

Diseño de la estación para la medición del caudal del vertedero de excesos del embalse

Bucaramanga

Julio Cesar Diaz Diaz y Juan Pablo Santana López

Trabajo de grado modalidad investigación para optar al título de Ingeniero Civil

Director

Andres Almeyda Ortiz

Msc. Ingenieria civil

Universidad Industrial de Santnader

Facultad de Ingeniería Físico- Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2020

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo en el cual se resume el esfuerzo, la dedicación, los conocimientos, las experiencias y todo lo que he vivido durante estos años de formación. En primera instancia a Dios por darme día a día las fuerzas necesarias para seguir adelante sin importar las diferentes adversidades que se fueron presentando en el camino, segundo a mi familia y en especial a mi padre, mis abuelitos y mi novia. Los cuales han sido apoyo incondicional desde el principio hasta el final de mi ciclo formativo en esta gran universidad que dejó huella en mi corazón para toda la vida.

Juan Pablo Santana Lopez

Quiero dedicar este trabajo el cual representa mis años como estudiante siendo el reflejo del esfuerzo, la dedicación y las ganas por ser ingeniero. Primeramente, a mis padres en especial a mi madre Ana Diaz Gutiérrez que ha luchado incansablemente para brindarme lo necesario a lo largo de mi carrera y ayudarme a convertir este sueño en algo real, a mis hermanos que me acompañaron con sus consejos y que han hecho con sus palabras enderezar mis objetivos brindándome apoyo y fortaleza. Asimismo, a Zareth que siempre me regalo una palabra de aliento en esos duros instantes donde las cosas no salían bien. A mis compañeros: Adrián, Alejandro, Alexander, Daniel, Juan Andres, Maria, Lina y Yoleima que fueron mis principales ayudas en mi formación y que me acompañaron por mi camino Universitario. Por último, brindar este triunfo a mi abuelita Clementina Gutiérrez que siempre fue mi amiga y con la que hoy me gustaría compartir esté logro y aunque el tiempo no nos permitió estar juntos, espero que desde el cielo celebres conmigo este logro.

Julio Cesar Diaz Diaz

Agradecimientos

Agradecemos al Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB S.A.E.S. P) por suminístranos el equipo necesario, el recurso humano y brindarnos las garantías para el desplazamiento y la realización de este proyecto. Un agradecimiento muy especial a nuestro director de proyecto Andrés Almeyda Ortiz. Ms. Civil, por haber guiado y acompañado en esta larga tarea, brindándonos accesorias y garantías para la realización y desarrollo de esté. A Nelson Suarez Ing. Ambiental y a Mauricio Mora Ing. Electricista, quienes fueron parte fundamental en el acompañamiento de las campañas de aforo.

Contenido

	Pág
Introducción	12
1. Objetivos	14
1.1 Objetivo General.....	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2. Marco Teórico.....	14
2.1 Vertedero tipo Morning Glory	16
2.2 Especificaciones del vertedero.....	17
2.3 Aforar	19
2.4 Curva de gasto.....	21
3. Metodología y Desarrollo	23
3.1 Selección del punto de medición para determinar el caudal desalojado del vertedero.....	24
3.1.1 Río Tona, en el punto Puente Tona.....	26
3.1.2 Túnel de descarga.	27
3.1.3 Entrada del labio del vertedero Morning Glory.....	28
3.2 Medición del caudal del vertedero, realizado en el punto puente Tona.....	31
3.3 Curva de gasto para la estación de medición.	34
3.4 Elección de la tecnología a implementar en la estación de medición.....	45
3.4.1 Limnógrafo	47

3.4.2 Sonda de presión:	47
3.4.3 Sensor por radar:	47
3.5 Diseño de la estación de medición del caudal del Morning Glory	48
4. Resultados y Discusiones.....	50
5. Conclusiones	51
6. Recomendaciones	52
Referencias Bibliográficas	53
Apendices.....	55

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Embalse Río Tona	15
Figura 2. Metodología Empleada para la realización de la Estación de Medición Embalse Bucaramanga.....	24
Figura 3. Vista Planta Embalse Río Tona.....	25
Figura 4. Río Puente Tona	26
Figura 5. Túnel de descarga.	27
Figura 6. Entrada del vertedero de excesos tipo Morning Glory.....	28
Figura 7. Aforo realizado sobre el puente Tona	31
Figura 8. Molinete Universal OTT C31.....	33
Figura 9. Contador OTT Z400.....	34
Figura 10. Aforadores de las filtraciones del embalse.....	35
Figura 11 Curva de gasto Experimental.....	41
Figura 12. Curva de gasto teórica	43
Figura 13. Pila del vertedero de excesos.....	46

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Especificaciones Vertedero de Excesos.....	18
Tabla 2. Entrada del vertedero de excesos tipo Morning Glory.	29
Tabla 3. Caudales de las campañas de aforo puente Tona.....	32
Tabla 4. Filtraciones Totales de la presa.....	36
Tabla 5. Caudal del vertedero de excesos.	38
Tabla 6. Pares de datos Carga Hidráulica y caudal de vertedero de excesos.....	40
Tabla 7. Porcentaje de error entre caudal del vertedero de excesos y curva de gasto experimental.....	41
Tabla 8. Datos Suministrados del proyecto de simulación a escala reducida del embalse de bucarmanga.....	42
Tabla 9. Porcentaje de error.	44
Tabla 10. Caudales de las curvas de gasto experimental y teórico.....	45

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A Funcionamiento del vertedero tipo “MORNING GLORY”	55
Apéndice B Vista planta Proyecto de regulación del embalse de Bucaramanga.....	56
Apéndice C Pluviómetro embalse de Rio Tona lluvias 01/10/2019 hasta 31/03/2020.....	57
Apéndice D Formato de aforo de caudales	60
Apéndice E Instructivo del protocolo del monitoreo y seguimiento del agua para cálculo de aforos.....	61
Apéndice F calculo tipo de aforo hidráulico 31/10/2019.....	63
Apéndice G Planos para el diseño de la estación OTT SE 200	72
Apéndice H presupuesto preliminar del diseño OTT SE 200.....	74
Apéndice I Planos para el diseño de la estación OTT RLS	75
Apéndice J presupuesto preliminar del diseño OTT RSL	76
Apéndice K método de Nash aplicado a curva de gasto teórico.....	77
Apéndice L Parámetros del método de Nash.....	78
Apéndice M método de RMSE aplicado a curva de gasto teórico	79
Apéndice N Método de Nash aplicado a curva de gasto experimental.....	80
Apéndice O Método de RMSE aplicado a curva de gasto experimental	81

Resumen

Título: Diseño de la estación para la medición del caudal del vertedero de excesos del embalse Bucaramanga*

Autores: Julio Cesar Diaz Diaz, Juan Pablo Santana Lopez **

Palabras Clave: Vertedero De Excesos, Aforos, Curva De Gasto Y Estación De Medición.

Contenido

El crecimiento demográfico mundial trae consigo problemas a las sociedades, ejemplificados por una parte en el suministro eficiente, oportuno y óptimo de servicios públicos; la solución a estas problemáticas se centra en una adecuada planeación y proyección de sistemas modernos que permitan garantizar el suministro de recursos; en este caso, por ejemplo, el suministro de agua implica una correcta gestión de recursos que contemple soluciones ingenieriles de intervención en espejos de agua tales como, lagunas, embalses, reservorios, etc. A nivel local existen dos entidades encargadas de la protección y gestión de los recursos hídricos para Bucaramanga y su área metropolitana estas son: la Corporación Autónoma Regional para la defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), y el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB) S.A. E.S.P. Como propósito misional el acueducto proyecta garantizar el suministro de agua potable para los próximos 25 años a través del proyecto de regulación del río Tona embalse de Bucaramanga. Para garantizar el correcto funcionamiento de la presa, esta cuenta con un vertedero tipo Morning Glory, estructura de protección que permite el desalojo del exceso de agua presente en el embalse, pese a que el vertedero se encuentra en funcionamiento no se cuenta con un sistema de monitoreo y registro el cual reporte la cantidad de flujo desalojada, Por consiguiente, surge la necesidad de cuantificar el caudal que llega a evacuar el embalse en tiempo real, obtener estos datos es relevante, ya que al conocer dicho caudal se puede establecer un balance hídrico. Para ello, se realizaron campañas de aforo teniendo como objetivo generar la curva de gasto asociada al embalse, posteriormente se determinaron parámetros de: lugar, ubicación de tecnologías a implementar y presupuestos de dos soluciones de estación. Se concluye sugiriendo implementar el diseño de una estación con Limnógrafo digital, considerando su menor precio y precisión.

