3981	0,3668
19-19,9	0,4368	0,3918	0,5540	0,5540	0,4780	0,4371
20-20,9	0,4955	0,4371	0,7156	0,6177	0,5060	0,4256
21-21,9	0,5153	0,4256	0,7008	0,6018	0,5153	0,3696
22-22,9	0,5657	0,3696	0,8001	0,5227	0,5657	0,4655
23-23,9	0,5965	0,4538	0,6418	0,8436	0,5965	0,4538
24-24,9	0,6018	0,4343	0,8372	0,6142	0,6364	0,4343
25-25,9	0,6364	0,4635	0,9000	0,6556	0,6629	0,4635
26-26,9	0,6820	0,4948	0,9645	0,6998	0,6820	0,4948
27-27,9	0,6554	0,4966	0,9269	0,7023	0,6554	0,5396
28-28,9	0,7243	0,4521	1,0243	0,6394	0,7495	0,4521
29-29,9	0,7937	0,4738	1,1225	0,6723	0,7749	0,4738
30-30,9	0,8160	0,4754	1,1540	0,9712	0,8160	0,4754

Fuente: Autores.

Tabla 7. Continuación.

Altura (cm)	Número de Froude					
	Cinta métrica		Regla		Flotador	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Máximo	Máximo	Máximo
31-31,9	0,7948	0,7279	1,1234	0,9524	0,7948	0,6734
32-32,9	0,7856	0,6734	1,1109	1,0367	0,7812	0,6953
33-33,9	0,7556	0,6953	1,0685	0,9833	0,7856	0,7038
34-34,9	0,8958	0,7584	1,2668	0,9953	0,8958	0,7556
35-35,9	0,9448	0,8147	1,3362	1,1362	0,9448	0,8401
36-40	0,8474	0,7726	1,1984	1,0926	0,8474	0,7726

Fuente: Autores.

Según el número de Froude calculado para las alturas medidas con la cinta métrica y el flotador, el flujo se mantuvo en estado subcrítico por sus valores menores a 1, el incremento gradual de dicho valor es proporcional al aumento de las alturas indican que las condiciones de medición se mantuvieron constantes en la garganta del vertedero.

Los resultados correspondientes a alturas medidas por la regla presentaron números de Froude mayores a 1 a valores de alturas superiores a 28 cm, es decir, las condiciones de flujo presentadas a esas alturas son supercríticas. Esta condición tiene la misma explicación que en el caso del vertedero triangular debido a que la ubicación no cambio para este ensayo.

#### 4.2.3 Calibración

Tabla 8. Evaluación de los modelos para el vertedero rectangular.

Instrumento	$R^2_{ajustado}$	RMSE
Cinta métrica	0,9673	4,624
Regla	0,9652	4,747
Flotador	0,9755	4

Fuente: Autores.

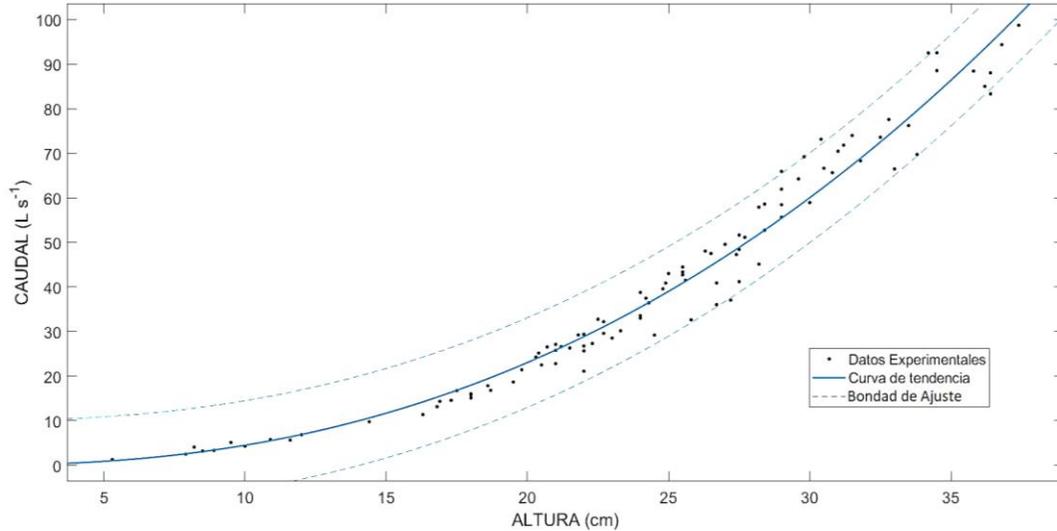
A partir de los resultados obtenidos, podemos afirmar que los modelos de tendencia generados para el vertedero rectangular con cada uno de los métodos de medición de altura presentan una alta bondad de ajuste y mediciones confiables al igual que con el vertedero triangular.

