



Carrera de Ingeniería
Agrícola



**UNIVERSIDAD
NACIONAL DE LOJA**

Facultad Agropecuaria y de
Recursos Naturales
Renovables

INGENIERÍA EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

**“CONSTRUCCIÓN DE UN CORRENTÓMETRO
UTILIZANDO EL PRINCIPIO DEL TUBO DE PITOT
PARA EL AFORO DE CAUDALES EN CANALES
ABIERTOS”**

**TESIS DE GRADO PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÍCOLA.**

AUTOR:

JOSUE ALFREDO TENE MEDINA

DIRECTOR:

ING. MARCO REINOSO ACARO MG. SC.

Loja, Noviembre del 2017

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DE TESIS

Ing. Marco Reinoso Acaro Mg. Sc.

**DOCENTE DE LA FACULTAD AGROPECUARIA Y DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES DE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA**

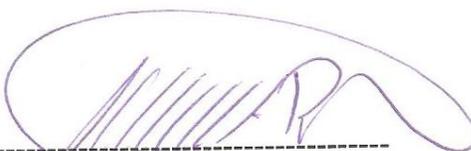
CERTIFICA:

En calidad de director de la tesis titulada **“CONSTRUCCIÓN DE UN CORRENTÓMETRO UTILIZANDO EL PRINCIPIO DEL TUBO DE PITOT PARA EL AFORO DE CAUDALES EN CANALES ABIERTOS”** de la autoría del señor Josue Alfredo Tene Medina, ha concluido dentro del cronograma y autorizo se continúe con el trámite de graduación.

Lo certifico y autorizo al interesado para que haga uso del presente, en los fines que creyere conveniente.

Loja, 10 de julio de 2017.

Atentamente,



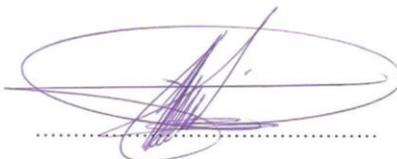
Ing. Marco Reinoso Acaro Mg. Sc.

DIRECTOR DE TESIS

CERTIFICACIÓN TRIBUNAL

En calidad de tribunal calificador de la tesis titulada, “**CONSTRUCCIÓN DE UN CORRENTÓMETRO UTILIZANDO EL PRINCIPIO DEL TUBO DE PITOT PARA EL AFORO DE CAUDALES EN CANALES ABIERTOS**” de autoría del señor egresado de la carrera de Ingeniería Agrícola, Josue Alfredo Tene Medina, certificamos que se ha incorporado al trabajo final de tesis, todas las sugerencias efectuadas por sus miembros, por lo que autorizamos su impresión y publicación.

Loja, 21 de Noviembre de 2017



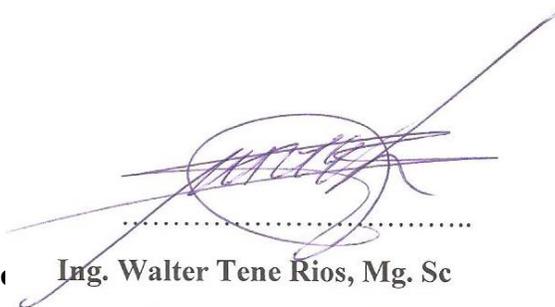
Ing. Luis Sivisaca Caraguay, Mg. Sc.

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL



Ing. Aníbal González González, Mg. Sc.

VOCAL DEL TRIBUNAL



Ing. Walter Tene Rios, Mg. Sc.

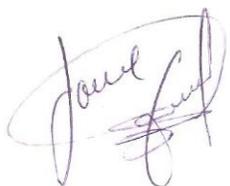
VOCAL DEL TRIBUNAL

AUTORÍA

Yo, Josue Alfredo Tene Medina, declaro ser el autor del presente trabajo de tesis y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos o acciones legales, por el contenido de la misma.

Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi tesis en el Repositorio Institucional-Biblioteca Virtual.

Autor: Josue Alfredo Tene Medina



Firma:

Cédula: 1900619618

Fecha: Loja, 21 de Noviembre de 2017

**CARTA DE AUTORIZACIÓN DE TESIS POR PARTE DEL AUTOR PARA LA
CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y PUBLICACIÓN
ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO**

Yo, **Josue Alfredo Tene Medina**, declaro ser autor de la tesis titulada “**CONSTRUCCIÓN DE UN CORRENTÓMETRO UTILIZANDO EL PRINCIPIO DEL TUBO DE PITOT PARA EL AFORO DE CAUDALES EN CANALES ABIERTOS**”, como requisito para optar al grado de Ingeniero Agrícola, autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Digital Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el RDI, en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia de la tesis que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los 21 días del mes de noviembre de dos mil diecisiete firma el autor.



Firma:

Autor: Josue Alfredo Tene Medina

Número de cedula: 1900619618

Dirección: Zamora Chinchipe, Cumbaratza, barrio Nambija bajo calle principal s/n

Correo Electrónico: joalf@live.com.ar

Teléfono: 2196053

Celular: 0990442061

DATOS COMPLEMENTARIOS

Director de Tesis: **Ing. Marco Reinoso Acaro Mg. Sc.**

Tribunal de Grado: **Ing. Luis Sivisaca Caraguay Mg. Sc.**

Ing. Aníbal González González Mg. Sc.

Ing. Walter Tene Rios Mg. Sc.

DEDICATORIA

Este logro constituye uno de los sueños que un día me propuse alcanzar hoy después de una larga travesía lo veo materializado, el obtener el título de Ingeniero Agrícola, se ha hecho realidad con el conlleva alegrías, disgustos, amistad, esfuerzo, compañerismo pero sobre todo superación, se lo debo a quienes estuvieron de una u otra manera a mi lado en este largo recorrido y con inmenso amor y gratitud el presente trabajo se lo dedico muy especialmente a:

A Dios porque él es quien guía y fortalece mi transitar en cada instante, porque también me bendigo con un par de padres y un par de madres haciendo de mí una persona afortunada.

A mis padres, Miguel Medina, Petrona Morocho, Francisco Tene y Mariana Medina pilares fundamentales en mi vida, ejemplos de lucha, perseverancia, honradez y humildad por ser las personas que me inspiraron, me dieron su apoyo incondicional, aliento, confianza, consejos y amor para seguir y alcanzar mis objetivos en esta etapa de mi vida, a ustedes les debo lo que soy Que Dios Los Bendiga.

A mis hermanos Edwin, Jimmy, Jhojaira, Jhunion, María Belén, Deiby, Shicela, Naydelin, Ángeles y mi sobrina Alondra por estar todos a mi lado, siempre conté con su cariño y amistad.

A mis primos/a, tíos/a, y demás familiares que me brindaron su apoyo absoluto

A mis amigos/a y compañeros por compartir tristezas, alegrías y momentos inolvidables, porque han sido parte fundamental en este logro.

Josué Alfredo Tene Medina

AGRADECIMIENTO

Mi sincero agradecimiento y gratitud de manera especial al Ing. Marco Reinoso, Mg, Sc; Director de tesis. Por su excelente orientación, comprensión, tolerancia, confianza, apoyo y sobre todo paciencia en la dirección de este trabajo,

A la Universidad Nacional de Loja, a la Carrera de Ingeniería Agrícola, a los docentes de la Universidad que me entregaron sin egoísmo ni reservas, sus experiencias, sabidurías, formación moral, ética y profesional, enriqueciendo mis conocimientos que servirán para contribuir profesionalmente al desarrollo del país.

A los miembros del tribunal calificador de la tesis por sus observaciones y recomendaciones: Ing. Luis Sivisaca, Ing. Aníbal Gonzáles e Ing. Walter Tene.

A los compañeros de carrera, por la amistad, confraternidad y solidaridad, demostrada durante los años de estudio.

Finalmente a mis padres, hermanos, amigos y demás familiares que de alguna u otra forma siempre mostraron su apoyo incondicional.

El Autor.

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICACIÓN DIRECTOR DE TESIS	ii
CERTIFICACIÓN TRIBUNAL	iii
AUTORÍA	iv
CARTA DE AUTORIZACIÓN	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE GENERAL	viii
ÍNDICE DE CUADROS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE ANEXOS	xi
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xvi
1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Canales abiertos	4
2.2. Flujo en canales abiertos	5
2.2.1. Flujo Permanente.....	5
2.2.2. Flujo Uniforme.....	5
2.2.3. Flujo Laminar.....	6
2.2.4. Flujo Turbulento.....	6
2.2.5. La Fórmula de CHEZY	6
2.2.6. El coeficiente C	7
2.3. Métodos de medición de flujo en canales abiertos.....	7
2.3.1. Método Área y Velocidad	8
2.3.1.1.Métodos de medición de las velocidades media del agua en canales.....	8
2.3.2. Estructuras hidráulicas	11
2.3.2.1.Vertederos	11
2.3.2.2.Orificios.....	11
2.3.3. Método directo	12
2.3.3.1.Aforo volumétrico	12

2.3.3.2. Aforo gravimétrico	12
2.4. Correntómetro de Pitot	13
2.4.1. Descripción del correntómetro	13
2.4.2. Ecuación de la continuidad	15
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	17
3.1. Descripción de los laboratorios de hidráulica	17
3.2. Materiales	18
3.2.1. Materiales de campo.....	18
3.2.2. Materiales de oficina	18
3.3. METODOLOGÍA	18
3.3.1. Metodología para el primer objetivo:.....	18
3.3.2. Metodología para el segundo objetivo:	21
3.3.3. Metodología para el tercer objetivo:	25
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	26
4.1. Construcción de un correntómetro utilizando el principio del tubo de Pitot para el aforo de caudales en canales abiertos	26
4.2. Evaluación de la profundidad a la que se encuentra la velocidad media del flujo de agua de acuerdo al revestimiento del canal	27
4.2.1. Evaluación en el canal de hormigón.....	28
4.2.2. Evaluación en el canal de tierra.....	29
4.3. Evaluación del funcionamiento del correntómetro en el aforo de caudales comparado con el método volumétrico.....	31
4.3.1. Evaluación del funcionamiento del correntómetro en el canal de hormigón	31
4.3.2. Evaluación del funcionamiento del correntómetro en el canal de tierra	33
5. CONCLUSIONES.....	35
6. RECOMENDACIONES.....	36
7. BIBLIOGRAFÍA.....	37
8. ANEXOS	38

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Factor de corrección (C).....	10
Cuadro 2. Calculo de la velocidad media en el canal de hormigón.	28
Cuadro 3. Calculo de la velocidad media en el canal de tierra.	30
Cuadro 4. Evaluación del funcionamiento del correntómetro en el canal de hormigón. ...	32
Cuadro 5. Evaluación del funcionamiento del correntómetro en el canal de tierra.	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Flujo en canales abiertos.	4
Figura 2. Distribución de velocidades en los canales.....	8
Figura 3. Tubo de Pitot.....	14
Figura 4. Ubicación de los laboratorios donde se realizó los ensayos de tesis	17
Figura 5 . Aforo del caudal método gravimétrico.	22
Figura 6. División del canal en sección transversal y vertical para la medición de velocidades en cada punto.	23
Figura 7. Componentes del dispositivo de medición de velocidad del flujo.....	26

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Registro de datos en el campo para el canal de hormigón experimento 1.....	38
Anexo 2. Registro de datos en el campo para el canal de hormigón experimento 2.....	38
Anexo 3. Registro de datos en el campo para el canal de hormigón experimento 3.....	39
Anexo 4. Aforo de caudal en el canal de hormigón experimento 1.	39
Anexo 5. Aforo de caudal en el canal de hormigón experimento 2.	39
Anexo 6. Aforo de caudal en el canal de hormigón experimento 3.	40
Anexo 7. Registro de datos en el campo para el canal de tierra experimento 1.....	40
Anexo 8. Registro de datos en el campo para el canal de tierra experimento 2.....	40
Anexo 9. Registro de datos en el campo para el canal de tierra experimento 3.....	41
Anexo 10. Aforo de caudal en el canal de hormigón experimento 1.	41
Anexo 11. Aforo de caudal en el canal de hormigón experimento 2.	41
Anexo 12. Aforo de caudal en el canal de hormigón experimento 3.	42
Anexo 13. Fotografías de evidencia.	42

**CONSTRUCCIÓN DE UN CORRENTÓMETRO UTILIZANDO EL
PRINCIPIO DEL TUBO DE PITOT PARA EL AFORO DE
CAUDALES EN CANALES ABIERTOS**

RESUMEN

La medición del caudal es de gran utilidad en la administración y ejecución de los programas de riego, la conducción del agua en los sistemas de riego se hace generalmente en canales abiertos que en su uso presentan deterioro como fugas, filtraciones o tomas clandestinas. Esto quiere decir, que para un buen plan de manejo y operación del sistema es condición imprescindible conocer los caudales a lo largo de las abscisas del canal, para determinar los sitios problema donde se hace necesario el mantenimiento del canal.