* Tesis de Ingeniería

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director Andres Almeyda Ortiz Msc Ingenieria Civil

Abstract

Title: Design of the station for the measurement of the flow of the excess landfill of the Bucaramanga reservoir*

Authors: Julio Cesar Diaz Diaz, Juan Pablo Santana Lopez**

Keywords: Excess Spillway, Gauging, Flow Curve And Measuring Station

Contents

World population growth brings problems to societies, exemplified on the one hand by the efficient, timely and optimal supply of public services; the solution to these problems is centered on adequate planning and projection of modern systems that guarantee the supply of resources; in this case, water provision implies correct resource management that contemplates engineering solutions for intervention in water bodies such as lagoons, reservoirs, etc. At a local level there are two entities in charge of the protection and management of water resources for Bucaramanga and its metropolitan area: the Regional Autonomous Corporation for the Defense of the Bucaramanga Plateau (CDMB), and the Metropolitan Aqueduct of Bucaramanga (AMB) S.A. E.S.P. As a mission purpose the aqueduct projects to guarantee the supply of drinking water for the next 25 years through the project of regulation of the Tona River Bucaramanga reservoir. In order to guarantee the correct operation of the dam, it has a Morning Glory spillway, a protection structure that allows the evacuation of the excess water present in the reservoir, even though the spillway is in operation, there is no monitoring and registration system that reports the amount of flow that has been evacuated. Therefore, there is a need to quantify the flow that is evacuated from the reservoir in real time, obtaining this data is relevant, since knowing this flow can establish a water balance. To this end, gauging campaigns were carried out with the aim of generating the flow curve associated with the reservoir. Subsequently, parameters were determined such as: location, location of technologies to be implemented and budgets for two station solutions.

* Engineering Thesis

** Faculty of Physic-mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Andres Almeyda Ortiz Msc civil engineering

Introducción

El proyecto de regulación del río Tona se desarrolló e implementó en el departamento de Santander a 12 km de la vía que comunica a Bucaramanga – Matanza (Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, 2015), esta mega obra fue construida para almacenar alrededor de 17 millones de metros cúbicos de agua, a fin de garantizar el suministro de agua potable al Área Metropolitana de Bucaramanga para los próximos 25 años. Este proyecto tiene la capacidad de abastecer un flujo de salida comprendido entre los 1200 a 3200 l/s, dependiendo de las necesidades de operación. (Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, 2015) Para cumplir con este objetivo y lograr un correcto funcionamiento fue primordial implementar obras complementarias que brinden garantías de estabilidad, buen funcionamiento y operación del embalse. (“Proyectos Estratégicos Regulación del Río Tona- Embalse de Bucaramanga”, s. f.) En este sentido, las obras complementarias anexas del embalse que garantizan su óptimo funcionamiento corresponden a las siguientes estructuras proyectadas dentro de las especificaciones técnicas: Túnel del vertedero de excesos, Estructuras disipadoras de energía, estructuras de captación, túnel de desviación, Morning Glory entre otros elementos que en su conjunto corresponden a los elementos de seguridad y operación del embalse. (Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, 2015).

De este conjunto, el presente documento centra su atención en el vertedero de excesos, elemento que se construye para garantizar la seguridad hidráulica de la presa y mantener el adecuado funcionamiento del embalse, asimismo, esta estructura, funciona cuando la cota de la lámina de agua del embalse supera la cota del labio del vertedero de excesos, para desalojar por

medio de este el agua de manera controlada, garantizando así, el óptimo funcionamiento del embalse en caso de una crecida súbita (Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, 2015). A causa de la construcción del vertedero de excesos surge la problemática de conocer la cantidad de agua que puede desalojar esta estructura. El conocimiento de este dato permite al amb S.A. E.S.P tener la capacidad de realizar el balance hídrico del embalse. Por tal motivo, se hace necesario la implementación de un sistema de monitoreo, medición y seguimiento del nivel de la lámina de agua en el embalse, en consecuencia, e implementar dicho sistema requiere hacer uso de conceptos propios de la hidrometría; la utilización de dichos conceptos permitirá calcular la cantidad de agua desalojada por medio de aforos hidráulicos (ORTEGA-GAUCIN, 2012). Dichos aforos fueron ejecutados en conjunto con personal dispuesto por el amb S.A. E.S.P, realizando un total de 12 campañas de aforo con molinete hidráulico. Producto de esas mediciones se calcula el caudal desalojado por el vertedero y se toma el valor de la cota de la lámina de agua del embalse para cada instante de aforo, estos datos permiten determinar una relación matemáticamente llamada curva de gasto o curva de descarga (IDEAM, 2007).

Una vez se genera dicha curva experimental, se procedió a compararla contra la curva de gasto teórica establecida en el proyecto de simulación a escala reducida del embalse de Bucaramanga (Almeyda, 2014).

Finalmente, se establecen los parámetros constructivos y técnicos que permiten desarrollar dicho sistema de monitoreo, medición y seguimiento (IDEAM, 2007).

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Medir el caudal de excesos del embalse Bucaramanga

1.2 Objetivos Específicos

- Seleccionar el punto de medición de caudal de excesos del embalse Bucaramanga
- Realizar mediciones del caudal de excesos que produce el embalse Bucaramanga.
- Determinar la curva de gasto para la estación de medición de caudal y selección de la tecnología a aplicar.

2. Marco Teórico

El proyecto de regulación del río Tona - embalse de Bucaramanga, proyecto donde se desarrolló el proyecto (Figura 1) (“Proyectos Estratégicos Regulación del Río Tona- Embalse de Bucaramanga”, s. f.).

Figura 1.*Embalse Río Tona*

Nota. Tomado de: Google Earth.

El embalse de Bucaramanga cuenta con unos niveles de referencia para su correcta operación los cuales son: cota mínima de operación 841 m.s.n.m., nivel máximo de operación normal 885.75 m.s.n.m. y por último el máximo de operación extraordinario el cual es 891.6 m.s.n.m(SALAS & MANRIQUE, 2017). Una vez superado el nivel máximo de operación normal, el embalse desaloja el caudal de exceso mediante un vertedero de excesos de cresta ancha tipo Morning Glory(Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, 2015). El cual de manera controlada vierte dicho caudal al cauce del río Tona y finalmente al río Suratá, con la finalidad de no generar afectaciones aguas abajo y de igual manera garantizar que el volumen de agua almacenado no produzca daños al mismo embalse, este problema de no tener un adecuado manejo genera

problemas de socavación y de estabilidad de la presa debido a que las cargas que se generarían sobre esta serían considerablemente altas(Fernandez Alzate, 2013).

Ya que el objeto de este proyecto es el diseño de una estación que permita el conocimiento del caudal excedente del embalse, se realizó un estudio del vertedero, para ello fue necesario definir los aspectos y características principales del mismo(Almeyda, 2014).

2.1 Vertedero tipo Morning Glory

Un vertedero tipo Morning Glory puede llegar a presentar tres tipos de descarga. Según la Figura del Bureau of Reclamation del U.S. Department of the Interior (Anexo 1), la curva de descarga de este tipo de vertedero presenta un primer control en la cresta del vertedero entre las ordenadas “0” y “1” (Caso 1), entre la carga “1” y “2” la descarga es controlada por el pozo (Caso 2), y por último para cargas superiores a “3” la descarga es controlada por el túnel de descarga (Caso 3). Estos dos últimos casos se pueden llegar a presentar dependiendo de la geometría adoptada para los distintos elementos que conforman la estructura y el caudal de entrada.(Almeyda, 2014)

Para cargas pequeñas caso 1, es decir niveles de agua de poca magnitud sobre la estructura vertedera. El control de la descarga se hace por medio de la ecuación del vertedero [9].

$$Q = Cd(2\pi R_s)H_o^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

Donde:

Q: Caudal (m³/s).

Cd: Coeficiente de descarga(m/s).

Rs: Radio geométrico del vertedero(m)

Ho: Altura de flujo (m).

Para este tipo de descarga tanto el pozo como el túnel de descarga y el codo que los une, el flujo llenara parcialmente estos conductos. Al aumentar la carga sobre la cresta del vertedero, se van llenando cada vez más las secciones del pozo y el túnel, hasta llegar a un punto tal que una sección del pozo se llena (garganta), donde ya este punto se vuelve un control para el flujo (Caso 2). El cálculo de la descarga a través de un pozo se realiza por medio de la ecuación9].

$$Q = \left(\frac{R}{0,275} \right)^2 * Ha^{0,5} \quad (2)$$

Donde

Q: Caudal (m³/s)

R. Radio geométrico del vertedero (m).

Ha: Altura de flujo (m).

Nota: R y Ha depende del punto en el pozo donde se presente el control(Almeyda, 2014).