##### 4.2.3.1 Calibración de la cinta métrica

La ecuación generada por la herramienta Curve Fitting para la cinta métrica con el vertedero rectangular es presentada a continuación. Por otro lado la figura 15 muestra la gráfica de H vs Q para este instrumento de medición:

$$Q = 0.01946 * H^{2.362} \quad (19)$$

Figura 15. Gráfica H vs Q con cinta métrica para el vertedero rectangular.



Fuente: Autores.

La figura 15 evidencia que la dispersión de los datos aumenta a alturas mayores de 25 cm, sin embargo, los datos se permanecen en el rango de desviación aceptable, obteniendo un ajuste mayor al 96% y cuenta con un valor de RMSE de 4,624.

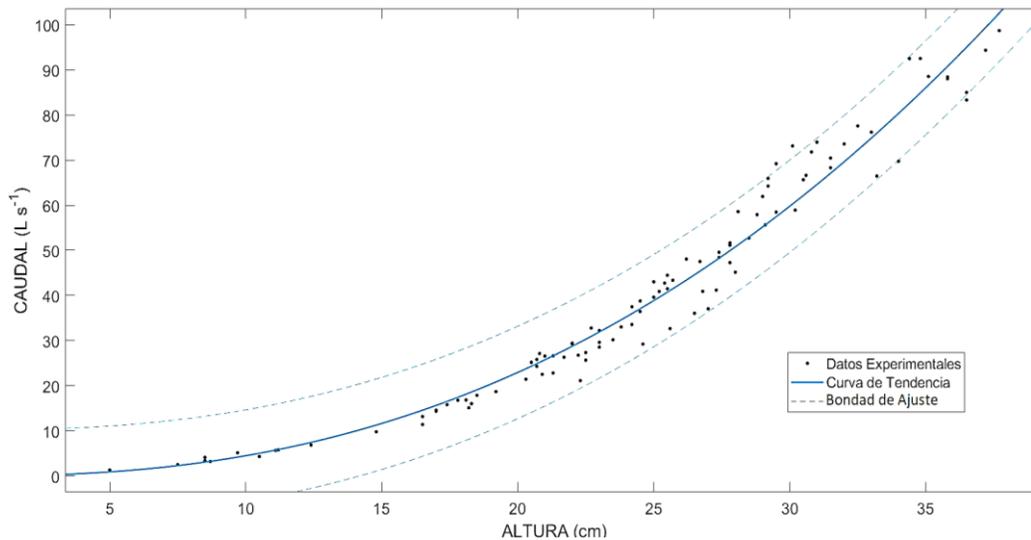
#### 4.2.3.2 Calibración de la regla

La ecuación de la curva de tendencia generada para la regla es la siguiente:

$$Q = 0.01925 * H^{2.364} \quad (20)$$

Este modelo obtuvo un ajuste mayor al 96% con un RMSE de 4,747, a pesar de que estos valores son bajos y aceptables, son ocasionados que este modelo sea el menos ajustado de todos los generados para este vertedero. Además, algunos datos experimentales tomados a 30 cm se alejan considerablemente de la curva de tendencia, es por esto que se observa una dispersión considerable de los datos experimentales, lo anterior se evidencia en la figura 16:

Figura 16. Gráfica H vs Q con la regla para el vertedero rectangular.