En la agricultura campesina se usa pequeños caudales, medirlos es necesario especialmente en época de estiaje para determinar la superficie posible de riego y poder planificar una distribución equitativa de este escaso recurso.

Los métodos para el aforo que se usan en la práctica son muy laboriosos, o de poca precisión. El molinete es útil y buena precisión, sin embargo, éste es de difícil acceso para los usuarios por su alto costo, o se complica porque el calado del canal no permite su uso. El método del flotador proyecta datos que adolecen de buena precisión; si se quisiese utilizar el método volumétrico, esta práctica se complica con caudales superiores a 5 l/s. Ante esta situación es necesario generar alternativas experimentales que busquen una solución a este problema. Para lograr esto, en esta investigación se pretende hacer uso del teorema de Bernoulli para diseñar, construir y evaluar un correntómetro que utilice la carga de velocidad para su medición en un punto.

El presente trabajo de investigación se realizó en los laboratorios de hidráulica de campo de la carrera de Ingeniería Agrícola en la Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional de Loja que se sitúa en la ciudad Universitaria “Guillermo Falconí Espinosa”, sector la Argelia, siendo el objetivo principal de esta investigación, Contribuir al manejo eficiente del agua a través del aforo en los canales de riego, para lo cual se propuso los siguientes objetivos específicos: **1).** Construir un correntómetro utilizando el principio del tubo de Pitot para el aforo de caudales en canales abiertos **2).** Evaluar la profundidad a la que se encuentra la velocidad media del flujo de agua

de acuerdo al revestimiento del canal **3**). Evaluar el funcionamiento del correntómetro en el aforo de caudales comparado con el método volumétrico.

La metodología usada fue la siguiente: previo a la construcción y el diseño del correntómetro, en el laboratorio de hidráulica se observó el comportamiento de la carga de velocidad y de la carga piezométrica en los tubos de Pitot y piezométrico, respectivamente esto con el fin de tener argumentos para el diseño y construcción, estas experiencias preliminares permitió la construcción del dispositivo.

Para encontrar la profundidad a la que se encuentra la velocidad media de acuerdo al revestimiento del canal, primero se conoció la velocidad real del flujo en el canal aforando los caudales de estos con el método gravimétrico y aplicando la fórmula de la continuidad se despejó la velocidad media del flujo, para luego dividir la sección del canal en líneas horizontales y verticales como una grilla y medir la carga de velocidad con el dispositivo en cada punto de la grilla, la carga de velocidad se la transformó en velocidad de flujo y con esta información se dibujó las líneas isotacas para ubicar la velocidad media que según la U.S. Geological Survey, se encuentra a 0,6 h desde la superficie en el eje de simetría del canal, esta velocidad se comparó con la velocidad media obtenida mediante el método gravimétrico, al no ser iguales las velocidades medias de los métodos del correntómetro con la del gravimétrico se aplicó un coeficiente de corrección (K_d) que se obtuvo de dividir la velocidad calculada por el método gravimétrico con la velocidad que salió de las líneas isotacas a la profundidad 0,6 h.

La confiabilidad del correntómetro fue estimada calculando la velocidad media del flujo con el dispositivo calculando el caudal y multiplicando por el coeficiente (K_d), para luego comparar con los valores obtenidos mediante el método volumétrico, aplicando la Fórmula: $Q = V/t$.

Finalmente se concluyó que el correntómetro funciona con una precisión de 95,5% en el canal de hormigón y en el de tierra 97,5%, al calcular la velocidad del flujo utilizando la medición de la carga de velocidad. También este dispositivo utiliza materiales accesibles

y de bajo costo para su construcción. Los coeficientes de descarga del dispositivo son diferentes para los canales de hormigón y de tierra, siendo estos 0,74 y 0,56 respectivamente.

Entre las principales recomendaciones está investigar cómo cambia el coeficiente del correntómetro K_d en función del calado y de la rugosidad de las paredes del canal.

Palabras claves: correntómetro, calado, carga de velocidad, velocidad media, coeficiente.

ABSTRACT

The flow measurement is very useful in the administration and execution of the irrigation programs, the water conduction in the irrigation systems is generally done in open channels that in their use show deterioration such as leaks, filtrations or clandestine outlets. This means that for a good plan of management and operation of the system it is an essential condition to know the flows along the abscissa of the channel, to determine the problem sites where it is necessary to maintain the channel.

In the peasant agriculture is used small flows, measure them is necessary especially during the dry season to determine the possible area of irrigation and to plan an equitable distribution of this scarce resource.

The methods for the gauging that are used in the practice are very laborious, or of little precision. The windlass is useful and good precision; however, it is difficult for users to access for its high cost, or it is complicated because the channel's draft does not allow its use. The float method projects data that suffers from good precision; if one wanted to use the volumetric method, this practice is complicated with flow rates greater than 5 l / s. Given this situation, it is necessary to generate experimental alternatives that seek a solution to this problem. To achieve this, this research intends to make use of Bernoulli's theorem to design, build and evaluate a current meter that uses the velocity load for its measurement at a point.

The present research work was carried out in the field hydraulics laboratories of the Agricultural Engineering career in the Faculty of Agriculture and Renewable Natural Resources of the National University of Loja, which is located in the University City "Guillermo Falconí Espinosa", Argelia sector, being the main objective of this research. Contribute to the efficient management of water through gauging in irrigation channels, for which were proposed the following specific objectives: 1). Build a current meter using the principle of the Pitot tube for gauging in open channels 2). Evaluate the depth at which the average speed is found of the water flow according to the channel coating 3). Evaluate the performance of the current meter in the flow gauging compared to the volumetric method.

The methodology used was the following: prior to the construction and design of the current meter, in the hydraulics laboratory was observed the load of speed and of the piezometric load in the Pitot tubes and piezo-metric, respectively, this in order to have arguments for the design and construction, these preliminary experiences allowed the construction of the device.

To find the depth at which the average velocity is based on the channel coating, first was known the actual velocity of the flow in the channel gauging the flow of these with the gravimetric method and applying the formula of continuity the velocity was cleared average of the flow, to then divide the section of the channel into horizontal and vertical lines as a grid and measure the velocity load with the device at each point of the grid, the velocity charge was transformed into flow velocity and with this information were drawn the isotacas lines to locate the average speed that according to the US Geological Survey, is located 0.6 h from the surface in the axis of symmetry of the channel, this speed was compared with the average speed obtained by the gravimetric method, as the average speeds of the current meter methods are not equal to that of the gravimetric was applied a correction coefficient (Kd) that was obtained by dividing the speed calculated by the gravimetric method with the speed that came out of the isotacas lines at depth 0.6 h.

The reliability of the current meter was estimated by calculating the average velocity of the flow with the device calculating the flow rate and multiplying by the coefficient (Kd), to then compare with the values obtained by the volumetric method, applying the formula: $Q = V / t$.

Finally, it was concluded that the current meter works with an accuracy of 95.5% in the concrete channel and in the ground channel 97.5%, when calculating the flow velocity using the measurement of the speed load. This device also uses accessible and low-cost materials for its construction. The discharge coefficients of the device are different for the concrete and earth channels, these being 0.74 and 0.56 respectively.

Among the main recommendations is to investigate how the coefficient of the Kd current meter changes according to the draft and the roughness of the channel walls.

Keywords: current meter, draft, speed load, average speed, coefficient.

1. INTRODUCCIÓN

Después del aire que respiramos, el agua es el elemento más esencial para el hombre. Sin el agua la vida animal y vegetal es imposible. También es el medio más eficiente para la transferencia de calor, de energía y el solvente universal que se conoce. Encausada en canales nos provee del medio más económico para el transporte pesado y sirve también como un vehículo cómodo para la eliminación de toda clase de desechos. Por esto el aprovechamiento de los recursos hidráulicos es uno de los aspectos más importantes en el desarrollo de la humanidad, (Krochin, 1978).

La medición del gasto es de gran utilidad en la toma de decisiones en la administración de los recursos hidráulicos, en la ejecución de los programas de riego y en diversas actividades relacionadas con el manejo del agua, (Sánchez & Casillas, 2008).

En los sistemas de riego, la conducción del agua desde la captación hasta los terrenos, generalmente se hace a través de canales abiertos que en su uso presentan deterioro como fugas, filtraciones o tomas clandestinas. Esto quiere decir, que para un buen plan de manejo y operación del sistema de riego, se hace necesario la evaluación permanente de los caudales con el propósito de identificar fugas para una adecuada operación y mantenimiento del sistema de riego.

Para el manejo eficiente del agua de riego es condición imprescindible conocer los caudales a lo largo de las abscisas del canal, para así determinar los sitios problema donde se hace necesario poner énfasis en el mantenimiento del canal.

En la agricultura campesina, para el riego se usan pequeños caudales que es imprescindible medirlos especialmente en la época de estiaje para poder determinar la superficie posible de riego y poder planificar una distribución equitativa de este escaso recurso.

Los métodos de aforo que se usan para este propósito en la práctica son muy laboriosos o de poca precisión. Un instrumento que permite esta evaluación con una buena

precisión es el molinete; sin embargo, éste es de difícil acceso para los usuarios de riego por su alto costo, y muchas veces se complica porque el calado del canal en la mayoría de casos no permite su uso. Por otro lado, el método del flotador arroja datos indicativos que adolecen de una buena precisión, y si se quisiese utilizar el método volumétrico, cuando los caudales son superiores a 5 litros por segundo, esta práctica se complica notablemente. Por estas consideraciones, el aforo para la identificación de caudales y su posterior uso para riego, abrevadero de animales o consumo humano es de fundamental importancia. En el uso del agua para riego de manera particular se usa los aforos en el cálculo de la eficiencia de conducción y distribución para identificar problemas en la operación y mantenimiento de los sistemas de riego.

Ante esta situación se hace necesario a través de la Carrera de Ingeniería Agrícola, generar alternativas experimentales que busquen una solución a este problema, con propuestas eficientes en la medición de caudales en los canales de riego y de fácil manejo y acceso para los usuarios del sistema de riego.

Para lograr esto, en la presente investigación se usó del teorema de Bernoulli para diseñar, construir y evaluar un correntómetro, que utiliza la carga de velocidad para su medición en un punto.

Este dispositivo es un instrumento alternativo que utiliza los principios de la hidráulica permitiendo conocer los caudales aforados; si el dispositivo funciona adecuadamente dará la posibilidad de que sea replicado con un costo relativamente bajo.

Además la generación de información para la cuantificación de la eficiencia de conducción del canal principal permitirá mejorar la operación y mantenimiento del sistema de riego, lo que contribuirá a mejorar la producción agropecuaria. Para ello se ha propuesto en esta investigación los siguientes objetivos:

OBJETIVOS

General

- Contribuir al manejo eficiente del agua a través del aforo en los canales de riego.

Específicos

- Construir un correntómetro utilizando el principio del tubo de Pitot para el aforo de caudales en canales abiertos.
- Evaluar la profundidad a la que se encuentra la velocidad media del flujo de agua de acuerdo al revestimiento del canal.
- Evaluar el funcionamiento del correntómetro en el aforo de caudales comparado con el método volumétrico.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Canales abiertos

Un canal abierto es un conducto en el que fluye un líquido con una superficie libre. En contraste con el líquido en una tubería, donde el flujo se produce normalmente a presión, el líquido que lleva un canal abierto no ejerce presión aparte de la que provoca su propio peso y la presión de la atmosfera, (King, Wisler, & Woodburn, 1982).

El flujo en canales abiertos describe el movimiento fluido en un canal abierto figura 1. En la mayoría de las aplicaciones, el líquido es agua y el aire por encima del líquido se encuentra en general en reposo y a una presión atmosférica estándar.