2.2 Especificaciones del vertedero

Se trata de un vertedero tipo Morning Glory en concreto convencional, cuya estructura de entrada se encuentra fundada sobre una plazoleta a la cota 883 msnm, nivel en el cual se encontró roca competente que permitió garantizar la estabilidad de la estructura(Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, 2015).

El vertedero está conformado por un azud circular de radio 10.00 m, continuando con un pozo vertical de aproximadamente 25 m de profundidad y de radio variable (entre 10 y 4.50 m), éste se conecta a través de un codo a un túnel de 317 m de longitud, el cual conduce el flujo hasta

un deflector de chorro, permitiendo disponer el caudal evacuado en el cuenco de socavación de la obra. (Almeyda, 2014)

El diámetro del pozo varía entre 20,00 m a la entrada y 9.00 m en el empalme con el codo. Su geometría se definió de acuerdo con lo propuesto por el U. S. Bureau of Reclamation en función de la altura de la estructura de entrada, el radio a la entrada del pozo, el coeficiente de descarga, la cabeza máxima sobre la cresta y el caudal de diseño(Almeyda, 2014).

El pozo y el túnel se conectan a través de un codo de 18.00 m de radio vertical, correspondientes a una distancia igual a dos veces el diámetro del pozo, según lo propuesto por el U.S. Bureau of Reclamation, de sección circular y diámetro hidráulico de 9.00 m (Almeyda, 2014).

La (Tabla 1) sintetiza los aspectos relevantes de las especificaciones geométricas y de funcionalidad del vertedero en el embalse de Bucaramanga.

Tabla 1.

Especificaciones Vertedero de Excesos.

VERTEDERO	
Capacidad (creciente máximo probable CMP)	1500 m ³ /s
Tipo	Sifón (Morning Glory)
Diámetro / Longitud Foso Ingreso	20.0 m / 47.0 m
Diámetro útil del túnel	9.00 m
Revestimiento del túnel	Concreto convencional
Elevación del nivel de la cresta de la estructura de control	885.750 msnm
Altura lámina de agua con la CMP	5.80 m
Estructura terminal	En forma de trampolín (salto de esquí)
Disipación de energía	En cuenco de erosión pre-excavado

Con el objetivo de no generar daños al medio ambiente ni a la población aguas abajo, fue necesario cuantificar la cantidad de fluido que excede la capacidad de almacenamiento para el correcto funcionamiento del embalse. Por lo tanto, es de vital importancia conocer conceptos como (Wulf Klohn, 1969):

2.3 Aforar

Aforar es realizar la medición de un caudal mediante diferentes métodos o tecnologías que se pueden usar para ello, existen también diferentes tipos de aforo tales como los aforos directos o los indirectos continuos. (AMB, 2019).

Para este proyecto se siguió el protocolo para el monitoreo de agua del IDEAM [4]. Con el propósito de obtener mediciones confiables que faciliten la calibración total de la sección de aforos que a su vez se tengan facilidades logísticas para el desplazamiento de las comisiones con los equipos de hidrometría, la sección transversal debe cumplir los siguientes requerimientos técnicos y logísticos (IDEAM, 2007):

a. La sección debe estar situada a un tramo recto de la corriente. En lo posible, la longitud del tramo tendrá un mínimo equivalente a cinco (5) veces el ancho de la sección (IDEAM, 2007).

b. La corriente debe mostrar líneas de flujo uniformes y paralelas a las márgenes de la corriente e igualmente que sean normales a la sección transversal de aforos, de tal manera que la medición de la velocidad sea precisa para la obtención del caudal. Cualquier desviación en las líneas de flujo produce alteración en la magnitud, por cuanto vectorialmente no corresponde al 100% de la velocidad, sino a una componente de la misma (IDEAM, 2007).

c. La sección debe ser profunda y tener márgenes naturales altas, para evitar desbordamientos en aguas máximas, con lo cual se garantiza la calibración de caudales máximos (IDEAM, 2007).

d. La pendiente longitudinal del cauce debe ser uniforme, evitándose tramos con quiebres fuertes de pendiente que desequilibran la velocidad del flujo (Manning), así mismo áreas de aguas muertas y contracorrientes o remolinos (IDEAM, 2007).

e. El lecho del río debe tener geometría regular, cauce estable y no tener obstáculos (troncos de árboles, grandes rocas, vegetación, etc.) (IDEAM, 2007).

f. Se debe evitar los lechos fangosos (IDEAM, 2007).

g. La geología del terreno deberá facilitar la construcción de las obras para medición como tarabitas, puentes, pasarelas, etc (IDEAM, 2007).

Las anteriores consideraciones garantizan una buena definición y permanencia de la curva de calibración (relación nivel - caudal) de la sección de aforos, según la ecuación de Manning (IDEAM, 2007).

$$V = \frac{\left(S^{\frac{1}{2}} * R^{\frac{2}{3}}\right)}{n} \quad (3)$$

Donde:

V = Velocidad del agua (m/s)

S = Gradiente hidráulico;

R = Radio hidráulico (m)

n = Coeficiente de rugosidad. (IDEAM, 2007)

Para el Aforo de las corrientes naturales existen varios métodos como lo son volumétricos, con vertederos y canaletas, tubo de Pitot, con trazadores fluorescentes o colorantes, con trazadores

químicos y radiactivos, flotadores y con molinete o correntómetro. Siendo este último el que fuera utilizado para la realización de este proyecto (Marbello Pérez, 2013).

El aforo con correntómetro parte de un principio de medir la velocidad con un molinete. Supone un molinete puesto en un punto a lo largo de corriente de agua que tiene una Velocidad V . Siendo s la longitud que llega a moverse a lo largo del de la hélice completando un giro (Marbello Pérez, 2013).

Para este proyecto el método de aforo consistió en realizar dos tomas de velocidades ($v_{0.2}$ y $v_{0.8}$) en cada vertical una a 0.8 y a 0.2, de la profundidad bajo la superficie, con estas dos velocidades medias se llega a determinar una velocidad media

$$Vm = \frac{V_{0.2} + V_{0.8}}{2} \quad (4)$$

Al implementar correntómetro hidráulico aumenta el error por efectos en la proximidades de la superficie y del lecho del canal de la corriente entonces cuando la vertical sea inferior a 60 cm se implementa el método 0.6 en este caso no se realizan dos mediciones si no tan solo una medición respecto de la superficie (Wulf Klohn, 1969).

2.4 Curva de gasto

Una curva de gasto es la representación gráfica de las variaciones de las descargas en la sección transversal de un río, en función de la altura de este en la mira [12].

Para los niveles en que se tenga suficiente cantidad de aforos (niveles medios) su elaboración no presenta mayor dificultad. El problema se reduce al ajuste de la curva, ya sea por método logarítmico o por las ecuaciones de los mínimos cuadrados. Pero para extrapolar de una

manera aceptable dicha curva es necesario conocer características geométricas de la sección transversal del sitio de aforo (Marbello Pérez, 2013).

La precisión de las curvas de gasto depende de un conjunto de factores donde, en primer lugar, se encuentra el error de medición de campaña de aforo asociado a la batimetría y a la medición de la velocidad. La segunda fuente de error se llama error de estimación y proviene de la dispersión de los datos empíricos con relación a la curva de gasto. La tercera fuente del error aparece en el caso cuando una relación se construye con base en una regresión y representa el error de la ecuación de la regresión (Molina Tilano & Parga Hernández, 2018).

Las curvas de gasto vigentes que maneja el IDEAM se construyen normalmente con base en la relación potencial empleando diferentes metodologías cumpliendo los siguientes criterios: que la relación sea correcta, precisa, proporcionar la lectura de caudales con un rango de error mínimo, igual distribución de puntos a los lados de la curva y menor desviación en la curva. Posteriormente se realiza la extrapolación de la curva a través de los métodos existentes en función si son niveles bajos (Método logarítmico, método de Running, Johnson) o altos (Método de Manning, Stevens, área velocidad o logarítmico) (Molina Tilano & Parga Hernández, 2018).

De manera general, toda relación nivel-caudal puede ser representada en su totalidad o por tramos sucesivos, por expresiones matemáticas. Las más utilizadas son (Molina Tilano & Parga Hernández, 2018):

La forma exponencial

$$Q = a (h - Z_0)^n \quad (5)$$

Siendo:

h: Nivel de la lámina de agua

Z₀: Cota del labio del vertedero

a, n coeficientes específicos para cada sección y representan características hidráulicas de ellas.

Forma polinomial

$$Q = a_0 + a_1 h_1 + a_2 h_2 + \dots + a_n h_n \quad (6)$$

Siendo:

h: Nivel de la lámina de agua

a_n : Coeficientes específicos para cada sección (Molina Tilano & Parga Hernández, 2018).