Fuente: Autores.

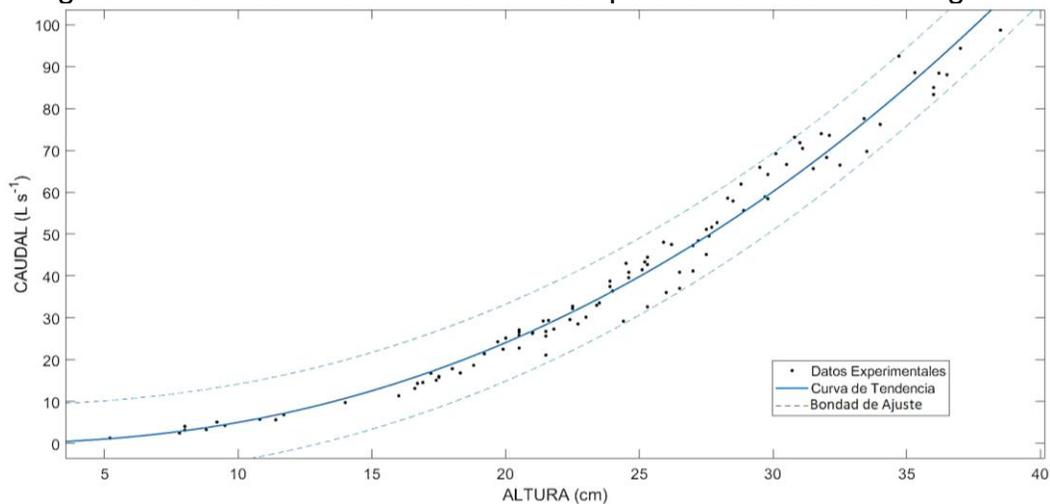
#### 4.2.3.3 Calibración del flotador

La expresión que representa este modelo de tendencia se muestra a continuación:

$$Q = 0.02784 * H^{2.258} \quad (21)$$

Con un ajuste mayor al 97%, este modelo generado obtuvo el mayor ajuste con los datos experimentales respecto a los otros dos métodos de medición de altura, además su error de 4 es menor al obtenido en la calibración de la cinta métrica y la regla. A continuación se muestra la curva de tendencia en la figura 17:

Figura 17. Gráfica H vs Q con el flotador para el vertedero rectangular.



Fuente: Autores.

Cabe resaltar que el modelo del flotador para vertedero rectangular presentó el máximo ajuste respecto a todos los modelos generados por la herramienta Curve Fitting.

### 4.3 VALIDACIÓN DEL MODELO

Los resultados del proceso de validación del modelo a partir del 16% restante de los datos experimentales se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Validación del modelo.

Vertedero	Método	EF	RMSE	MAE	RRMSE
Triangular	Cinta métrica	0,946	4,860	3,690	13,750
	Regla	0,925	4,023	2,910	11,360
	Flotador	0,922	4,830	3,660	13,640
Rectangular	Cinta métrica	0,967	4,199	3,550	10,160
	Regla	0,962	4,479	4,220	10,830
	Flotador	0,970	4,160	3,620	10,060

Fuente: Autores.

Según los valores de EF y la afirmación realizada por Wallach, Makowski & Jones, 2006: “Cuando la eficiencia de modelación se acerca más a cero, se considera que no es un buen modelo, por lo tanto, poco confiable”. El modelo para mediciones de caudal que mayor EF obtuvo fue el modelo del vertedero rectangular empleando mediciones de altura a través del flotador. Caso contrario ocurrió con el flotador para el vertedero triangular ya que obtuvo el valor de EF más bajo.

Los valores de RMSE y MAE presentan una alta bondad de ajuste, esto evidencia que los valores medidos y los calculados son muy cercanos, es decir, los modelos representan de manera correcta la experiencia de campo. Según Wu, Zhou, Ma, Fan, & Zhang, 2019, entre menores sean estos valores mejor es el rendimiento del modelo.