El flujo a cielo abierto se encuentra tanto en la naturaleza como en estructuras artificiales. Los canales artificiales pueden ser de suministro de agua para irrigación, generación de energía y aguas potables; canales para conducir agua a plantas de tratamiento; canales de agua lluvia, algunas fuentes públicas, alcantarillas etc., (Chanson, 2002).

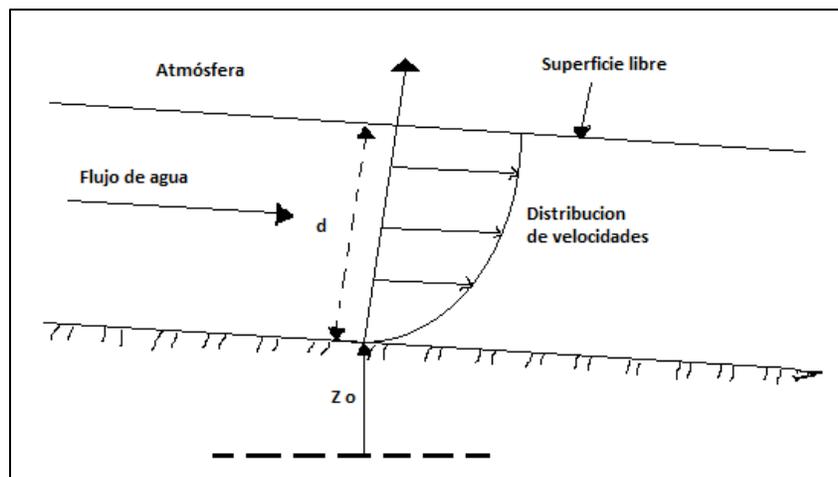


Figura 1. Flujo en canales abiertos.

2.2. Flujo en canales abiertos

2.2.1. Flujo Permanente

El flujo permanente tiene lugar cuando, en un punto cualquiera, la velocidad de las sucesivas partículas que ocupan ese punto en los sucesivos instantes de la misma. Por tanto, la velocidad es constante respecto del tiempo o bien $\partial V/\partial t = 0$, pero puede variar de un punto a otro, es decir, ser variable respecto de las coordenadas espaciales. Este supuesto da por sentado que las otras variables o magnitudes del fluido y del flujo no varían con el tiempo o $\partial p/\partial t = 0$, $\partial \rho/\partial t = 0$, $\partial Q/\partial t = 0$, etc. La mayoría de los problemas técnicos prácticos implican condiciones permanentes del flujo. Por ejemplo, el transporte de líquidos bajo condiciones constantes de altura de carga o el vaciado de depósitos por orificios, bajo altura de carga constante, ilustran flujos permanentes. Estos fluidos pueden ser uniformes o no uniformes.

La complejidad de los fluidos no permanecen hacen que su estudio siga fuera del propósito de un texto de introducción a la mecánica de los fluidos. Un flujo es no permanente cuando las condicionara del fluido varían con el tiempo o bien $\partial V/\partial t \neq 0$.

2.2.2. Flujo Uniforme

El flujo uniforme tiene lugar cuando el modulo, la dirección y el sentido de la velocidad no varían de un punto a otro del fluido, es decir, $\partial V/\partial s = 0$. Este supuesto implica que las otras magnitudes físicas del fluido no varían con las coordenadas espaciales o bien $\partial y/\partial s = 0$, $\partial \rho/\partial s = 0$, $\partial p/\partial s = 0$, etc. El fluido de líquidos bajo presión a través de tuberías de diámetro constantes y gran longitud es uniforme tanto si es régimen es permanente como si es no permanente.

El flujo es no uniforme cuando la velocidad, la profundidad, la presión, etc.; varían de un punto a otro en la región del flujo, es decir, $\partial V/\partial s \neq 0$, etc.

2.2.3. Flujo Laminar

El flujo es laminar si las fuerzas viscosas son muy fuertes en relación con las fuerzas inerciales, de tal manera que la viscosidad juega un papel importante en determinar el comportamiento del flujo. En el laminar, las partículas de agua se mueven en trayectorias suaves definidas o líneas de corriente, y las capas de fluido con espesor infinitesimal parecen deslizarse sobre capas adyacentes.

2.2.4. Flujo Turbulento

El flujo es turbulento si las fuerzas viscosas son débiles en relación con las fuerzas inerciales. En flujo turbulento, las partículas de agua se mueven en trayectorias irregulares, que no son suaves ni fijas, pero que en conjunto todavía representan el movimiento hacia delante de la corriente entera. Entre los estados de flujo laminar y turbulento existe un estado mixto o transicional.

2.2.5. La Fórmula de CHEZY

Para flujo uniforme y permanente

$$V = C\sqrt{RS}$$

Donde:

V= velocidad media en m/s

C= coeficiente

R= radio hidráulico

S= pendiente de la superficie del agua o de la línea de energía o de la solera del canal; estas líneas son paralelas para el flujo uniforme y permanente.

2.2.6. El coeficiente C

Puede obtenerse aplicando la expresión:

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} \quad (\text{Manning})$$

La expresión, n es un factor de rugosidad

El Caudal (Q) para flujo uniforme y permanente, aplicando la fórmula de Manning, es:

$$Q = AV = A \left(\frac{1}{n} \right) R^{2/3} S^{1/2}$$

Las condiciones ligadas al flujo uniforme y permanente se llaman normales, de ahí los términos profundidad normal y pendiente normal. (Ronald V, 1979).

2.3. Métodos de medición de flujo en canales abiertos

Es la medición de la cantidad de agua que pasa por la sección transversal de un conducto (río, riachuelo, canal, tubería); a esta actividad se la conoce como aforo de caudal.

La medición del agua es muy importante, para determinar la disponibilidad para diferentes usos que se le puede dar; por ejemplo en agricultura, para determinar la superficie de suelo a regar, como para el consumo humano y abrevadero de ganado.

Para conseguir una operación eficiente de un sistema de riego, es imprescindible tener una programación, ejecución y evaluación de aforos en el sistema de riego.

Existen diferentes métodos de aforo para medir el caudal que entre los principales se encuentran los que a continuación se describen.

2.3.1. Método Área y Velocidad

Es uno de los métodos más utilizados; para determinar el caudal de un canal se requiere medir el área de la sección transversal del flujo de agua y la velocidad media; se aplica la siguiente fórmula:

$$Q = A \times V$$

Donde:

- Q = Caudal del agua (m^3/s); (l/s)
- A = Área de la sección transversal (m^2)
- V = Velocidad media del agua (m/s)

La dificultad principal es determinar la velocidad media del flujo en el canal porque varía en los diferentes puntos de la sección hidráulica.

2.3.1.1. Métodos de medición de las velocidades media del agua en canales

Toda la masa de agua que circula por un canal, acequia, arroyo, etc., no se desliza a la misma velocidad. Esto es debido al roce del agua con las paredes laterales y el fondo.

Para conocer las distintas velocidades habría de medirse esta en varios puntos de su masa, como se representa en la figura 2 A, siguiente:

Estas velocidades simétricas en la parte izquierda del canal, nos permitirían trazar las llamadas curvas isotacas, como se presenta en la fig. 2 B y C. (Ruiz, 1985)

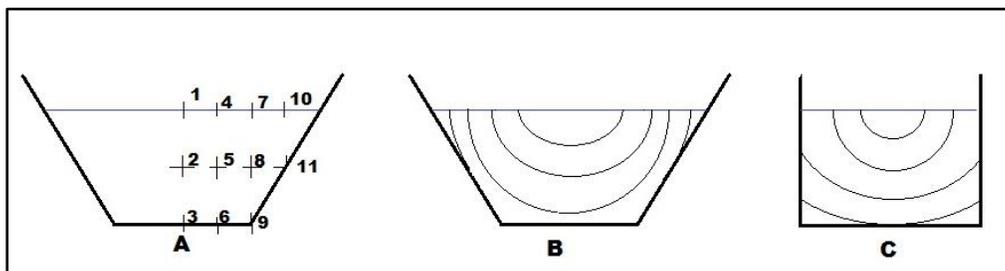


Figura 2. Distribución de velocidades en los canales.

La distribución de velocidades en la sección transversal del canal depende también de otros factores, como la forma, la rugosidad del canal y la presencia de curvas.

De acuerdo con el procedimiento para el aforo de corrientes del U.S. Geological Survey, la sección transversal del canal se divide en franjas verticales por medio de un determinado número de verticales sucesivas, y las velocidades medias en las verticales se determinan midiendo la velocidad a 0,6 de la profundidad en cada vertical, o tomando el promedio de las velocidades a 0,2 y a 0,8 de la profundidad, cuando se requieren resultados más confiables. (Chow, 2004).

Los métodos más conocidos para determinar la velocidad de agua son los siguientes:

a. Método del correntómetro

En este método la velocidad del agua se mide por medio de un instrumento llamado correntómetro que mide la velocidad en un punto dado de la sección del canal. Cada correntómetro debe tener un certificado de calibración en el que figura la fórmula para calcular la velocidad sabiendo el número de vueltas o revoluciones de la hélice por segundo. Estos correntómetros se calibran en laboratorios de hidráulica por medio de una fórmula de calibración, que es la siguiente:

$$V=a*n+b$$

Dónde:

- V: Velocidad del agua (m/s)
- n: Numero de vueltas de la hélice por segundo.
- a: Paso real de la hélice en metros.
- b: es la llamada velocidad de frotamiento en (m/s)

b. Método del Flotador

Se utiliza un flotador con él se mide la velocidad del agua de la superficie, pudiendo utilizarse como flotador cualquier cuerpo pequeño que flote: como un corcho, un pedacito de madera, una botellita lastrada. Se recomienda utilizar el método del flotador, para aforos de caudales no menores de 250 l/s, ni mayores de 900 l/s, Se calcula con la fórmula:

$$Q = C \cdot A \cdot V; \quad V = e/t$$

Dónde:

- V = Velocidad en m / s
- e = Espacio recorrido por el flotador (m).
- t = Tiempo recorrido por el flotador en s.
- A = Área de la sección transversal (m²)
- C = Factor de corrección
- Q Caudal (m³/s)

Los valores de caudal obtenidos por medio de este método son aproximados, por lo tanto requieren ser reajustados por medio de factores empíricos de corrección (C), que para algunos tipos de canal o lechos de río y tipos de material, a continuación se indican:

Cuadro 1. Factor de corrección (C).

Tipos de cauce	Factor de Corrección (C)	Precisión Velocidad
Canal rectangular con lados y lechos lisos	0,85	Buena
Río profundo y lento	0,75	Razonable
Arroyo pequeño de lecho parejo y liso	0,65	Mala
Arroyo rápido y turbulento	0,45	Muy Mala
Arroyo muy poco profundo de lecho rocoso	0,25	Muy Mala

Fuente: (Ministerio de Agricultura y Riego, 2015)

2.3.2. Estructuras hidráulicas

2.3.2.1. Vertederos

Pueden ser de cresta ancha o delgada y pueden trabajar en flujo de descarga libre, sumergida o ahogada. La ecuación general de los vertederos es:

$$Q = K L H^N$$

Donde:

- Q = Caudal (m³/s)
- K, N = Coeficiente;
- L = Longitud de cresta (m)
- H = Tirante de agua (m)

2.3.2.2. Orificios

Cualquier estructura que pueda trabajar como orificio o tubo se puede usar para aforar, debe tener una abertura limitada por una curva cerrada de forma regular, por donde pasa una corriente de agua. La ecuación del orificio de pequeño diámetro es:

$$Q = CA\sqrt{2gh}$$

Donde:

- Q= Caudal que atraviesa el orificio en m³/s.
- A=Área del orificio en m²
- C=Coeficiente que depende de la contracción y velocidad del agua, que varía de 0,6 a 0,8(cuando se trata de orificios sumergidos ,que es lo más usual, el cociente usado es 0,61)
- g = Coeficiente de aceleración de la gravedad. (g = 9,81 m/s.)
- h= Carga hidráulica o diferencia de nivel de agua en m (aguas arriba y aguas abajo)

2.3.3. Método directo

2.3.3.1. Aforo volumétrico

Se emplea por lo general para caudales muy pequeños y se requiere de un recipiente para coleccionar el agua. Consiste en determinar el tiempo que tarda una corriente de agua en llenar un recipiente de volumen conocido responde a la fórmula:

$$Q=V/T$$

Dónde:

- Q: Caudal m³ /s
- V: Volumen en m³
- T: Tiempo en segundos

2.3.3.2. Aforo gravimétrico

(Sánchez & Casillas, 2008), se sigue un procedimiento similar al anterior, pero el volumen coleccionado de agua en el intervalo de tiempo cronometrado, en lugar de cubicarse se pesa, y el peso (W) del agua se transforma en volumen, dividiéndolo entre el peso específico (γ) del fluido a la temperatura de prueba.