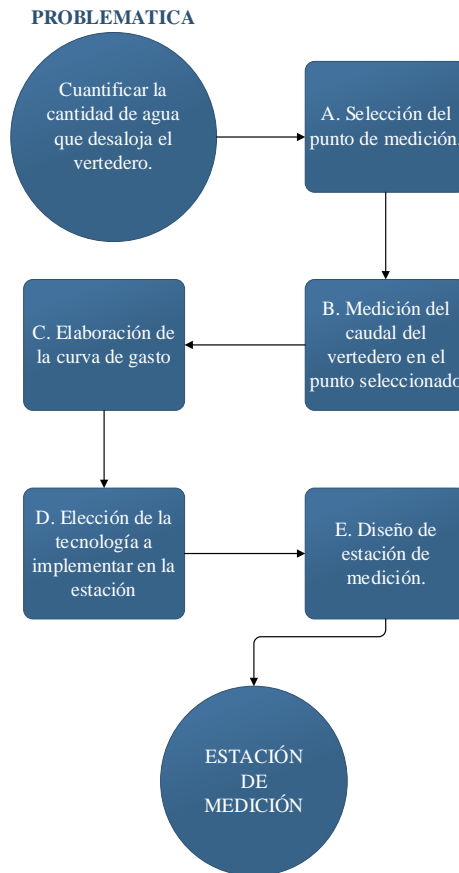
Ya que se necesita conocer la altura o nivel de lámina de agua para la creación de la curva de gasto, y para ello el AMB dispone del equipo Hydrostatic Level Transmite, el cual es un sensor que mide la presión hidrostática que genera la lámina de agua que se encuentra sobre el mismo, es decir, que calcula de manera directa la altura de la cota de agua (Transmitter, s. f.) .

3. Metodología y Desarrollo

Para dar solución al objetivo de diseñar una estación de medición, monitoreo y seguimiento se plantearon 5 fases de desarrollo que permitieron dar respuesta al problema de conocer el caudal desalojado por el vertedero de excesos en tiempo real (**Figura 2**):

Figura 2.

Metodología Empleada para la realización de la Estación de Medición Embalse Bucaramanga



3.1 Selección del punto de medición para determinar el caudal desalojado del vertedero.

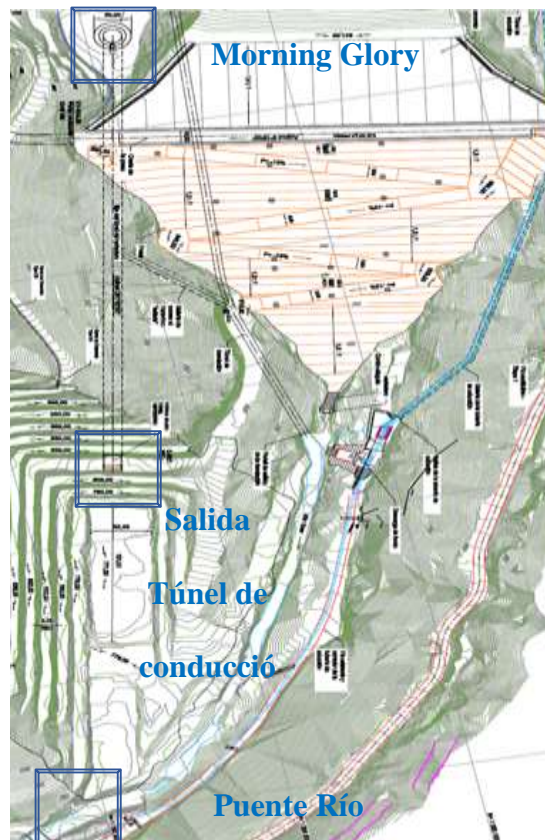
Determinar la cantidad de agua desalojada a través del vertedero Morning Glory es necesario para modelar o determinar una curva de gasto, la cual se puede desarrollar a través de tres métodos de estimación de relaciones nivel-caudal a saber: (i) método de aforo directo, (ii) ensayo con escala reducida y (iii) la construcción de un modelo numérico (Aldana, 2002). La estimación de relación nivel-caudal seleccionada para determinar la curva de gasto, corresponde al método de aforo directo, esta selección obedece al conocimiento previo que para dicho vertedero

se tiene, bajo esta situación se conoce que el análisis a través de ensayo con escala reducida ya ha sido desarrollado y se quiso comparar dicho modelo por escala reducida contra el modelo por aforo directo.

Partiendo de esta selección del método, la implementación de una curva de gasto utilizando el aforo directo requiere la selección del punto de medición adecuado, observando las condiciones funcionales de operación del embalse se pudo establecer tres puntos donde cuantificar el caudal de excesos que salen a través del vertedero. Estos puntos son: (i) Río Tona, en el punto denominado puente Tona, (ii) Salida del túnel de descarga, (iii) entrada del vertedero de excesos (IDEAM, 2007). A continuación se ilustran los tres puntos de posible toma de datos (Figura 3) para mejor visualización ver anexo 2:

Figura 3.

Vista Planta Embalse Río Tona



Nota. Tomado de: AMB S.A E.S.P

A continuación, se describen las condiciones del entorno para cada uno de los puntos de medición identificados.

(i) El primer punto identificado corresponde al puente Tona, localizado a 200 metros aguas abajo de la presa del embalse de Bucaramanga. Es un canal natural conformado por un lecho rocoso y su forma es irregular (Figura 4).

3.1.1 Río Tona, en el punto Puente Tona

Ubicado $7^{\circ}09'26.9''N$ $73^{\circ}05'40.5''W$.

Figura 4.

Río Puente Tona



(ii) Túnel de descarga, es una sección tipo baúl donde llega y circula el agua que es transportada desde el Morning Glory. El túnel tiene una geometría de 9 m de ancho, 6.44 m de alto en la parte recta de las paredes y el arco del baúl presenta un radio de 5 m, para una altura

total de la bóveda de 9.50 m- Su superficie está construida en concreto, tanto en la base como sus paredes (Figura 5) (Almeyda, 2014).

3.1.2 Túnel de descarga.

Ubicado $7^{\circ}09'24.5''N$ $73^{\circ}05'30.1''W$.

Figura 5.

Túnel de descarga.



(iii) Labio del Vertedero de excesos Morning Glory, este tiene un diámetro de 20 m, presenta en uno de sus costados una pila de aireación en concreto, la superficie del mismo está construida igualmente en concreto, su función es la de transportar el agua excedente del embalse, se encuentra ubicado en la cota de 885.75 m.s.n.m (Figura 6)(Fernandez Alzate, 2013).

3.1.3 Entrada del labio del vertedero Morning Glory

Ubicado $7^{\circ}09'22.0''N$ $73^{\circ}05'21.5''W$.

Figura 6.

Entrada del vertedero de excesos tipo Morning Glory.



Para la selección del punto de medición se tuvo en cuenta el protocolo para monitoreo y seguimiento del agua del Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM)(IDEAM, 2007) y que se aplica al método de aforo directo, este protocolo identifica los requerimientos técnicos y logísticos de la sección transversal que debe cumplir un punto de medición para la utilización de cualquier equipo de hidrometría, en tal caso, el protocolo establece las variables o condiciones a tener cuenta, en el caso actual de estudio, por tanto se realizó una valoración cuantitativa para cada una de estas variables, donde se establece un puntaje de 0 cuando el ítem o indicador no cumple, un valor de 1 si cumple el ítem parcialmente y un valor de 2 si cumple a cabalidad con el ítem evaluado(IDEAM, 2007). así, para posteriormente evaluar cada variable, donde se obtuvo una ponderación numérica que permitió identificar el punto más idóneo que se ajusta a las condiciones ideales establecidas para seleccionar así el punto de medición,

también se tuvo en cuenta la variable correspondiente a la facilidad del acceso al punto de medición

Tabla 2. Producto del emplazamiento previo, en cada punto de medición se identificaron las condiciones técnicas y logísticas como: topografía de punto de medición, condiciones del flujo de corriente, seguridad de aforadores y accesibilidad para transporte de equipos de medición de caudal entre otras (IDEAM, 2007).

Un aspecto importante que señalar es la limitante de equipos de medición a disposición, en este sentido, el equipo hidrométrico disponible para efectuar la toma de datos corresponde a un molinete universal que es el equipo de mayor precisión disponible para recopilar datos.

Aplicado el protocolo del IDEAM para aforo directo, se construye la Tabla 2 en la cual se sintetizan los parámetros técnicos tenidos en cuenta para seleccionar el punto de medición, así mismo, se especifican los valores cuantitativos para cada uno de los indicadores evaluados en cada punto de medición sugerido (IDEAM, 2007).

Tabla 2.

Entrada del vertedero de excesos tipo Morning Glory.