Las cifras de RRMSE obtenidas indican la capacidad de predicción de los modelos, según lo indican Mohammad, Shamshirband, Hossein, Amjad & Petkovic, 2015, debido a que estos valores están en el rango del 10-20%. Sin embargo, el modelo con mayor capacidad de predicción fue el generado para el vertedero rectangular con el uso del flotador. A pesar de esto, cabe resaltar que los modelos para dicho vertedero presentan mejores predicciones respecto a los modelos del vertedero triangular.

## CONCLUSIONES

- El adecuado ajuste del dispositivo en los lugares de posicionamiento para cada una de las mediciones realizadas indica el correcto dimensionamiento del prototipo.
- Las dimensiones del equipo permitieron un transporte fácil y rápido.
- A pesar de que los dos vertederos diseñados permitieron la medición de caudales mayores a 60 L/s, el vertedero rectangular pudo medir caudales mayores a los medidos por el triangular, además el vertedero rectangular midió la dotación mínima establecida por el distrito a alturas mucho menores que el vertedero triangular.
- El vertedero rectangular tuvo un caudal máximo y un coeficiente de descarga mayor al vertedero triangular, es decir, su rango de medición es más amplio.
- La ubicación seleccionada para el flotador aseguró condiciones de flujo subcríticas, además su uso es fácil y práctico gracias a su sistema de medición y lectura, por esto decimos que el método del flotador es el más adecuado para el prototipo.
- Según los valores de RMSE, RRMSE, MAE y  $R^2_{ajustado}$  obtenidos para las ecuaciones generadas por la herramienta Curve Fitting, las desviaciones de los datos calculados a partir de estas respecto a los valores experimentales fue menor a 5 y se obtuvieron ajustes mayores al 95%, es decir que el dispositivo diseñado otorgó mediciones correctas con desviaciones aceptables.
- El vertedero rectangular y el método del flotador se seleccionaron como los componentes más apropiados para el dispositivo debido a los buenos resultados obtenidos por la herramienta Curve Fitting para el modelo y su calibración además de sus ventajas a nivel operativo respecto a los demás instrumentos evaluados.

## RECOMENDACIONES

- Para la implementación del dispositivo creado se recomiendan condiciones de entrada al dispositivo que brinden un flujo subcrítico, mediante la adecuación de las entradas prediales.
- Con el fin de garantizar la calidad de los datos tomados, se recomienda posicionar el dispositivo en zonas de pendiente cero.
- Se recomienda el uso de la tabla de calibración obtenida para la correcta determinación de los caudales medidos con el dispositivo diseñado.
- Para aumentar la bondad de ajuste de los modelos generados y disminuir la incertidumbre, se recomienda tomar más datos experimentales.

## BIBLIOGRAFÍA

AMAYA CUEVA, Carlos Enrique. Diseño y simulación de una compuerta plana deslizante para la empresa ARMETCO. Cuenca, 2016, 135p. Trabajo de grado para el título de ingeniero mecánico. Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca. Carrera de ingeniería mecánica.

AGUIRRE JAIME, Armando. Introducción al Tratamiento de Series Temporales Aplicación a las Ciencias de la Salud. Madrid: Ediciones Díaz de Santo, S.A., 1994. 578p

ARTEAGA TOVAR, Eduardo. Hidráulica elemental. Chapingo: Universidad Autónoma de Chapingo, 1993. 335p.

ASOJUNCAL. Asociación de Usuarios del Distrito de Adecuación de Tierras de Mediana Escala El Juncal. {En línea} {1 Agosto de 2019} disponible en: <http://www.asojuncal.com/>

BOS, Marinus., REPOGLE, John. & CLEMMENS, Albert. Aforadores de caudal para canales abiertos. Netherlands: International Institute for Land Reclamation and Improvement, 1986. 293p.

CANO, Karen., MURILLO, Laura., ZAMBRANO, Eduardo & BONFIGLIOLI Micaela. Sistema de riego por melgas. Villavicencio, 2013, 16p. Trabajo de grado para el título de ingeniero agrónomo. Universidad de los llanos. Facultad de ingeniería.

CHAMBERLAIN, Adrián Ramond. Measuring water in small channels with WSC flume. Washington: Washington Agricultural Experiment Stations, 1952. 9p.