El recipiente vacío debe ser previamente pesado y, una vez lleno, debe pesarse en la misma balanza o dinamómetro, mediante el método gravimétrico, el gasto aforado se determina con el siguiente razonamiento:

$$\text{Peso específico, } \gamma = \frac{\text{Peso del agua}}{\text{Volumen ocupado}} = \frac{W}{V}$$

En donde:

$$V = W/\gamma$$

y por lo tanto:

$$\text{Gasto, } Q = W/\gamma t$$

o también:

$$Gasto, Q = \frac{(Peso\ del\ agua +\ resipente) -\ peso\ del\ recipiente}{Peso\ especifico * tiempo\ de\ llenado}$$

2.4. Correntómetro de Pitot

Existen versiones del correntómetro de Pitot para aforar en conducciones a presión., pero no se ha reportado resultado de investigaciones científicas para el aforo de canales utilizando este mismo principio.

2.4.1. Descripción del correntómetro

El correntómetro de Pitot consta de dos elementos un tubo piezométrica y un tubo de Pitot. El piezómetro mide la energía de presión p/γ ; y, el tubo de Pitot la energía de velocidad $V^2/2g$. El tubo de Pitot es un tubo acodado en ángulo recto, abierto en sus extremos y graduado. Sea el tubo de Pitot de la figura 3, la determinación de las velocidades se realiza midiendo la diferencia de altura de agua en el cauce abierto en los puntos 1 y 2. Aplicando la ecuación de Bernoulli entre los mismos, despreciando las pérdidas de carga, al estar ambas secciones suficientemente próximas., la ecuación citada queda:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g}$$

Donde:

Z= nivel de referencia

γ = peso especifica del agua

P1= presión en el punto 1

P2= presión en el punto 2

V^2 = velocidad del fluido

g= aceleración de la gravedad

Como:

$$Z_1 = Z_2 \quad V_2 = 0 \quad \frac{P_1}{\gamma} = H_1 \quad \frac{P_2}{\gamma} = H_1 + \Delta H$$

Sustituyendo en la ecuación de Bernoulli:

$$V_1 = \sqrt{2 * g * H}$$

Podemos obtener un valor suficientemente aproximado a la velocidad media real, promediando el valor medio situando el tubo Pitot en distintos puntos de la sección transversal del cauce. El inconveniente resulta en la localización diferente de los puntos y su efecto ponderado sobre el resultado final. (Valverde, Peralta, & Altozano, 2006)

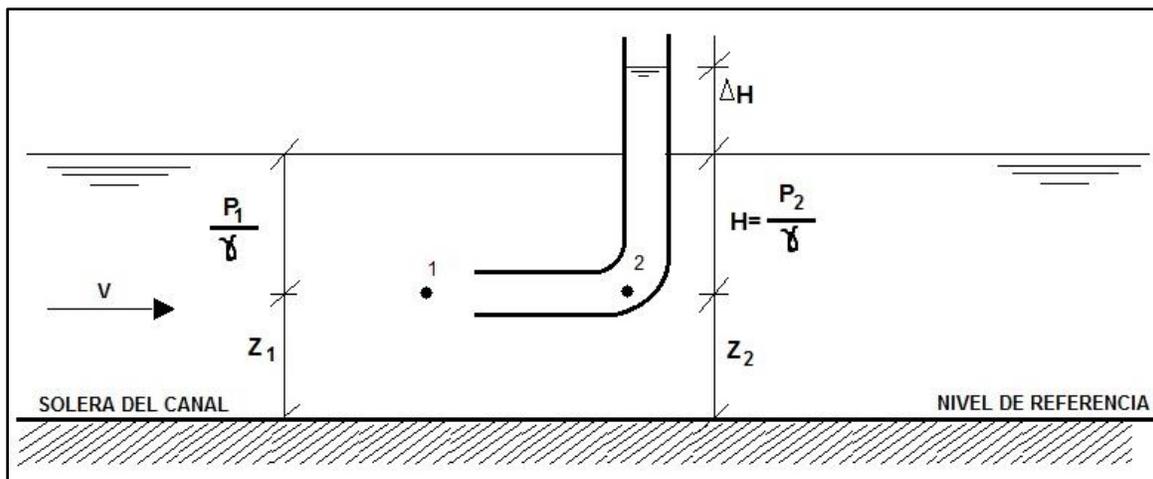


Figura 3. *Tubo de Pitot.*

Es un tubo vertical en su mayor parte y horizontal en un extremo el que se sumerge al operar, está abierto en ambas extremidades. Si el agua estuviera en reposo, penetraría al tubo hasta alcanzar en el interior un nivel igual al de la superficie fuera del tubo, pero cuando hay circulación, el agua al penetrar al tubo sube hasta un nivel mayor que el nivel exterior. Se observa que a mayor velocidad de circulación del líquido, mayor es la altura H que alcanza el agua en el interior del tubo, entonces la velocidad podrá conocerse midiendo H .

Para estudiar la relación que hay entre estas magnitudes, velocidad y altura del agua en el tubo, supondremos dos puntos: uno A dentro del tubo y otro B fuera; podemos

considerar que la partícula de agua en B al pasar a A pierde toda su energía de velocidad para convertirla en energía de presión, que es justamente la debida a la columna del líquido H. Aplicando el teorema de Bernoulli entre A y B, tenemos:

$$V = \sqrt{2gH}$$

Donde:

- V= velocidad del flujo (m/s)
- g= aceleración de la gravedad (m/s²)
- H = diferencial de altura en metros (H1- H2)

Para obtener la curvas de igual velocidad en la sección de una corriente, se hacen exploraciones determinando la velocidad en diferentes puntos, a diferentes profundidades, observando la altura H en el tubo Pitot y la profundidad de la boca con un estadal, marcando con una X en el dibujo de la sección transversal los diferentes puntos de observación e interpolando, se obtienen los puntos de igual velocidad, que unidos por medio de una línea continua, muestran las curvas en cuestión.

Con la ayuda de un planímetro se determinan las áreas de las zonas de igual velocidad, que multiplicadas por la velocidad correspondiente y sumando se obtiene el gasto en la corriente, (Gutiérrez, 2016).

2.4.2. Ecuación de la continuidad

La ecuación de la continuidad es una consecuencia del principio de conservación de la masa. Para un flujo permanente, la masa de fluido que atraviesa cualquier sección de una corriente de fluido, por unidad de tiempo, es constante. Esta puede calcularse como sigue.

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 = \text{constante}$$

$$w_1 A_1 V_1 = w_2 A_2 V_2 \quad (\text{en kg/seg})$$

Para fluidos incompresibles y para todos los casos prácticos en que $w_1 = w_2$, la ecuación se transforma en

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2 = \text{constante} \quad \text{en (m}^3/\text{seg)}$$

Donde A_1 y V_1 son, respectivamente, el área de la sección recta en m^2 y la velocidad media de la corriente en m/seg en la sección 1, con significado análogo en la sección 2. El caudal se mide normalmente en m^3/seg o bien en l/seg . La ecuación de continuidad para un flujo permanente incompresible bidimensional es

$$A_{n1} V_1 = A_{n2} V_2 = A_{n3} V_3 = \text{constante}$$

Donde las magnitudes A_n representan las áreas normales a los respectivos vectores velocidad.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Descripción de los laboratorios de hidráulica

Este proyecto se realizó en el laboratorio hidráulico de gabinete y el laboratorio de campo de la Carrera de Ingeniería Agrícola en la Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional de Loja que se ubica en la ciudad Universitaria “Guillermo Falconí Espinosa”, sector la Argelia en las siguientes coordenadas planas:

Laboratorio de campo

Coordenada Sur: 9553507 m

Coordenada Este: 699464 m

Laboratorio de hidráulica o de gabinete

Coordenada Sur: 9553753 m

Coordenada Este: 699495 m

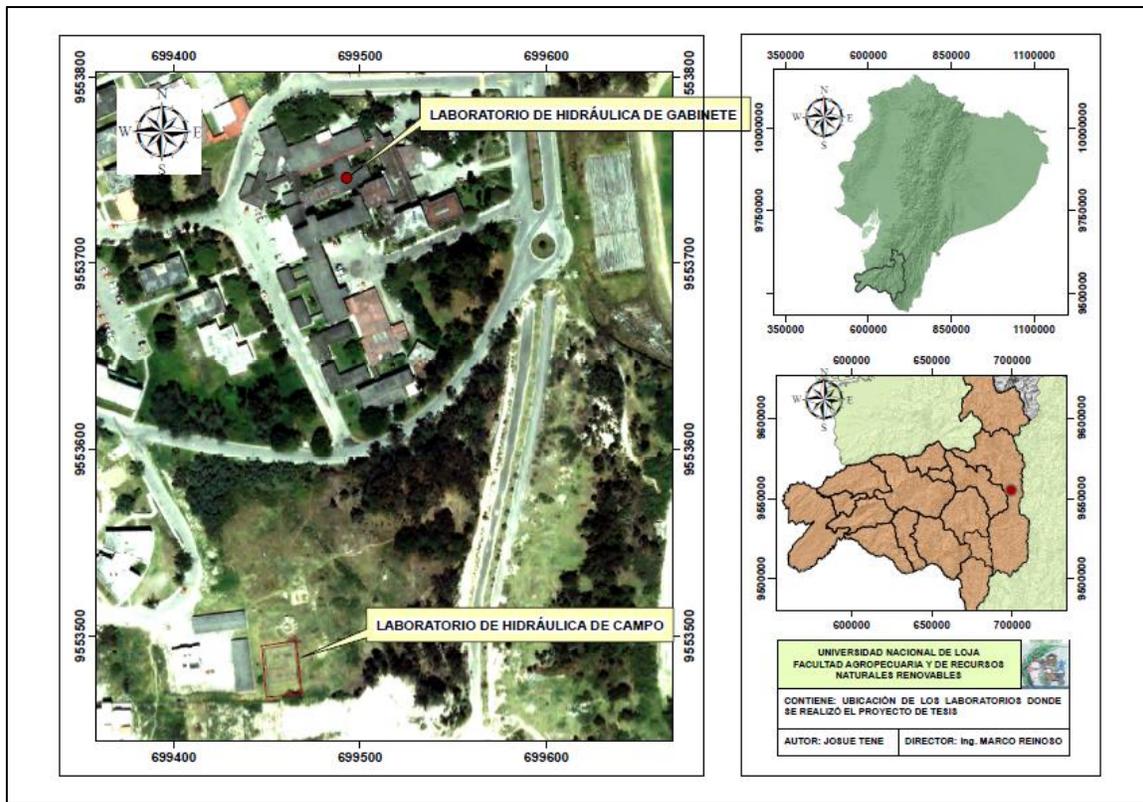


Figura 4. Ubicación de los laboratorios donde se realizó los ensayos de tesis

3.2. Materiales

3.2.1. Materiales de campo

- ✓ GPS.
- ✓ Correntómetro.
- ✓ Cámara digital
- ✓ Dinamómetro digital.
- ✓ Libreta de campo para registró de datos.
- ✓ Lápiz.
- ✓ Canales del laboratorio de campo y de gabinete.
- ✓ Motobomba centrifuga.
- ✓ Tubería flexible.
- ✓ Flexómetro.
- ✓ Cronometro.