	Vertedero Morning Glory	Túnel de descarga	Río Tona "Puente tona"
1. Cumplir la longitud del tramo mínimo de cinco (5) veces el ancho de la sección.	2	2	2
2. Flujo uniforme y líneas de flujo paralelas	2	1	2
3. La sección debe ser profunda y márgenes naturales	0	0	2

	Vertedero Morning Glory	Túnel de descarga	Río Tona "Puente tona"
4. No contener áreas Muertas, no tener remolinos y contracorrientes	0	0	2
5. Geometría regular, cauce estable, o no contener obstáculos	2	2	1
6. Evitar que terreno sea fangoso	2	2	2
7. Facilidad de acceso	0	1	2
Total	8	8	13

Evaluated the protocol of IDEAM, and taking into account Table 2 as a quantitative summary of the application of the protocol, the results allow inferring the measurement point that should be selected, based on the final data it is determined that the Tona bridge point (**Figura 7**) corresponds to the ideal point for measurement given the evaluation of the technical and logistical conditions determined through the protocol. In the same sense, an important indicator of relevance evaluated corresponds to the accessibility that could be had at the measurement point added to the security provided to the personnel who performed the data collection (IDEAM, 2007).

Figura 7.

Aforo realizado sobre el puente Tona

**3.2 Medición del caudal del vertedero, realizado en el punto puente Tona**

El segundo paso en el desarrollo de la metodología planteada (figura 2), corresponde a las medidas de caudal realizadas en el punto puente Tona (figura 4) cuya localización geográfica corresponde a las coordenadas 7°09'26.9"N 73°05'40.5"W, para obtener estos datos se realizaron 12 campañas de aforo ajustadas a los límites del presupuesto del proyecto, estas se limitaron a cubrir los meses de mayores precipitaciones (IDEAM, 2018), en este sentido, se determinó que las campañas de toma de datos se debían realizar teniendo en cuenta las estadísticas del IDEAM, las cuales señalan que los periodos anuales donde se presentan las mayores niveles pluviométricos en la región corresponden a los periodos comprendidos de febrero a marzo y octubre a noviembre (IDEAM, 2018).

Pese a las estadísticas señaladas por IDEAM, los niveles pluviométricos de la estación del embalse Río Tona registrados en la región no fueron del todo los esperados (anexo 3) en la medida que las lluvias presentadas no ocasionaron que en el vertedero desalojara caudales superiores a los 2.0 m³/s.

La Tabla 3 resume las 12 campañas de aforo, referenciando la fecha en que se realizó y la medición del caudal del vertedero, cabe señalar que se realizaron 4 tomas correspondientes a los meses señalados como de menores precipitaciones, estos datos se resaltan en la tabla en color amarillo (IDEAM, 2007).

Tabla 3.

Caudales de las campañas de aforo puente Tona

Fecha (dd-mm-a)	Caudal (l/s)	Altura embalse (msnm)
16-oct.-19	288.52	885.760
22-oct.-19	1467	885.800
31-oct.-19	313	885.760
6-nov.-19	304	885.762
14-nov.-19	1522	885.800
5-feb.-20	157	885.751
13-feb.-20	109	885.70
20-feb.-20	117	885.745
26-feb.-20	225	885.753
5-mar.-20	141	885.751
12-mar.-20	454	885.760
19-mar.-20	178	885.752

Como se había señalado el dispositivo de registro utilizado para la toma de datos corresponde a un molinete universal OTT C31 (Figura 8), es de resaltar las características favorables que brinda esta tecnología, dentro de las cuales se destaca: capacidad de medir velocidades de afluentes en el rango de 0.025 a 10 m/s, tiene facilidad de maniobra y es fácil de transportar gracias a su moderado peso de 1.26 kg y que junto con los 0.67 kg del contador OTT

400 (Figura 9) hacen de esta tecnología una herramienta de fácil y práctico transporte, el contador OTT 400 permite censar y contabilizar las vueltas en el molinete universal en un periodo de tiempo, para posteriormente hacer su registro correspondiente en la planilla(OTT Hydromet GmbH, s. f.).

Conforme a las características observadas en el punto de medición seleccionado (punto puente Tona), y específicamente a las condiciones presentadas de la lámina de agua de estudio, se identifican los métodos que se ajustan a las condiciones del afluente para llegar a determinar su caudal.

Las condiciones identificadas en campo permiten aplicar el método de 0.2-0.8 o el método de 0.6, ya que estos métodos llamados de aforo puntual permiten entregar los resultados más exactos y seguros (Wulf Klohn, 1969), cada método se implementó considerando la altura de lámina de agua que transportaba el río, así que cuando el tirante hidráulico superaba los 45 cm se utilizaba el método de 0.2-0.8 y en el caso de ser inferior a los 45 cm se hace uso del método de 0.6, estos métodos se implementaron según las instrucciones de aforo con molinete de WULF KOLN(Wulf Klohn, 1969).

Figura 8.

Molinete Universal OTT C31



Nota. Tomado de: Catálogo - Molinete Universal OTT C31 (2020)

Figura 9.

Contador OTT Z400



Nota. Tomado de: Manual de instrucciones OTT Z400 (2020)

Para el registro de datos de cada campaña se utilizó una planilla suministrada por el AMB (anexo 4) (Wulf Klohn, 1969), además, se diligencia el procedimiento de registro(anexo 5) para finalmente calcular el caudal de cada aforo según la metodología documentada en WULF KOLN(Wulf Klohn, 1969), dentro de los anexos se presenta el cálculo tipo del aforo correspondiente al 31 de octubre de 2019 (anexo 6).

3.3 Curva de gasto para la estación de medición.

El caudal censado en el punto de medición del puente Río Tona está conforma por 5 caudales que tienen un origen identificado así: (i) Caudal ecológico del río Tona (ii) Filtración del Túnel de aducción (iii) Filtración del túnel de desvío (iv) Filtración del vertedero de excesos, (v) Caudal transportado por el vertedero de excesos (IDEAM, 2007), en donde los primeros 3 caudales son monitoreados y censado por el AMB en tiempo real en canales triangulares que fueron construidos (Figura 10), por tanto, son conocido dichos caudales, en el caso de las filtraciones del vertedero de excesos hacer un cálculo en tiempo real se dificulta dadas las implicaciones

logísticas y operativas que se deben ejecutar para obtener dicho valor, sin embargo, se puede hacer uso de un valor calculo en el 2016, y utilizarlo como una constante en el cálculo(SALAS & MANRIQUE, 2017).

Figura 10.

Aforadores de las filtraciones del embalse.



Nota. Tomado de Oscar Oswaldo Cortes

Identificados los diferentes afluentes que convergen en el punto donde se realizan las campañas de aforo, paso a seguir es necesario cuantificar los caudales de cada uno de estos afluentes, como ya se había mencionado el acueducto cuenta con sistemas de monitoreo y medición para 3 de ellos (caudal ecológico del río Tona, filtración del Túnel de aducción y filtración del túnel de desvío), dichos caudales pasan por vertederos triangulares donde se cuantifica su nivel por medio de sensores de ultrasonido, antes de llegar a converger en el río Tona. Conocidos los niveles de cada uno de los afluentes mencionados se procedió a calcular los caudales para cada uno de ellos, de tal modo, que finalmente se determinó el balance hídrico en el punto puente río Tona, cabe resaltar que el caudal correspondiente a las filtraciones del vertedero de

excesos se determina como un flujo constante del flujo desalojado por el vertedero, así, de esta manera se tiene el siguiente balance hídrico en el punto de medición señalado:

$$Q_{PM} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \quad (7)$$

$$Q_{PM} = \text{Caudal en punto de medida (m}^3/\text{s)}$$

$$Q_1 = \text{Caudal ecológico del río (m}^3/\text{s)}$$

$$Q_2 = \text{Caudal filtraciones tunel de aducción (} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \text{)}$$

$$Q_3 = \text{Caudal filtraciones tunel de desvío (} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \text{)}$$

$$Q_4 = \text{Caudal filtraciones vertedero (m}^3/\text{s)}$$

$$Q_5 = \text{Caudal vertedero de excesos (} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \text{)}.$$

Establecido el balance hídrico en el punto de medición, se identificó que el valor a determinar corresponde a la variable Q_5 . Como ya se había mencionado, el caudal de las filtraciones en el vertedero de excesos corresponde a un valor constante establecido en 9.0 l/s. La Tabla 4 resume los valores de los caudales en cada campaña de aforo realizada (SALAS & MANRIQUE, 2017).

Tabla 4.

Filtraciones Totales de la presa.