CHEREQUE MORAN, Wendor. Mecánica de fluidos 2. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, 1987. 234p.

CISNEROS ALMAZÁN, Rodolfo. Apuntes de la materia de riego y drenaje. San Luis Potosí: Centro de investigación y estudios de posgrado y área agrogeodesica, 2003. 164p.

CORANTIOQUIA. "Manual piragüero medición de caudal". {En línea} {1 Diciembre de 2018} disponible en: [http://www.piraguacorantioquia.com.co/wp-content/uploads/2016/11/3.Manual\\_Medici%C3%B3n\\_de\\_Caudal.pdf](http://www.piraguacorantioquia.com.co/wp-content/uploads/2016/11/3.Manual_Medici%C3%B3n_de_Caudal.pdf).

CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA. Distritos de riego CAR, equilibrio entre productividad y ambiente. Edición No 25. Bogotá. CAR, 2010.

CREUS, Antonio. Instrumentación Industrial. Edición No 8. Barcelona: Marcombo, 2011. 792p

DELGADO MUNEVAR, William Gilberto. Gestión y valor económico del recurso hídrico. En: Revista finanzas y política económica. Vol., 7. No 2 (2015); p. 279-278.

EMIROGLU, M. Emin., AGACCIOGLU, Hayrullah. & KAYA Nihat. Discharging capacity of rectangular side weirs in straight open channels. En: Flow Measurement and instrumentation El Sevier. Vol., 22 (2011); p. 319-330.

FACI GONZALEZ, José. & PLAYAN JUBILLAR, Enrique. Principios básicos del riego por superficie. Madrid: Ministerio de agricultura pesca y alimentación, 1994. 32p.

FORTALECIMIENTO EN RIEGO AGRICOLA FRAG. "Guía técnica riego por surcos 1". {En línea} {2 Mayo de 2019} disponible en: [https://www.academia.edu/31503906/EL\\_RIEGO\\_POR\\_SURCOS.pdf](https://www.academia.edu/31503906/EL_RIEGO_POR_SURCOS.pdf).

FRUTOS CARAVACA, Carmen. Estudio teórico de estructuras hidráulicas. Cartagena, 2014, 149p. Proyecto final de carrera (ingeniería técnica de obras públicas especialidad en hidrología). Universidad politécnica de Cartagena.

GOMEZ CARPINTEIRO, Francisco Javier. La creación de un distrito de riego y las contradicciones de una comunidad regional de regantes en el contexto neoliberal. {En línea}. {25 Abril de 2019} disponible en: [https://dlc.dlib.indiana.edu/dlc/bitstream/handle/10535/617/GomezCarpinteiro\\_Creacion\\_040508\\_Paper147.pdf?sequence=1](https://dlc.dlib.indiana.edu/dlc/bitstream/handle/10535/617/GomezCarpinteiro_Creacion_040508_Paper147.pdf?sequence=1).

GUROVICH, Luis A. Fundamentos y diseño de sistemas de riego. San José: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 1985. 433p

HASHID, M., HUSSAIN, A & AHMAD, Z. Discharge characteristics of lateral circular in takes in open channel flow. En: Flow Measurement and instrumentation El Sevier. Vol., 46 (2015); p. 87-92.

HUSSAIN, A., AHMAD, Z. & ASAWA, G.L. Discharge characteristics of sharp-crested circular side orifices in open channels. En: Flow Measurement and instrumentation El Sevier. Vol., 98 (2011); p. 1533-1544.

HUSSAIN, A., AHMAD, Z. & ASAWA, G.L. Flow through sharp-crested rectangular side orifices under free flow condition in open channels. En: Flow Measurement and instrumentation El Sevier. Vol., 21 (2010); p. 418-424.

KUMAR, S., AHMAD, Z., KOTHYARI, Umech C. & MITTAL, M.K. Discharge characteristics of a trench weir. En: Flow Measurement and instrumentation El Sevier. Vol., 21 (2010); p. 80-87.