3.2.2. Materiales de oficina

- ✓ Papel A4
- ✓ Computador
- ✓ Software (Excel)
- ✓ Calculadora

3.3. METODOLOGÍA

3.3.1. Metodología para el primer objetivo:

“Construir un correntómetro utilizando el principio del tubo de Pitot para el aforo de caudales en canales abiertos”

a. Evaluación de factibilidad del correntómetro en el laboratorio de gabinete

El laboratorio de hidráulica de la Facultad Agropecuaria posee un banco hidráulico que consta de un canal rectangular de 3 m de longitud, 0,1 m de altura y 0,075 m de ancho,

con la posibilidad de medir el caudal que circula por el método gravimétrico. Este canal se lo utilizó para observar a manera de exploración el comportamiento de la carga de velocidad en el tubo de Pitot, con el objetivo de observar si la carga de velocidad podría ser medida; y, para también observar el comportamiento de la carga piezométrica, con el propósito de observar si el espejo del agua dentro del piezómetro se estabilizaba, en vista que la superficie del agua en el canal tiene un oleaje que no permite medir la carga con precisión. Estas experiencias preliminares permitieron tener argumentos para el diseño y construcción del dispositivo de estudio que fue posteriormente evaluado en el laboratorio de campo de la misma Facultad.

b. Diseño y construcción del dispositivo de medición de velocidad del flujo

Luego de analizar el principio del tubo de Pitot que se fundamenta en el Teorema de Bernoulli (energía de posición + energía de presión + energía de velocidad), se procedió a diseñar el correntómetro, considerando que con el respaldo de la teoría, el tubo de Pitot, mide la energía de velocidad del flujo, mientras que el tubo piezómetro determina la energía de presión, es decir la diferencia de lectura entre los dos tubos mide la energía de velocidad.

La decisión de que el correntómetro conste de dos tubos (el piezómetro y el de Pitot), se debe a que por los ensayos preliminares, no se podía leer con precisión la diferencia de altura entre la carga piezométrica o el espejo de agua y la carga de velocidad o carga en el tubo de Pitot, debido al oleaje o pequeña turbulencia de la superficie libre, por esta razón, para evitar esa interferencia de las lecturas de la superficie libre se procedió a utilizar el tubo piezómetro, decisión que resultó ser eficiente.

Otro problema que hubo que superar consistió en facilitar la lectura de la carga de velocidad, ya que esta se manifiesta prácticamente en la superficie del agua, y esto para el observador representa una gran dificultad; por lo tanto, se pensó en transportar esta diferencia de lecturas (del nivel de agua entre el tubo de Pitot y el tubo piezómetro) a una altura lo suficientemente cómoda. Para lograr este propósito, se utilizó flotadores de espuma flex, corcho y madera unidos a un alambre transportador, pero estos, se adherían a la pared de los tubos impidiendo una lectura precisa. Finalmente, la solución al problema consistió en un

transportador eléctrico que emite un sonido (chicharra) en el instante en que cierra un circuito en el agua. El agua pura no es un conductor eléctrico y el agua con un bajo contenido de sales tiene una baja conductividad eléctrica, que es el caso del agua de riego, esta situación no permite que circule adecuadamente la electricidad y la chicharra emite un sonido casi inaudible. Para mejorar la conductividad eléctrica del agua, se inyecta una solución salina de 50 g/litro o de cloruro de sodio (sal común) en los tubos del correntómetro, con lo que se logra mejorar la conductividad del agua y el funcionamiento del indicador sonoro.

Finalmente se adquirió los materiales para su construcción, el correntómetro consta de las partes que se describen a continuación:

La base que es el soporte de los tubos, los tubos que son la parte hidráulica (Pitot y piezómetro) y el sistema de medición que es la parte eléctrica.

El primer elemento consta de un listón graduado de madera con canal, el listón es de 0,90 m de longitud por 0,045 m de ancho y un espesor de 0,02 m, dentro de ella por el canal se desliza una barra de madera graduada con los tubos de Pitot y piezómetro de acuerdo a los requerimientos de toma de datos en el calado del canal, esta barra es de 0,5 m de longitud por 0,05 m de ancho y el espesor de 0,01 m.

El segundo elemento es la parte hidráulica un piezómetro y un tubo de Pitot. El piezómetro mide la energía de presión p/ρ ; y, el tubo de Pitot la energía de velocidad $V^2/2g$. Para la construcción del tubo de Pitot se usó un codo Flex de pequeño diámetro 8 mm, al que se unió un tubo transparente de plástico de 0,5 m de longitud, el piezómetro también consiste en un tubo transparente de 0,5 m de longitud. Ambos elementos están juntos y unidos a la barra de madera de 0,5 m de longitud. Para la unión de los tubos con la madera y pegar la cinta métrica en el listón y la barra se utilizó silicona.

El último elemento es el sistema eléctrico y acústico consta de dos varillas de bronce de 0,505 m de longitud y 3 mm de diámetro (por su conductividad eléctrica y precio), batería (fuente de energía eléctrica de 5 voltios), cables (conductor eléctrico), chicharra (pito), el

reactivo cloruro de sodio (sal común) y una pinza de conexión (para cerrar el circuito). En la parte superior del dispositivo se encuentra la caja de madera de 0,07 m por 0,05 m y 0,05 m, con la chicharra y la batería, desde aquí baja el cable y la pinza, previamente se debe introducir el reactivo salino dentro de los tubos, para que el agua se convierta en conductor eléctrico y así registrar los datos.

3.3.2. Metodología para el segundo objetivo:

“Encontrar la profundidad a la que se encuentra la velocidad media de acuerdo al revestimiento del canal”

a. Elección de los canales en el laboratorio de campo para la calibración del correntómetro “tubo de Pitot”

Primeramente se inspeccionó el laboratorio de campo para hacer una evaluación del estado actual de sus instalaciones, una vez seleccionado y definidos los canales del sistema se dio mantenimiento, limpieza y acondicionamiento de estos para no tener problemas a la hora de toma de datos.

La elección de los canales se la realizó tomando en cuenta su revestimiento, por lo que fueron dos los canales escogidos para la calibración; el primero, es de sección rectangular de hormigón revestido con una longitud de 15 m, un ancho en la base de 0,30 m, una altura de 0,35 m y con un espesor de revestimiento de 0,07 m, el canal tiene una pendiente de 0,002 m/m; el segundo canal que se escogió fue el de tierra de sección rectangular al igual que el de hormigón es de 15 m de longitud, un ancho de 0,35 m, una altura de 0,40 m y una pendiente de 0,002 m/m.

Se escogió los canales rectangulares porque en la mayoría de sistemas de riego de la región sur son de sección rectangular.

b. Evaluación de la velocidad media en el laboratorio de campo

El laboratorio de campo de hidráulica de la Facultad Agropecuaria consta de un grupo de canales de diferente forma y revestimiento, un reservorio y un equipo motobomba en circuito cerrado de circulación.

Para la evaluación de la velocidad media del agua mediante el uso del correntómetro en el canal con revestimiento de hormigón como en el de tierra se siguieron los siguientes pasos: Primero, se procedió a instalar el sistema de bombeo, la captación se la realizó desde el reservorio bombeando agua desde este hasta un tanque disipador de energía, el cual se colocó a la entrada de los canales de estudio.

Luego se aforo el caudal a la salida del disipador de energía por el método gravimétrico, colocando un recipiente en la garganta del disipador para recolectar una masa de agua en un determinado tiempo; luego, con un dinamómetro se pesó el agua para calcular el gasto. Sabiendo que el peso específico del agua es de 1 Kgf / litro, se obtuvo el caudal gravimétrico que circula en la sección transversal del canal utilizando la siguiente expresión.

$$\text{Gasto, } Q = \frac{(\text{Peso del agua} + \text{recipiente}) - \text{peso del recipiente}}{\text{tiempo de recolección}}$$



Figura 5 . Aforo del caudal método gravimétrico.

Se determinó la velocidad media del flujo en el canal despejando V de la ecuación de la continuidad:

$$Q = A \times V$$

$$V = Q/A$$

Donde:

- Q = Caudal del agua en l/s
- A = Área de la sección transversal dm^2
- V = Velocidad media del agua dm/s

Esta velocidad sirvió para compararla con la obtenida mediante el tubo de Pitot.

c. Evaluación de la velocidad mediante el tubo Pitot en el laboratorio de campo

Para la evaluación de la velocidad del flujo en los distintos puntos de sección transversal de los canales, se dividió la sección en líneas horizontales y verticales como una grilla o sistema coordinado, en el cual para todo punto (par ordenado) previamente definido con criterio técnico se midió la carga de velocidad, que consiste en la diferencia entre la carga del tubo Pitot y el tubo piezométrico.

Luego esta carga de velocidad, se la transformó en velocidad de flujo y con esta información se dibujó las líneas isótacas (líneas de igual velocidad), en la sección transversal de los canales de acuerdo a su revestimiento. Los datos se registraron en una libreta de campo para su posterior cálculo, se hicieron tres repeticiones a diferente calado en cada canal para obtener datos confiables.

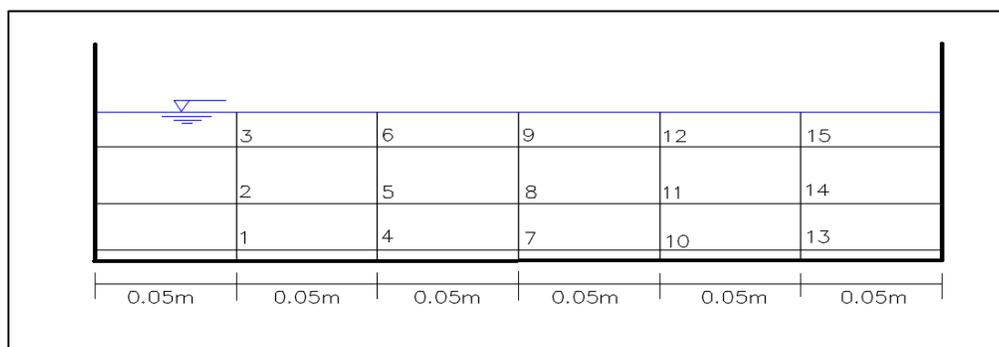


Figura 6. División del canal en sección transversal y vertical para la medición de velocidades en cada punto.

La operación del correntómetro consiste en:

Determinar la profundidad total del calado en el tubo piezométrico utilizando el sistema eléctrico del correntómetro (se cierra el circuito eléctrico y suena la chicharra).

En segundo lugar, se hicieron tres lecturas en cada vertical una próxima a la solera a un 1,0 cm, la segunda a la mitad de la profundidad del calado y la tercera a 1,0 cm del espejo de agua o superficie del agua.

El mismo procedimiento se sigue para la lectura en el tubo de Pitot. Con las dos medidas tanto del piezómetro como del tubo de Pitot se saca la diferencia Δh que luego se lo transforma en velocidad con la formula $V = \sqrt{2g\Delta h}$.

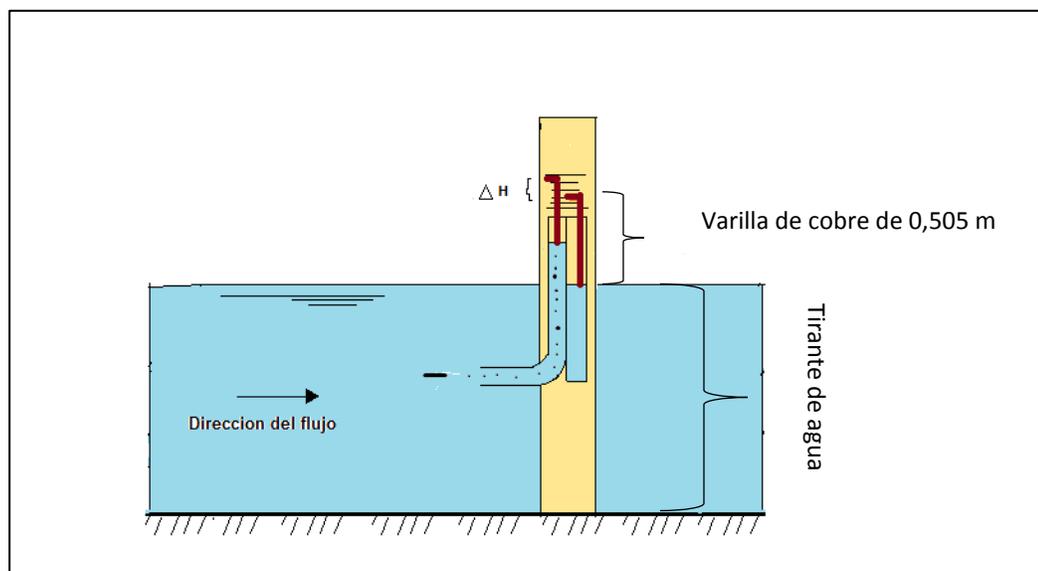


Figura 7. Funcionamiento de la varillas para la lectura de datos

Con los valores de velocidad medidos con el dispositivo (carga de velocidad) en cada punto y graficadas las líneas isotacas, se procedió a ubicar la velocidad media (calculada mediante el aforo gravimétrico), ésta velocidad media se la ubica en las líneas isotacas en el eje de simetría del canal; si la profundidad de la velocidad media corresponde a 0,6 del calado, se acepta esta como la velocidad media; pero si, ésta se ubica a una profundidad mayor o menor, será necesario a la velocidad 0,6 h de las isotacas multiplicarla por un factor

de corrección (**Kd**, coeficiente del dispositivo) para que se convierta en la velocidad media del flujo.