FILTRACIONES TOTALES DE LA PRESA				
Fecha (dd-mm-a)	Túnel de aducción (l/s)	Túnel de desvío (l/s)	vertedero de excesos (l/s)	Caudal ecológico (l/s)
16/10/19	2.45	1.06	9.00	114.95
22/10/19	2.45	1.04	9.00	114.96
31/10/19	2.63	1.03	9.00	114.96

FILTRACIONES TOTALES DE LA PRESA				
Fecha (dd-mm-a)	Túnel de aducción (l/s)	Túnel de desvió (l/s)	vertedero de excesos (l/s)	Caudal ecológico (l/s)
06/11/19	2.61	1.03	9.00	114.95
14/11/19	2.58	1.06	9.00	114.97
05/02/20	2.52	1.02	9.00	114.96
13/02/20	2.58	0.96	9.00	114.95
20/02/20	2.71	0.97	9.00	114.96
26/02/20	2.85	0.99	9.00	114.95
05/03/20	2.54	0.96	9.00	114.95
12/03/20	2.27	1.01	9.00	114.96
19/03/20	2.85	0.99	9.00	114.95

Conociendo los datos de las campañas de los aforos que corresponde a los valores registrados en la Tabla 3 y aplicando la ecuación del balance hídrico utilizando los valores de la Tabla 4, se determinó el caudal desalojado por el vertedero de excesos (Tabla 5).

Ejemplo de cálculo de caudal desalojado por el vertedero utilizando los valores obtenidos en la campaña de aforo el día 31 de octubre de 2019.

Filtración Total de la presa fecha 31/10/19 calculo tipo.

$$\text{Total Filtracion de la presa} = 2.63 + 1.03 + 9 + 114.96 = 127.62 \text{ (l/s)}$$

Caudal del vertedero de excesos fecha 31/10/19

$$\text{Caudal del vertedero de excesos} = 313 - 127.62 = 185.37 \text{ (l/s)}$$

Tabla 5.*Caudal del vertedero de excesos.*

Fecha (dd-mm-a)	Caudal de campañas (l/s)	Total, filtración de presa (l/s)	Caudal del vertedero exceso (l/s)
16-oct.-19	288.52	127.46	161.06
22-oct.-19	1467.00	127.45	1339.55
31-oct.-19	313.00	127.62	185.37
06-nov.-19	304.00	127.59	176.41
14-nov.-19	1522.00	127.61	1394.39
05-feb.-20	157.00	127.50	29.50
13-feb.-20	109.00	127.49	*
20-feb.-20	117.00	127.64	*
26-feb.-20	225.00	127.79	97.21
05-mar.-20	141.00	127.45	13.55
12-mar.-20	454.00	127.24	326.76
19-mar.-20	178.00	127.79	50.21

Nota para los valores (*) no se tienen en cuenta debido a que en ese instante la carga hidráulica era inferior a la cota del labio del embalse y se está midiendo tan solo las filtraciones además que el método por aforo directo es un método aproximado.

La Tabla 5 resume los cálculos de flujo de desalojo del vertedero de excesos morning glory, los aforos correspondientes al 13 y 20 de febrero de 2020, proporcionan valores no aptos para ser tenido en cuenta al momento de realizar los cálculos para determinar la curva de gastos.

Ya con los valores de carga hidráulica y el caudal de flujo desalojado del vertedero, se continuó con la metodología que conduce a establecer la fórmula de la curva de gastos, en este punto se debe establecer el tipo de método se va a desarrollar para determinarla, dadas las condiciones registradas del flujo de estudio se identifica que presenta niveles bajos, está situación

nos ubica en la posibilidad de utilizar 3 métodos de extrapolación para modelar la curva de gastos, estos tres métodos corresponden a: (i) Método de Running (ii) Método de Johnson y (iii) Método logarítmico, teniendo en cuenta los niveles de carga hidráulica (Tabla 6), se observa que dichos valores no presentan una relación aritmética ni geométrica, en consecuencia los métodos de Running y el método de Johnson no se pueden implementar ya que estos requieren que los datos se ajusten a relaciones aritméticas y geométricas, bajo este panorama el método de extrapolación que se ajusta a los datos que se tienen corresponde al método logarítmico, este método será utilizado a fin de construir la curva de gastos.

La construcción de esta, implicó desarrollar los siguientes pasos: curvas de caudal y carga hidráulica, seguidamente, se obtuvieron las constantes a y b , utilizando el método de los mínimos cuadrados para finalizar construyendo la curva de gasto que está establecida de la siguiente manera (IDEAM, 2007) .

$$Q = a H^b \quad (8)$$

Para determinar la carga hidráulica se requiere conocer la cota de lámina de agua que tiene el embalse (Jelloul, 2012), dicha cota se calculó utilizando el sensor Hydrostatic Level Trasmiter, que es un sensor de presión que pertenece al AMB ESP(Transmitter, s. f.). Cabe señalar que este sensor es utilizado como sistema de monitoreo del embalse. Ya conocido este valor de cota de lámina de agua se procede a restarlo de la cota del labio del vertedero (885.75 msnm), obteniendo así la carga hidráulica para cada instante de aforo, dichos valores se registran en la Tabla 6 (IDEAM, 2007) .

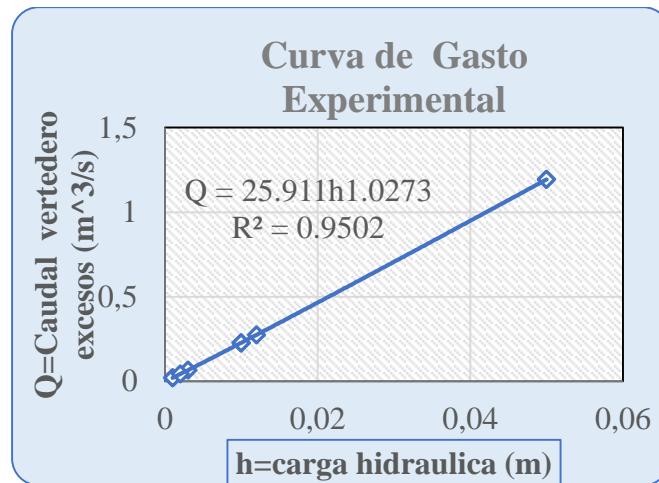
Tabla 6.

Pares de datos Carga Hidráulica y caudal de vertedero de excesos.

Fecha (dd-mm-a)	Carga de hidráulica (m)	Caudal del vertedero de exceso (l/s)
16-oct.-19	0.01	161.06
22-oct.-19	0.05	1339.55
31-oct.-19	0.01	185.37
6-nov.-19	0.012	176.41
14-nov.-19	0.05	1394.39
5-feb.-20	0.001	29.5
13-feb.-20	0	0
20-feb.-20	0	0
26-feb.-20	0.003	97.21
5-mar.-20	0.001	13.54
12-mar.-20	0.01	326.76
19-mar.-20	0.002	50.21

Utilizando los datos registrado en la Tabla 6 donde se relaciona la carga hidráulica contra el caudal del vertedero se obtiene la curva de gasto experimental.

Dicha grafica se construyó siguiente las instrucciones del protocolo para monitoreo y seguimiento del agua del IDEAM (**Figura 11**)

Figura 11*Curva de gasto Experimental*

Obtenida la curva de gasto experimental que se aprecia en la (**Figura 11**)

Jelloul, 2012), se comparó contra los valores del caudal de vertedero de excesos, contrastar la curva contra dichos datos permite determinar el porcentaje de error obteniendo como resultado la Tabla 7.

Tabla 7.

Porcentaje de error entre caudal del vertedero de excesos y curva de gasto experimental.

carga hidráulica (m)	Caudal del vertedero m ³ /s	caudal curva de Gasto experimental m ³ /s	% Error
0.001	0.014	0.021	58.51%
0.001	0.030	0.021	27.25%
0.002	0.050	0.044	12.88%
0.003	0.097	0.066	31.75%

carga hidráulica (m)	Caudal del vertedero m ³ /s	caudal curva de Gasto experimental m ³ /s	% Error
0.01	0.161	0.229	41.89%
0.012	0.176	0.276	56.23%
0.01	0.185	0.229	23.28%
0.01	0.327	0.229	30.06%
0.05	1.340	1.194	10.87%
0.05	1.394	1.194	14.38%

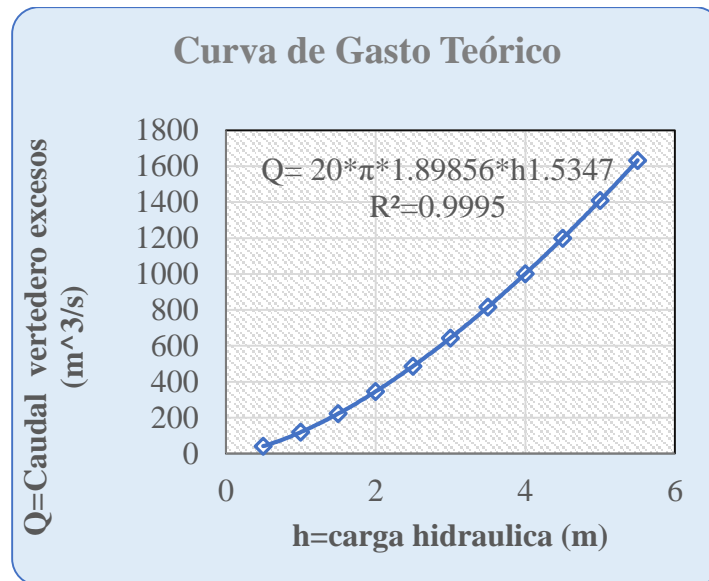
Para la el diseño y construcción del vertedero morning glory del embalse de Bucaramanga se realizó la curva de gasto apoyados con los datos de modelo a escala reducida (Tabla 8), datos que fueron sustraídos de la información de los nomogramas realizados por el Bureau of Reclamation del U.S. Departament of the Interior (Figura 12) (Almeyda, 2014).