Lux Monroy, Manuel Agustín. Medidores de flujo en canales abiertos. Guatemala, 2010, 138p. Trabajo de graduación (ingeniería civil). Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de ingeniería.

MARBELLO PEREZ, Ramiro. Manual de prácticas de laboratorio de hidráulica. Medellín: UNAL Medellín, 2005. 315p.

MEJÍA, Francisco Jaime. El transporte de cantidad de movimiento en canales. En: Revista EIA. No 2. (Jul-Dic. 2004).

MERCADO FERNÁNDEZ, Teobaldis., ORTEGA ESCOBAR, Manuel., ARENAS TAWIL, Abraham., & COMBATT CABALLERO, Enrique. Dinámica de sales en el distrito de riego la doctrina. En: Revista Idesia. Vol., 29. No 1 (2011); p. 89-90.

MIRANDA, José Joaquín. Aspectos generales del suministro de agua y de los métodos de su aplicación. Bogotá: HIMAT, 1984. 30p.

MOHAMED, Ahmed. Numerical analysis of flow over side weir. En: Revista Journal of King Saud University-Engineering Sciences. Vol., 27 (2015); p. 37-42.

MOHAMMADI, Kasra., SHAMSHIRBAND, Shahaboddin., HOSSEIN ANISI, Mohammad., AMJAD ALAM, Khubaib., & PETROVIC, Dalibor. Support vector regression based prediction of global solar radiation on a horizontal surface. En: Energy conversion and management. Vol., 91 (2015); p. 433-441.

MONTERO MARTINEZ, Jesús. Análisis de la distribución de agua en sistemas de riego por aspersión estacionario. Desarrollo del modelo de simulación de riego por aspersión (SIRIAS). Albacete, 1999, 320p. Tesis doctoral. Universidad de Castilla-la mancha. Departamento de producción vegetal y tecnología agraria.

Mott, Robert L. Mecánica de Fluidos. Edición No 6. México: Pearson Educación, 2006. 644p

NGAMALIEU NENGOUE, Ulrich. Caracterización de vertederos hidráulicos mediante técnicas CFD. Valencia, 2015, 77p. Trabajo de grado (master en ingeniería hidráulica y medio ambiente). Universidad Politécnica de Valencia.

PEDROZA GONZALEZ, Edmundo. Canal Parshall. {En línea} {8 Mayo de 2019} disponible en: [http://infota.siss.cl/concesiones/empresas/AguasCha%C3%B1ar/10%20Estudio%20Intercambio%20Empresa/03%20Anexos/Anexo%20Estudio%20OyM/Anexo%2013/Instrumentaci%C3%B3n\\_Flujometro/Canaletas%20Parshall/canal%20parshall.pdf](http://infota.siss.cl/concesiones/empresas/AguasCha%C3%B1ar/10%20Estudio%20Intercambio%20Empresa/03%20Anexos/Anexo%20Estudio%20OyM/Anexo%2013/Instrumentaci%C3%B3n_Flujometro/Canaletas%20Parshall/canal%20parshall.pdf).

PEDROZA GONZALEZ, Edmundo., & ANGEL HURTADO, Jorge Leonel. Variaciones en la calibración de un aforador Parshall. En: Revista Tecnología y ciencias del agua. Vol., 3. No 3 (2012); p. 35-51.

PEREZ FARRAS, Luis. Nociones sobre orificios y vertederos, tipos de escurrimiento en canales, remansos y resaltos, y su relación con la sedimentación y la corrosión en cloacas. {En línea} {1 diciembre de 2018} disponible en: [http://www.fi.uba.ar/archivos/institutos\\_orificios\\_vertederos.pdf](http://www.fi.uba.ar/archivos/institutos_orificios_vertederos.pdf).

PERDOMO ALVAREZ, Yina Paola., FLOREZ ARISTIZABAL, Fernando & GONZALEZ GONZALEZ, Arlinson. Huila: líder en distritos de riego en Colombia. {En línea} {28 Abril de 2019} disponible en: <http://www.huila.gov.co/loader.php?IServicio=Tools2&ITipo=descargas&IFuncion=descargar&idFile=7368>.