Este coeficiente **Kd** se lo obtuvo de las tres repeticiones de dividir, la velocidad calculada por el método gravimétrico con la velocidad que salió de las líneas isotacas a la profundidad 0,6 h.

Finalmente para el cálculo del caudal, se usó la velocidad media corregida y la sección transversal o área mojada del canal de acuerdo a su revestimiento.

3.3.3. Metodología para el tercer objetivo:

“Evaluar el funcionamiento del correntómetro comparando con el método volumétrico”

Para comprobar la confiabilidad del correntómetro, se procedió a calcular la velocidad media del flujo con el dispositivo y calcular el caudal para luego comparar con los valores obtenidos mediante el método volumétrico.

Fórmula del método volumétrico: $Q = V/t$

Donde:

Q= caudal en m³/s

V= volumen en m³

t= tiempo en segundos

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Construcción de un correntómetro utilizando el principio del tubo de Pitot para el aforo de caudales en canales abiertos

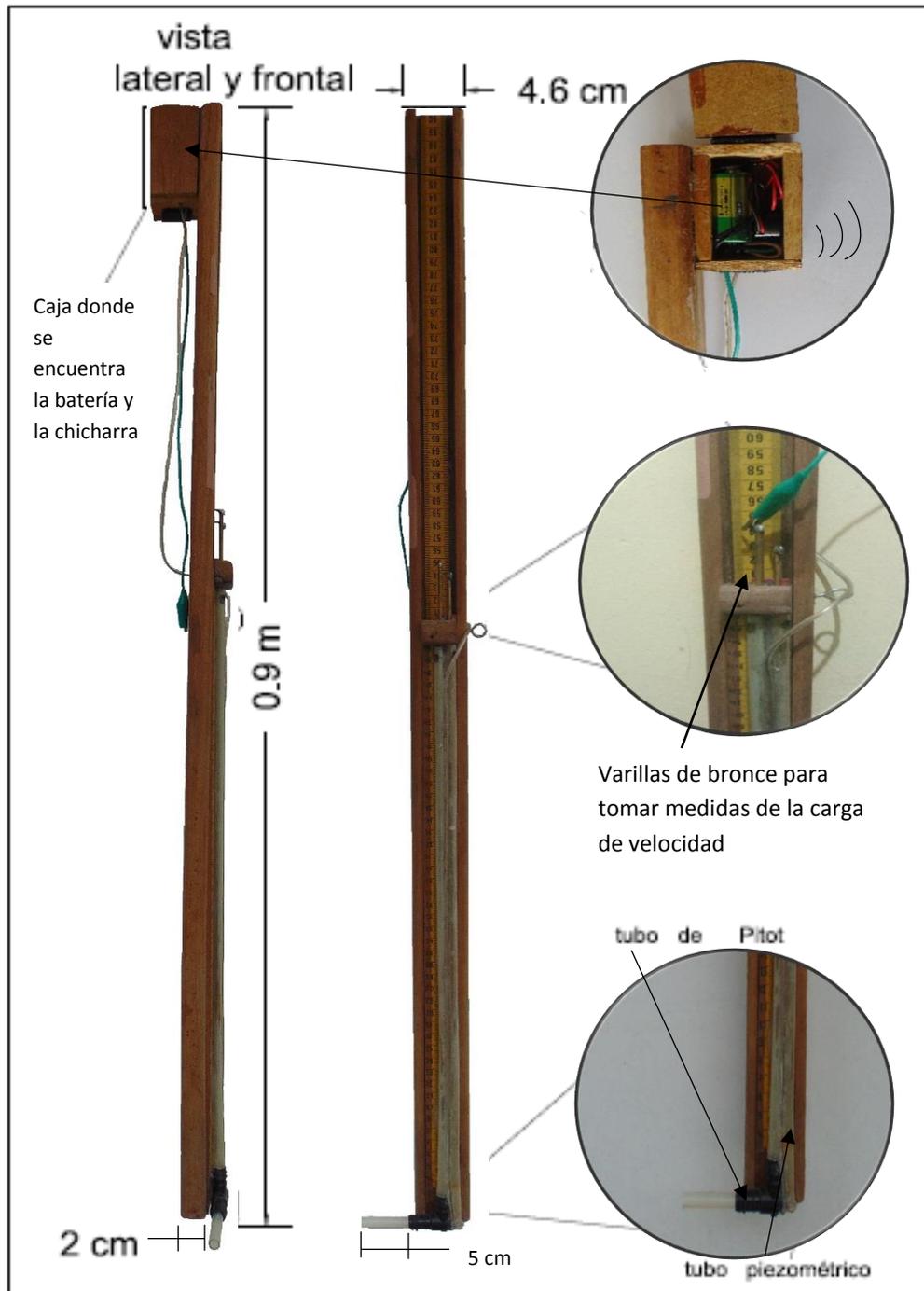


Figura 8. Componentes del dispositivo de medición de velocidad del flujo.

Las partes del correntómetro son: cuerpo o estructura de soporte; sistema de medida, que consta de un tubo piezométrico y un tubo de Pitot; sensor eléctrico y acústico de medida que consta de dos varillas de cobre insertos en el sistema de medida; y, el reactivo químico para generar conductividad eléctrica en el agua dentro del sistema de medida.

El cuerpo o estructura de soporte es de madera y tiene una longitud de 0,90 m por un ancho de 0,045 m y un espesor de 0,02 m; en la estructura principal se encuentra un canal, en el cual se desliza una barra de madera graduada con el sistema de medida de acuerdo a los requerimientos de toma de datos.

En el sistema de medida, el tubo piezómetro y el tubo de Pitot son de un material de plástico transparente de 0,5 m de longitud y 8 mm de diámetro y, en el caso del tubo de Pitot un codo flex también de 8 mm.

El sensor eléctrico y acústico de medida, consta de dos varillas de bronce de 0,505 m de longitud y 3 mm de diámetro, batería, cables, chicharra, el reactivo cloruro de sodio y una pinza de conexión. En la parte superior del correntómetro se encuentra la caja de madera con la chicharra y la batería, desde aquí baja el cable hasta la parte inferior del dispositivo, la pinza queda en la parte superior de las varillas de cobre, estas cierran el circuito al momento de introducir el reactivo dentro de los tubos en la toma de datos.

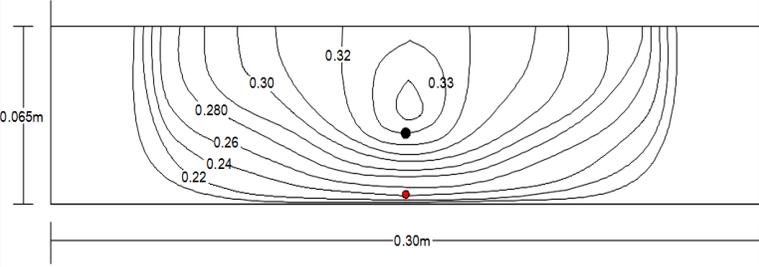
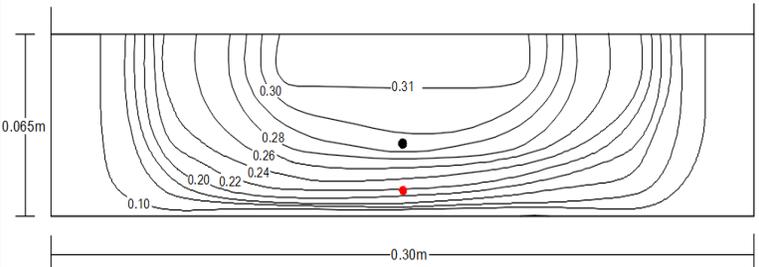
4.2. Evaluación de la profundidad a la que se encuentra la velocidad media del flujo de agua de acuerdo al revestimiento del canal

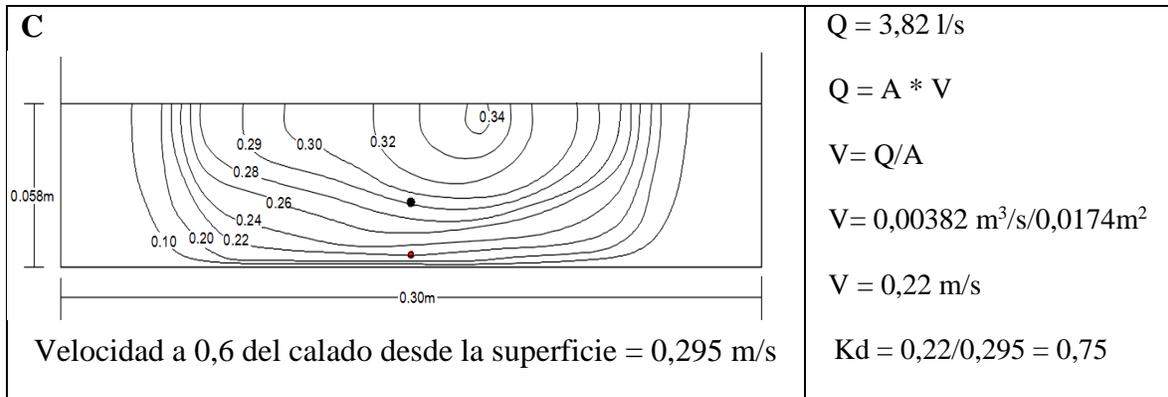
Las velocidades en un canal no están uniformemente distribuidas en su sección transversal, situación que depende de la forma de la sección transversal, la rugosidad de las paredes del canal y la presencia de curvas. Encontrar la velocidad media en un canal es importante ya que esta es la que representa todas las velocidades del agua a lo largo y ancho de su sección transversal; según cita Ven Te Chow, la velocidad media se encuentra a 0,6 de la profundidad en cada vertical o tomando promedios a 0,2 y 0,8 si se quiere datos más confiables. En el estudio se ubicó en la curvas isotacas datos a 0,6 de la profundidad.

4.2.1. Evaluación en el canal de hormigón

Con la medición de la carga de velocidad en los distintos puntos de la sección transversal del canal, se calculó la velocidad del flujo de agua en esos puntos y se dibujó las curvas isotacas que se presentan en el cuadro 2. La figura A corresponde a un caudal de 4,51 l/s, el B a 4,43 l/s y el C a 3,8 l/s; con estos caudales, se procedió a calcular la velocidad media tomando en cuenta el área mojada transversal del canal, utilizando la ecuación de la continuidad. La velocidad media para cada uno de los calados del canal son: Para la figura A y B es de 0,23 m/s, mientras que para C corresponde un valor de 0,22 m/s.

Cuadro 2. *Calculo de la velocidad media en el canal de hormigón.*

Curvas isotacas	Método gravimétrico
<p>A</p>  <p>Velocidad a 0,6 del calado desde la superficie = 0,33 m/s</p>	<p>$Q = 4,43 \text{ l/s}$</p> <p>$Q = A * V$</p> <p>$V = Q/A$</p> <p>$V = 0,00443 \text{ m}^3/\text{s}/0,0195\text{m}^2$</p> <p>$V = 0,23 \text{ m/s}$</p> <p>$Kd = 0,23/0,33 = 0,70$</p>
<p>B</p>  <p>Velocidad a 0,6 del calado desde la superficie = 0,295 m/s</p>	<p>$Q = 4,51 \text{ l/s}$</p> <p>$Q = A * V$</p> <p>$V = Q/A$</p> <p>$V = 0,00451 \text{ m}^3/\text{s}/0,0195\text{m}^2$</p> <p>$V = 0,23 \text{ m/s}$</p> <p>$Kd = 0,23/0,295 = 0,78$</p>



De acuerdo con el procedimiento para el aforo de corrientes del U.S. Geological Survey sobre el tema de la velocidad media, señala que esta se encuentra a una profundidad de 0,6 del calado desde la superficie del agua; para la identificación de la velocidad media del flujo con el uso del correntómetro en estudio, se pretende seguir este mismo criterio, por lo que, en las curvas isotacas, se midió la velocidad a esta profundidad (0,6 h), que corresponde a 3,9 cm en el experimento A y B y unas velocidades de 0,33 m/s y 0,295 m/s respectivamente; mientras que en el C es igual a 3,5 cm. con una velocidad de 0,295 m/s.