Tabla 8.

Datos Suministrados del proyecto de simulación a escala reducida del embalse de bucarmanga

carga sobre la cresta (m)	Cresta			pozo	
	He/Re	C	Q(m ³ /s)	HE(m)	Q(m ³ /s)
0.5	0.05	3.39	40	23.4	
1	0.1	3.58	118	23.9	
1.5	0.15	3.71	225	24.3	
2	0.2	3.81	356	24.8	
2.5	0.25	3.85	502	25.2	
3	0.3	3.86	663	25.7	
3.5	0.35	3.84	831	26.1	
4	0.4	3.77	996	26.6	
4.5	0.45	3.72	1174	27	
5	0.5	3.72	1375	27.5	1476

5.5	0.55	3.72	1587	27.9	1488
5.8	0.58			28.2	1496

Figura 12.*Curva de gasto teórica*

Identificada la curva de gasto teórico de la Figura 12, información extraída de la simulación a escala reducida del embalse de Bucaramanga (Almeyda, 2014), seguidamente se procede a comparar los valores de caudal del vertedero de excesos contra los caudales de la curva teórica, para finalizar con el cálculo de error, Los calculados son registrados en la Tabla 9.

Tabla 9.*Porcentaje de error.*

Carga hidráulica (m)	Caudal del vertedero de exceso (m/s)	Caudal por curva de Gasto teórica (m/s)	% error
0.001	0.01354	0.003	78.08%
0.001	0.0295	0.003	89.94%
0.002	0.05021	0.009	82.87%
0.003	0.09721	0.016	83.52%
0.01	0.16106	0.102	36.88%
0.012	0.17641	0.134	23.76%
0.01	0.18537	0.102	45.15%
0.01	0.32676	0.102	68.89%
0.05	1.33955	1.202	10.27%
0.05	1.39439	1.202	13.80%

Finalmente se comparó la curva de gasto experimental contra la curva de gastos teórica, y se utilizaron cargas hidráulicas superiores a las obtenidas en las campañas con el fin de contrastar los valores obtenidos y determinar si convergen a valores similares o cercanos. Esta información se registra en la Tabla 10 (Jelloul, 2012).

Tabla 10.*Caudales de las curvas de gasto experimental y teórico*

carga hidráulica (m)	curva de gasto experimental Q(m³/s)	curva de gasto teórica Q(m³/s)
0.5	12.71	41.17
1	25.91	119.29
1.5	39.30	222.25
2	52.81	345.61
2.5	66.42	486.76
3	80.10	643.93
3.5	93.84	815.80
4	107.64	1001.34
4.5	121.48	1199.74
5	135.37	1410.30
5.5	149.29	1632.44

3.4 Elección de la tecnología a implementar en la estación de medición

El literal d (**Figura 2**)

de la metodología señala la elección de la tecnología a implementar en la estación de medición, esta selección obedece y considera las condiciones establecidas en el protocolo para el seguimiento y monitoreo de agua del IDEAM.

El requisito previo para seleccionar la tecnología fue establecer el punto de monitoreo, este punto se estableció considerando las condiciones señaladas en el protocolo sumado a las sugerencias establecidas por el AMB E.S.P, dentro de estas condiciones y sugerencias:

La estación de monitoreo debe garantizar que el equipo se encuentre resguardado tanto de crecientes súbitas de caudales, como de posibles situaciones de hurto.

El lugar donde se ubique el equipo debe garantizar flujos suaves situación exigida para un correcto funcionamiento del equipo.

La estación de monitoreo debe permitir maniobrabilidad, tanto de operación como de mantenimiento.

Considerando las condiciones descritas anteriormente se identifican dos posibles puntos donde establecer la estación de monitoreo, uno ubicado en inmediaciones del Río Tona y otro en la pila de aireación del vertedero (Figura 13). En cuanto a las posibilidades de instalación de la estación de monitoreo en lecho del río esta posibilidad se dificulta en vista de la facilidad de acceso que tiene el área para cualquier persona, por tanto, la presencia de extraños podría generar la manipulación de datos o peor aún, ocasionaría problemas de hurto o daños de equipos por manipulación indebida, de tal manera, que solo se puede sugerir como punto de medición la pila de aireación del vertedero ver (Figura 13), como lugar para establecer la estación de medición al contar con personal de seguridad que lo vigile y al ubicar su base en un estructura en concreto muy competente (IDEAM, 2007).

Figura 13.

Pila del vertedero de excesos



Determinado el sitio de instalación de la estación de monitoreo, se procede a identificar la tecnología que se puede llegar a implementar en el sitio (Jelloul, 2012). A continuación, se mencionan las tecnologías que se pueden implementar. (Limnógrafo digital, Sonda de Presión con o sin terminal de datos, Sensor por radar)

3.4.1 Limnógrafo

Esencialmente, consta de un flotador incorporado a un tubo, un pozo o a un sistema neumático, al cual se le acoplan los instrumentos registradores que pueden ser de tipo análogo o digital, un sistema automático que consta de un decodificador, un panel de sensores y una antena con alimentación de una batería, que es recargada a través de un panel solar (Muñoz & González, 2018).

3.4.2 Sonda de presión:

Para la medición de nivel de agua se efectúa mediante una célula capacitiva de cerámica, sin aceite, que mide la presión hidrostática de la columna de agua por medio de una membrana de presión que la transforma en señal eléctrica. Los valores medidos pueden ser leídos en una pantalla (display) o almacenados en un colector de datos incorporado en el cuerpo de la sonda (Jelloul, 2012).

3.4.3 Sensor por radar:

Es un mecanismo de radar por impulsos, el cual contiene una antena trasmisora que envía breves impulsos de radar a una determinada frecuencia, luego esta antena recibe los impulsos reflejados de la lámina de agua y calcula de ahí la distancia (Rls, s. f.).

3.5 Diseño de la estación de medición del caudal del Morning Glory

Identificado el lugar para instalar la estación de monitoreo y conociendo la tecnología sugerida que sea adecuada a las condiciones del punto de medición, se procede a establecer el diseño de la estación de medición, conforme a los equipos disponibles en el mercado y que ofrezcan mayor precisión.

Como primera opción se contempla la compra de un medidor de nivel de agua con el codificador angular accionado por flotador OTT SE 200 (Limnigrafo digital), esta tecnología que tiene un valor total de \$15,454,522 incluye suministro, transporte e instalación dentro de sus características técnicas, cuenta con un rango de medición de hasta 30 m, perfecto para el rango de márgenes de mediciones que manejaría al ubicar la estación en la cota (892 m.s.n.m.), el rango que medirá es la cota del labio del vertedero (885.75 m.s.n.m.) hasta la cota de diseño máximo (891.55 m.s.n.m.) un total 5.8 m de altura. La tecnología descrita maneja una precisión que va de (± 1 mm). Los planos de la ubicación y la descripción del lugar donde se implementaría se encuentran en el Anexo 7. En cuanto a la construcción y su costo el valor de los equipos y los materiales complementarios están descritos en el Anexo 8) (Registrador & Sdi-, s. f.).

Una segunda solución planteada sería la compra de un sensor de radar por impulsos de baja energía OTT RLS, tiene un precio total de \$25,905,060 incluye suministro transporte e instalación,

este dispositivo cuenta con un rango de medidas de 0.4 a 35 m por tanto es adecuado para las condiciones del embalse, tiene una precisión que varía de los 3 mm a 1 cm dependiendo de la distancia a la cual se encuentre la lámina de agua que este midiendo. El valor de los equipos y los materiales complementarios están descriptos en el (Rls, s. f.) Anexo 9 y los planos para la implementación de este sistema de radar están en el Anexo 10. Para tener la mayor precisión el sensor de radar se debe instalar a 2 metros por encima de la lámina máxima del vertedero (891.55 m.s.n.m.) para que su precisión sea 3 mm (Rls, s. f.).