Rivas M, Guillermo., López P, Luis A., & Velasco M, Antonio. Regresión no lineal. En: Revista Colombiana de Estadística. Vol., 14. No 27 (1993). p. 89-102

RAMAMURTHY, Amruthur., TIM, Udoyara., & SARRAF, Semaan. Rectangular lateral orifices in open channels. En: Revista J. Environ Eng ASCE. Vol., 112. No 2 (1986). p. 292-300.

SANDOVAL MENDOZA, Luis Manuel., JUAREZ BONILLA, Mayra Isabel., BROWN MANRIQUE, Oscar., MUJICA CERVANTES, Albi., BONILLA ROCHA, Jorge Douglas., & GALLARDO BALLAT, Yurisbel. Modelos Matemáticos para la estimación del caudal en vertederos Sutro utilizados en sistemas de riego. En: Revista Ciencias Técnica Agropecuarias, San José de las Lajas. Vol., 26. No 3 (2017); p. 30-38.

SANDOVAL MENDOZA, Luis Manuel., MIRANDA ESCOBAR, Julio Adrián., BROWN MANRIQUE, Oscar., MUJICA CERVANTES, Albi., BONILLA ROCHA, Jorge Douglas., & GALLARDO BALLAT, Yurisbel. Modelos Matemáticos para la simulación de caudal en vertederos Cipolletti utilizados en sistemas de riego. En: Revista Ciencias Técnica Agropecuarias, San José de las Lajas. Vol., 26. No 1 (2017); p. 57-65.

SANTOS PEREIRA, Luis., DE JUAN VALERO, José Arturo., PICORNELL BUENDÍA, María Raquel., & TARJUELO, José. El riego y sus tecnologías. Primera edición en castellano. Lisboa: Europa-América, 2004. 296p.

VILLALOBOS ARÁMBULA, Víctor., GARCÍA, Miguel., & ÁVILA, Felipe. El agua para la agricultura de las Américas. México, 2017, 152p. Instituto Interamericano de cooperación para la agricultura (IICA).

WALLACH, Daniel., MAKOWSKI, David., & JONES, James. Working with Dynamic Crop Models: Evaluation, Analysis, Parameterization, and Applications. Netherlands, 2006. 463p.

WU, Lifeng., ZHOU, Hanmi., MA, Xin., FAN, Junliang., & ZHANG, Fucang. Daily Reference evapotranspiration prediction based on hybridized extreme learning machine model with bio-inspired optimization algorithms: Application in contrasting climates of China. En: Journal of Hydrology, China. Vol., 577 (2019).

ZUCARELLI, Graciela Viviana., & MORRESI, María del Valle. Flujo en canales Abiertos: Caracterización en Cursos de la Provincia de Santa Fe, República de Argentina. {En línea}. {15 de agosto de 2019}. Disponible en: ([http://ponce.sdsu.edu/zucarelli\\_morresi.pdf](http://ponce.sdsu.edu/zucarelli_morresi.pdf))

## ANEXOS

### ANEXO A: EVIDENCIA FOTOGRÁFICA DE LA INSTALACIÓN DEL DISPOSITIVO EN LOS PREDIOS SELECCIONADOS.

Figura 20. Fotografía lote Trapichito.



Fuente: Autores.

Figura 21. Fotografía lote La Esmeralda.



Fuente: Autores.

Figura 22. Fotografía lote El Lago.



Fuente: Autores.

Figura 23. Fotografía lote El Naranjo.



Fuente: Autores.

Figura 24. Fotografía lote Juventus.



Fuente: Autores.

Figura 25. Fotografía lote El Samán.



Fuente: Autores.

Figura 26. Fotografía lote La Conquista.



Fuente: Autores.

Figura 27. Fotografía lote La Planicie.



Fuente: Autores.

Figura 28. Fotografía lote Gualanday.



Fuente: Autores.

Figura 29. Fotografía lote Las Margaritas.



Fuente: Autores.

Figura 30. Fotografía lote La Florida.



Fuente: Autores.

Figura 31. Fotografía lote El Palmar.



Fuente: Autores.