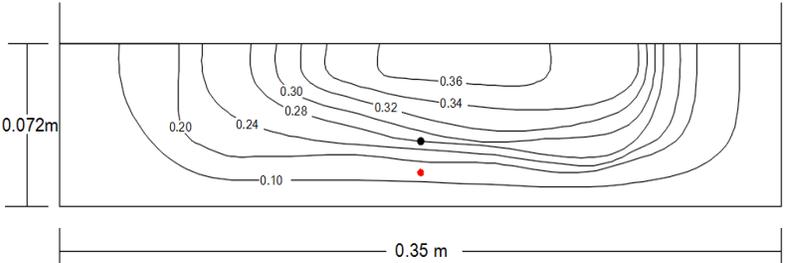
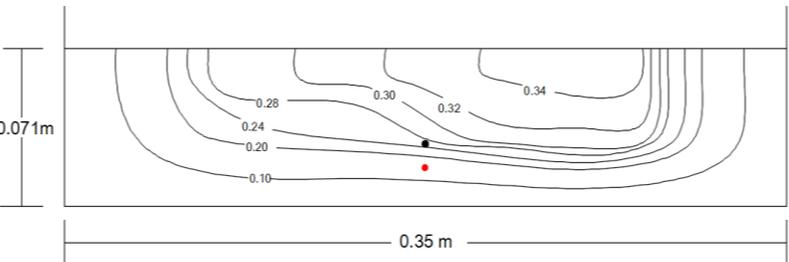
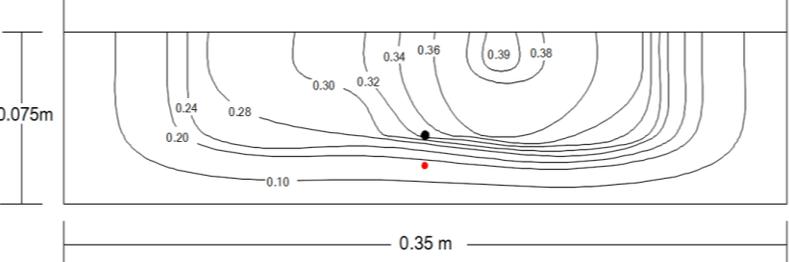
Entonces, la velocidad media medida con el correntómetro, debe ser transformada en la velocidad media calculada a través del aforo gravimétrico, con un coeficiente de funcionamiento del correntómetro (Kd). El coeficiente de funcionamiento, por tanto se obtiene de dividir, la velocidad media calculada con el método de aforo gravimétrico por la velocidad media calculada con la carga de velocidad del correntómetro. Los valores obtenidos de Kd, corresponden a 0,70; 0,78; y, 0,75 para los experimentos A, B y C respectivamente. Como los valores de Kd, tienen valores similares, para estos calados, se obtiene un valor promedio que corresponde a 0,74.

4.2.2. Evaluación en el canal de tierra

Al igual que en el canal de hormigón, con la medición de la carga de velocidad en los distintos puntos de la sección transversal del canal, se calculó la velocidad del flujo de agua en esos puntos y se dibujó las curvas isotacas que se presentan en el cuadro 3. La figura A corresponde a un caudal de 4,29 l/s, el B a 3,57 l/s y el C a 4,58 l/s; con estos caudales, se

procedió a calcular la velocidad media tomando en cuenta el área mojada transversal del canal, utilizando la ecuación de la continuidad. La velocidad media para cada uno de los calados del canal son: La figura A con un valor de 0,170 m/s, para el B es de 0,144 m/s, mientras que para C corresponde un valor de 0,174 m/s.

Cuadro 3. *Calculo de la velocidad media en el canal de tierra.*

Curvas isotacas	Método gravimétrico
<p>A</p>  <p>Velocidad a 0,6 del calado desde la superficie = 0,28 m/s</p>	<p>$Q = 4,29 \text{ l/s}$</p> <p>$Q = A * V$</p> <p>$V = Q/A$</p> <p>$V = 0,00429 \text{ m}^3/\text{s}/0,0252 \text{ m}^2$</p> <p>$V = 0,170 \text{ m/s}$</p> <p>$Kd = 0,170/0,28 = 0,61$</p>
<p>B</p>  <p>Velocidad a 0,6 del calado desde la superficie = 0,27 m/s</p>	<p>$Q = 3,57 \text{ l/s}$</p> <p>$Q = A * V$</p> <p>$V = Q/A$</p> <p>$V = 0,0057 \text{ m}^3/\text{s}/0,025 \text{ m}^2$</p> <p>$V = 0,144 \text{ m/s}$</p> <p>$Kd = 0,144/0,27 = 0,53$</p>
<p>C</p>  <p>Velocidad a 0,6 del calado desde la superficie = 0,33 m/s</p>	<p>$Q = 4,58 \text{ l/s}$</p> <p>$Q = A * V$</p> <p>$V = Q/A$</p> <p>$V = 0,00458 \text{ m}^3/\text{s}/0,0262 \text{ m}^2$</p> <p>$V = 0,174 \text{ m/s}$</p> <p>$Kd = 0,174/0,33 = 0,52$</p>

Como ya se mencionó anteriormente que para encontrar la velocidad media en un canal esta se encuentra a una profundidad de 0,6 del calado desde la superficie del agua; para la identificación de la velocidad media del flujo con el uso del dispositivo (tubo de Pitot) en estudio, se siguió este mismo criterio, por lo que, en las curvas isotacas, se midió la velocidad a esta profundidad (0,6 h), que corresponde a 4,32 cm en el experimento A, para el B igual a 4,26 cm y para el C un valor de 4,5 cm con unas velocidades de 0,28 m/s; 0,27 m/s y 0,33 m/s respectivamente.

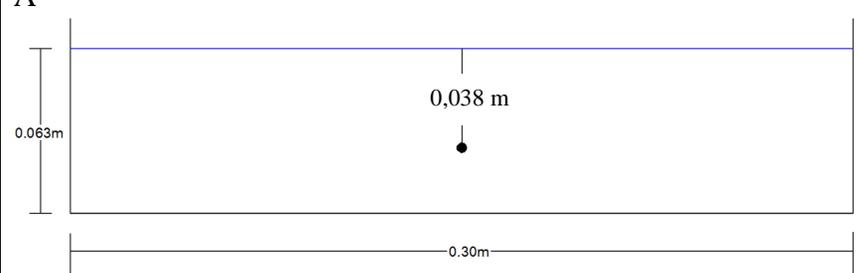
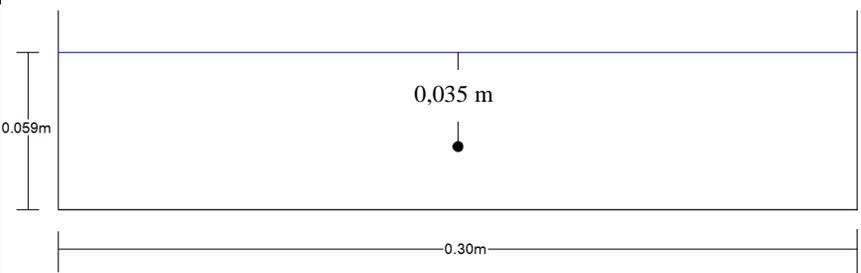
La velocidad media medida con el correntómetro (tubo de Pitot), debe ser transformada en la velocidad media calculada a través del aforo gravimétrico, con un coeficiente de funcionamiento del correntómetro (K_d). El coeficiente de funcionamiento, por tanto se obtiene de dividir, la velocidad media calculada con el método de aforo gravimétrico por la velocidad media calculada con la carga de velocidad del correntómetro. Los valores obtenidos de K_d , corresponden a 0,61; 0,53; y, 0,52 para los experimentos A, B y C respectivamente. Como los valores de K_d , tienen valores casi similares, para estos calados, se obtiene un valor promedio que corresponde a 0,56.

4.3. Evaluación del funcionamiento del correntómetro en el aforo de caudales comparado con el método volumétrico

4.3.1. Evaluación del funcionamiento del correntómetro en el canal de hormigón

Para comprobar el funcionamiento y la confiabilidad del correntómetro, se procedió a calcular la velocidad media del flujo considerando el coeficiente de corrección ($K_d = 0,74$) del dispositivo, en este caso solo se tomó un dato de velocidad a 0,6 h, desde la superficie y se calculó el caudal para luego comparar este valor del caudal, con los valores obtenidos mediante el método volumétrico. En el cuadro 4, se muestra la comparación de los caudales para un canal de hormigón:

Cuadro 4. Evaluación del funcionamiento del correntómetro en el canal de hormigón.

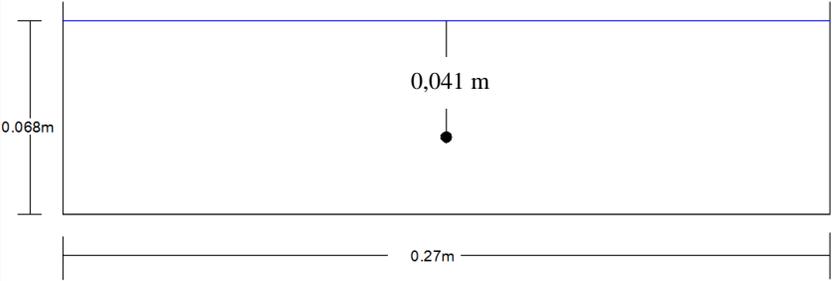
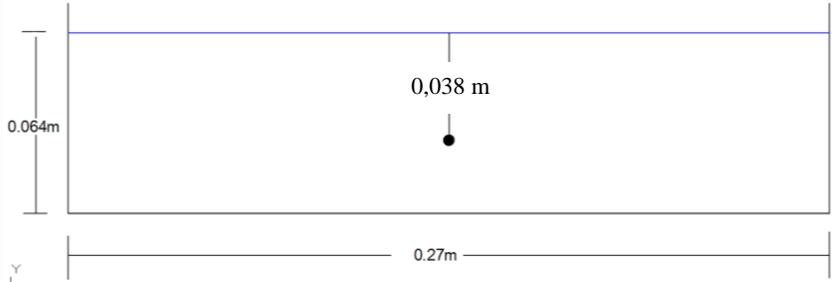
Método del tubo de Pitot					Método Volumétrico
Lectura en el pitot	lectura piezométrica	ΔH	$V = \sqrt{2gh} * kd$	$Q = A*V$	Vol = 11,755 l t = 2,3 s
0,575 m	0,568 m	0,007m	0,274 m/s	0,0052 m ³ /s	Q = 5,11 l/s Q = 0,00511 m ³ /s
<p>A</p> 					
Lectura en el pitot	lectura piezométrica	ΔH	$V = \sqrt{2gh} * kd$	$Q = A*V$	Vol = 9,14 l t = 2,25 s
0,569 m	0,564 m	0,005m	0,232 m/s	0,0041 m ³ /s	Q = 4,06 l/s Q = 0,00406 m ³ /s
<p>B</p> 					

Como se aprecia en la figura A, el caudal calculado con el método del correntómetro (tubo de Pitot) en el primer experimento, es de 5,2 l/s; con el método volumétrico se da un resultado de 5,1 l/s, pudiendo constatar que entre estos dos métodos hay una diferencia de caudal de 0,1 l/s, que corresponde a un 98 % de precisión; en el experimento B, con el método del correntómetro nos da un gasto de 4,1 l/s, y con el método volumétrico un valor de 4,06 l/s, con una diferencia de 0,04 l/s, que corresponde a un 99 % de precisión. En las dos mediciones a diferente calado las diferencias de caudal entre los dos métodos son muy bajas; dándonos una idea de lo preciso que es el instrumento a la hora de medir velocidades para el cálculo de caudales en canales de hormigón.

4.3.2. Evaluación del funcionamiento del correntómetro en el canal de tierra

Igual que el método anterior se hizo los mismos pasos para comprobar el funcionamiento y la confiabilidad del dispositivo, se calculó la velocidad media del flujo considerando el coeficiente de corrección ($K_d = 0,56$) del dispositivo, en este caso se tomó un dato de velocidad a 0,6 h, desde la superficie y se calculó el gasto para luego comparar este valor del caudal, con los valores obtenidos mediante el método volumétrico. En el cuadro 5, se muestra la comparación de los caudales para un canal de tierra:

Cuadro 5. Evaluación del funcionamiento del correntómetro en el canal de tierra.

Método del tubo de Pitot					Método Volumétrico
Lectura en el pitot	lectura piezométrica	ΔH	$V = \sqrt{2gh} * kd$	$Q = A*V$	Vol = 11,397 l t = 2,333 s
0,584 m	0,573 m	0,011m	0,26 m/s	0,00478 m ³ /s	
<p>A</p> 					Q = 4,88 l/s Q = 0,00488 m ³ /s
Lectura en el pitot	lectura piezométrica	ΔH	$V = \sqrt{2gh} * kd$	$Q = A*V$	Vol= 8,74 l t = 2,367 s
0,577 m	0,564 m	0,008 m	0,221 m/s	0,00383 m ³ /s	
<p>B</p> 					Q = 3,7 l/s Q = 0,0037 m ³ /s

En la figura A, podemos observar, que el gasto o caudal calculado con el método del correntómetro es de 4,78 l/s; aplicando el método volumétrico se da un resultado de 4,88 l/s, verificando que entre estos dos métodos hay una diferencia de caudal de 0,1 l/s, que corresponde a un 98 % de precisión; en el experimento B, con el método del correntómetro nos da un caudal de 3,83 l/s, y con el método volumétrico un valor de 3,70 l/s, con una diferencia de 0,13 l/s, que corresponde a un 97 % de precisión. En las dos mediciones a diferente calado las diferencias de caudal entre los dos métodos son muy bajas; esto nos da una idea de la precisión que tiene el instrumento a la hora de medir velocidades para el cálculo de caudales en un canal de tierra.

5. CONCLUSIONES

- Se diseñó y construyó un correntómetro para la medición de la velocidad del agua en cauces abiertos a través de la carga de velocidad.
- Para el aforo de caudales de agua que circulan por un canal rectangular con calados entre 5,8 cm y 6,5 cm y 30 cm de solera y revestimiento de hormigón con el correntómetro, se utiliza un coeficiente K_d que corresponde a un valor de 0,74, para el cálculo de la velocidad media del agua.
- Para el aforo de caudales de agua que circulan por un canal rectangular con calados entre 7,1 cm y 7,5 cm y 35 cm de solera y de tierra con el correntómetro, se utiliza un coeficiente K_d que corresponde a un valor de 0,56, para el cálculo de la velocidad media del agua.
- El correntómetro tiene un 98,5% de precisión en el canal de hormigón y un 97,5% en el canal de tierra en promedio, comparado con el método de aforo volumétrico.
- El correntómetro utiliza materiales accesibles y de bajo costo lo cual hace fácil su construcción.

6. RECOMENDACIONES

Como los coeficientes de descarga del correntómetro son diferentes para los canales en estudio, se recomienda:

- Investigar cómo cambia el coeficiente del correntómetro K_d en función del calado.
- Investigar cómo cambia el coeficiente del correntómetro K_d en función de la rugosidad de las paredes del canal.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Chanson, H. (2002). Hidráulica del flujo en canales abiertos . Bogotá: Emma Ariza H.
- Chow, V. T. (2004). Hidráulica de Canales Abiertos. Santa Fé de Bogotá: McGraw-Hill.
- King, H. W., Wisler, C. O., & Woodburn, J. G. (1982). hidráulica. México: Trillas.
- Krochin, S. (1978). Diseño Hidráulico. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Ministerio de Agricultura y Riego. (2015). Manual del cálculo de eficiencia para sistemas de Riego. Lima: DGIAR.
- Ruiz, J. Z. (1985). Obras Hidráulicas. Barcelona: Gersa, Industria Gráfica.
- Ronald V, G. (1979). Mécanica de los fluidos e hidraulica. México. D. F.: McGraw-Hill.
- Valverde, J. A., Peralta, I. B., & Altozano, P. G. (2006). Ingeniería Rural Aplicada. Valencia. Universidad Nacional Politécnica de Valencia.
- Sánchez, G. B., & Casillas, I. G. (2008). Aforo del agua en canales y tuberías. En I. G. Gregorio Briones Sánchez, Aforo del agua en canales y tuberías. México: Trillas.
- Servicio de Conservacion de Suelos Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América. (1972). Mediciones del Agua de Riego. México: Diana.
- Gutiérrez, E. (25 de febrero de 2016). Metodos de aforo en cauces naturalales. (en línea) disponible en http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/medidores/aforo_cauces/aforo_cauces.htm

8. ANEXOS

Anexo 1. Registro de datos en el campo para el canal de hormigón experimento 1.

METODO DEL TUBO DE PITOT				
N° de lecturas	h lectura cm	Lecturas m	Nivel m	ΔH m
1	1.0	0.572	0.57	0.002
2	2.5	0.573	0.57	0.003
3	5.0	0.574	0.57	0.004
4	1.0	0.573	0.57	0.003
5	2.5	0.574	0.57	0.004
6	5.0	0.575	0.57	0.005
7	1.0	0.574	0.57	0.004
8	2.5	0.576	0.57	0.006
9	5.0	0.5755	0.57	0.0055
10	1.0	0.5735	0.57	0.0035
11	2.5	0.574	0.57	0.004
12	5.0	0.575	0.57	0.005
13	1.0	0.572	0.57	0.002
14	2.5	0.573	0.57	0.003
15	5.0	0.574	0.57	0.004

Anexo 2. Registro de datos en el campo para el canal de hormigón experimento 2.

METODO DEL TUBO DE PITOT				
N° de lecturas	h lectura cm	Lecturas m	Nivel m	ΔH m
1	1.0	0.571	0.57	0.001
2	2.5	0.5725	0.57	0.0025
3	5.0	0.573	0.57	0.003
4	1.0	0.572	0.57	0.002
5	2.5	0.574	0.57	0.004
6	5.0	0.575	0.57	0.005
7	1.0	0.572	0.57	0.002
8	2.5	0.5745	0.57	0.0045
9	5.0	0.575	0.57	0.005
10	1.0	0.571	0.57	0.001
11	2.5	0.574	0.57	0.004
12	5.0	0.575	0.57	0.005
13	1.0	0.571	0.57	0.001
14	2.5	0.572	0.57	0.002
15	5.0	0.573	0.57	0.003

Anexo 3. Registro de datos en el campo para el canal de hormigón experimento 3.

METODO DEL TUBO DE PITOT				
N° de lecturas	h lectura cm	Lecturas m	Nivel m	ΔH m
1	1.0	0.565	0.563	0.002
2	2.5	0.566	0.563	0.003
3	5.0	0.567	0.563	0.004
4	1.0	0.566	0.563	0.003
5	2.5	0.567	0.563	0.004
6	5.0	0.568	0.563	0.005
7	1.0	0.565	0.563	0.002
8	2.5	0.568	0.563	0.005
9	5.0	0.569	0.563	0.006
10	1.0	0.565	0.563	0.002
11	2.5	0.566	0.563	0.003
12	5.0	0.567	0.563	0.004

Anexo 4. Aforo de caudal en el canal de hormigón experimento 1.

METODO GRAVIMETRICO				
Peso cubeta kg	Peso agua + cubeta kg	Peso real de agua Kg	Tiempo seg	$Q= V/t$ (l/s)
1.08	16.15	15.07	3.41	4.42
1.08	16.66	15.58	3.54	4.40
1.08	16.73	15.65	3.50	4.47
			Promedio	4.43

Anexo 5. Aforo de caudal en el canal de hormigón experimento 2.

METODO GRAVIMETRICO				
Peso cubeta kg	Peso agua + cubeta kg	Peso real de agua Kg	Tiempo seg	$Q= V/t$ (l/s)
1.08	14.55	13.47	3.12	4.32
1.08	15.3	14.22	3.29	4.32
1.08	13.5	12.42	2.62	4.74
1.08	14.9	13.82	2.95	4.68
1.08	16.3	15.22	3.41	4.46
			Promedio	4.51

Anexo 6. Aforo de caudal en el canal de hormigón experimento 3.

METODO GRAVIMETRICO				
Peso cubeta kg	Peso agua + cubeta kg	Peso real de agua Kg	Tiempo seg	Q= V/t (l/s)
1.08	11.46	10.38	2.64	3.93
1.08	10.55	9.47	2.53	3.74
1.08	12.42	11.34	3.04	3.73
1.08	14.98	13.9	3.59	3.87
				3.82

Anexo 7. Registro de datos en el campo para el canal de tierra experimento 1.

METODO DEL TUBO DE PITOT				
N° de lecturas	h lecturas cm	Lecturas m	Nivel m	ΔH m
1	3,0	0.577	0.573	0.004
2	6,0	0.579	0.573	0.006
3	3,0	0.589	0.584	0.005
4	6,0	0.591	0.584	0.007
5	3,0	0.581	0.5775	0.0035
6	6,0	0.584	0.5775	0.0065
7	3,0	0.5765	0.574	0.0025
8	6,0	0.577	0.574	0.003

Anexo 8. Registro de datos en el campo para el canal de tierra experimento 2.

METODO DEL TUBO DE PITOT				
N° de lecturas	h lecturas cm	Lecturas m	Nivel m	ΔH m
1	3,0	0.579	0.574	0.005
2	6,0	0.58	0.574	0.006
3	3,0	0.586	0.581	0.005
4	6,0	0.587	0.581	0.006
5	3,0	0.578	0.575	0.003
6	6,0	0.58	0.575	0.005
7	3,0	0.576	0.574	0.002
8	6,0	0.578	0.574	0.004

Anexo 9. Registro de datos en el campo para el canal de tierra experimento 3.

METODO DEL TUBO DE PITOT				
N° de lecturas	h lecturas cm	Lecturas m	Nivel m	ΔH m
2	3,0	0.589	0.584	0.005
3	6,0	0.59	0.584	0.006
5	3,0	0.587	0.58	0.007
6	6,0	0.588	0.58	0.008
8	3,0	0.585	0.581	0.004
9	6,0	0.586	0.581	0.005
11	3,0	0.584	0.581	0.003
12	6,0	0.585	0.581	0.004

Anexo 10. Aforo de caudal en el canal de hormigón experimento 1.

METODO GRAVIMETRICO				
Peso cubeta kg	Peso agua + cubeta kg	Peso real de agua Kg	Tiempo seg	$Q=V/t$ (l/s)
1.08	16.61	15.53	3.79	4.10
1.08	17.25	16.17	3.59	4.50
1.08	15.56	14.48	3.43	4.22
1.08	16.85	15.77	3.62	4.36
			promedio	4.29

Anexo 11. Aforo de caudal en el canal de hormigón experimento 2.

METODO GRAVIMETRICO				
Peso cubeta kg	Peso agua + cubeta Kg	Peso real de agua Kg	Tiempo seg	$Q= V/t$ (l/s)
1.08	13.8	12.72	3.78	3.37
1.08	13.68	12.6	3.53	3.57
1.08	13.28	12.2	3.34	3.65
1.08	13.45	12.37	3.36	3.68
			promedio	3.57

Anexo 12. Aforo de caudal en el canal de hormigón experimento 3.

METODO GRAVIMETRICO				
Peso cubeta kg	Peso agua + cubeta kg	Peso real de agua Kg	Tiempo seg	Q= V/t (l/s)
1.08	12.98	11.90	2.62	4.54
1.08	15.69	14.61	3.18	4.59
1.08	12.21	11.13	2.43	4.58
			promedio	4.57

Anexo 13. Fotografías de evidencia.



a. Elección de los canales para la evaluación del correntómetro.



b. *Limpieza, acondicionamiento y toma de medidas de los canales.*



c. *Aforo del caudal por el método gravimétrico y Toma de datos de velocidad con el dispositivo en los respectivos canales.*



- d.** *Lectura de las velocidades en el dispositivo y medición de la velocidad aplicando el coeficiente del correntómetro K_d para compararlo con el método volumétrico.*