Conocidas las dos opciones existentes para la estación de medición, y una vez cotejados los manuales técnicos de cada uno de los dispositivos, se verifican las características de precisión de cada una de las tecnologías sugeridas, esto en medida que es un ítem de importancia ya que garantizar valores con precisiones altas avala que los datos censados se ajusten a la realidad, bajo este parámetro se sugiere instalar el Limnógrafo digital, por su menor precio y manejar un rango mayor de precisión. Independiente de la opción que se tome, a la tecnología instalada se debe complementar con un equipo tipo RaspBerry dispositivo que se encarga de procesar datos, este dispositivo será encargado de recibir la cota de lámina de agua en el embalse y restarle el valor de la cota del labio del vertedero determinando así, la carga hidráulica, para luego reemplazar dicho valor en la ecuación de curva de gasto y obtener el valor de caudal en m^3/s , en seguida el dispositivo envía los datos al servidor para ser monitoreados y revisados(Wiley, 2014).

La estación de monitoreo tendrá suministro eléctrico a través de paneles solares conectados a baterías que garantizarán una autonomía de funcionamiento de al menos 2 días para todos los equipos instalados, dadas las condiciones de instalación se recomienda hacer jornadas de verificación de operación y mantenimiento del equipo al menos una vez al mes con el fin de garantizar confiabilidad de los equipos instalados. (Wiley, 2014).

4. Resultados y Discusiones

Se comparó la curva de gasto teórica con los datos de caudal del vertedero aplicando los índices de eficiencia (método de Nash-Sutcliffe y Raíz del error medio cuadrático (RMSE) con el propósito de conocer el ajuste de la ecuación o del modelo con los datos medidos en sitio. Para ello se utilizaron las siguientes ecuaciones. (Sierra Ramírez, 2016)

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Cobs, i - Cmod, i)^2}{\sum_{i=1}^n (Cobs, i - \bar{Cobs})^2} \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (Cmod, i - Cobs, i)^2} \quad (10)$$

Donde $Cobs_i$ son los caudales experimentales medida del parámetro i , $Cmod, i$ es caudal del parámetro i predicha o modelada y \bar{Cobs} es el promedio de las caudales del parámetro i observadas. NS Índice de Nash (Sierra Ramírez, 2016).

Al reemplazar los datos se obtuvo un $NS = 0.97$ (anexo 11) que representa un excelente valor para ajustar porque se encuentra entre valores de 0.8 y 1, como menciona el método (anexo 12) (Sierra Ramírez, 2016).

Para el método de RMSE se obtuvo un valor de 7.85%, dato inferior al 10% (anexo 13), lo que demuestra buena relación entre los datos vs la curva de gasto teórico (Sierra Ramírez, 2016).

Al reemplazar en la ecuación 8 los datos y comparar con la curva de gasto experimental, se obtuvo un $NS = 0.96$ (anexo 14), que representa un excelente ajuste según los parámetros del método (anexo 12).

Se aplicó también el método de RMSE y se obtuvo un error de 9.41% , el cual es inferior al 10% (anexo 15), el cual demuestra también una buena relación entre los datos vs curva de gasto experimental(Sierra Ramírez, 2016).

5. Conclusiones

Bajo los criterios establecidos en la tabla 2, se seleccionó la ubicación que generó mayor ponderación. La cual fue el punto puente Tona.

Como se puede evidenciar en la tabla 3 se muestran los caudales medidos en las campañas de aforo. Una vez realizados los mismos, se muestran en tonalidad azul los meses o las muestras en donde se dieron caudales con una probabilidad media o alta de lluvia, mientras que los que se están en tonalidad amarilla muestran un periodo de sequía o de bajas lluvias.

La construcción de la curva de gasto experimental encontrada bajo el método logarítmico con ajuste exponencial como se mostró en la **Figura 11**, presenta un modelo para los caudales que se generan cuando la lámina de agua tiene valores entre 0 y 5 cm, por encima de la cota del labio del vertedero para valores superiores el modelo no se ajusta adecuadamente.

Los métodos de eficiencia de Nash y (RMSE) demuestran que los datos se ajustan a los modelos encontrados de la curva de gasto teórica y experimental estando en los rangos establecidos por cada método.

Para valores de lámina superiores a 8 cm, la curva de gasto no muestra un buen ajuste esto se debe a que durante los meses que este proyecto se desarrolló no se presentaron lluvias de consideración, debido a ello se presenta ese desajuste.

6. Recomendaciones

Se recomienda se construya la estación de medición con la tecnología OTT SE 200 que varía entre sus características por su menor precio, mejor exactitud y cumple el funcionamiento para determinar la altura de lámina de agua, respecto a la OTT RLS.

En el diseño de la estación de medición se presenta el proceso constructivo e instalación de esta, cabe resaltar que para la programación de los equipos es necesario el apoyo interdisciplinario de otras ramas de ingeniería enfocadas en la configuración de equipos.

Se recomienda aumentar la cantidad de muestras de aforos, enfocados para caudales superiores $2 \text{ m}^3/\text{s}$. Teniendo como objetivo mejorar el ajuste de la curva de gasto para valores de lámina en el embalse superior a los 8 cm

Referencias Bibliográficas

Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. (2015). *Informe técnico del proyecto de regulación del río tona-embalse de Bucaramanga*. Recuperado de <http://www.amb.com.co:8081/wp-proyectos/2017/10/25/embalse/>

Aldana, L. A. (2002). Métodos De Estimación De Relaciones Nivel Caudal . Aplicación En Los Sistemas En Tiempo Real. *Jornadas sobre sistemas de ayuda a la decisión ante problemas hidráulicos e hidrológicos en tiempo real*, 1–14.

Almeyda, A. (2014). *Simulación a escala reducida del embalse de Bucaramanga*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

AMB. (2019). Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A E.S.P.

Fernandez Alzate, C. C. (2013). *Auxiliar de Ingeniera Civil durante el proces de pre-construcción del proyecto de regulación del rio Tona- embalse Bucaramanga*.

IDEAM. (2007). Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua: conocimiento hidrológico para el bienestar de la población. En *Bogotá DC: Acodal* (Vol. 214).

IDEAM. (2018). Características Climatológicas De Ciudades Principales Y Municipios Turísticos. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*, 48. <https://doi.org/http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/1Sitios+turisticos2.pdf/cd4106e9-d608-4c29-91cc-16bee9151ddd>

Jelloul, L. (2012). *Análisis y comparación de metodologías de aforo de caudal en lámina libre mediante curva de gasto y perfilador acústico doppler. Aplicación en ríos de la región de quebec (canadá)*.

Marbello Pérez, R. (2013). Manual De Prácticas De Laboratorio De Hidráulica Universidad Nacional De Colombia. *Manual de practicas de laboratorio de hidraulica*, 37. Recuperado de [http://bdigital.unal.edu.co/12697/68/3353962.2005.Parte 13.pdf](http://bdigital.unal.edu.co/12697/68/3353962.2005.Parte%2013.pdf)

Molina Tilano, D. P., & Parga Hernández, L. M. (2018). *Propuesta del ajuste de las curvas de gasto de la cuenca del río Chicamocha a una ecuación matemática. (Trabajo de grado).*

Muñoz, C. G. R., & González, E. J. F. (2018). Prototype early warning system using digital limnigraph. *2017 IEEE Central America and Panama Student Conference, CONESCAPAN 2017, 2018-Janua*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/CONESCAPAN.2017.8277601>

ORTEGA-GAUCIN, D. (2012). *Hidrometria Basica. Aplicada a la Operacion Distritos y Unidades de Riego.*

OTT Hydromet GmbH. *Instrucciones de Manejo Molinete Universal C31.*

Proyectos Estratégicos Regulación del Río Tona- Embalse de Bucaramanga. (s. f.). Recuperado 19 de abril de 2020, de <http://santandercompetitivo.org/proyectos-estrategicos/en-ejecucion/regulacion-del-rio-tona-embalse-de-bucaramanga/>

Registrador, F. S., & Sdi-, N. I. (s. f.). *Datos técnicos OTT SE 200 Datos técnicos OTT SE 200.* 1–2.

Rls, O. T. T. (s. f.). *Datos técnicos OTT RLS contacto físico directo el nivel de las aguas superficiales . Idóneo para Datos técnicos.*

Salas, P., & Manrique, A. (2017). Elaboración de un modelo para el analisis del balance hídrico a corto plazo del embalse de Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander.

Sierra Ramírez, C. A. (2016). *Modelos de calidad del agua en corrientes de agua superficiales notas sobre calibración, análisis de sensibilidad e incertidumbre.* 1–40.

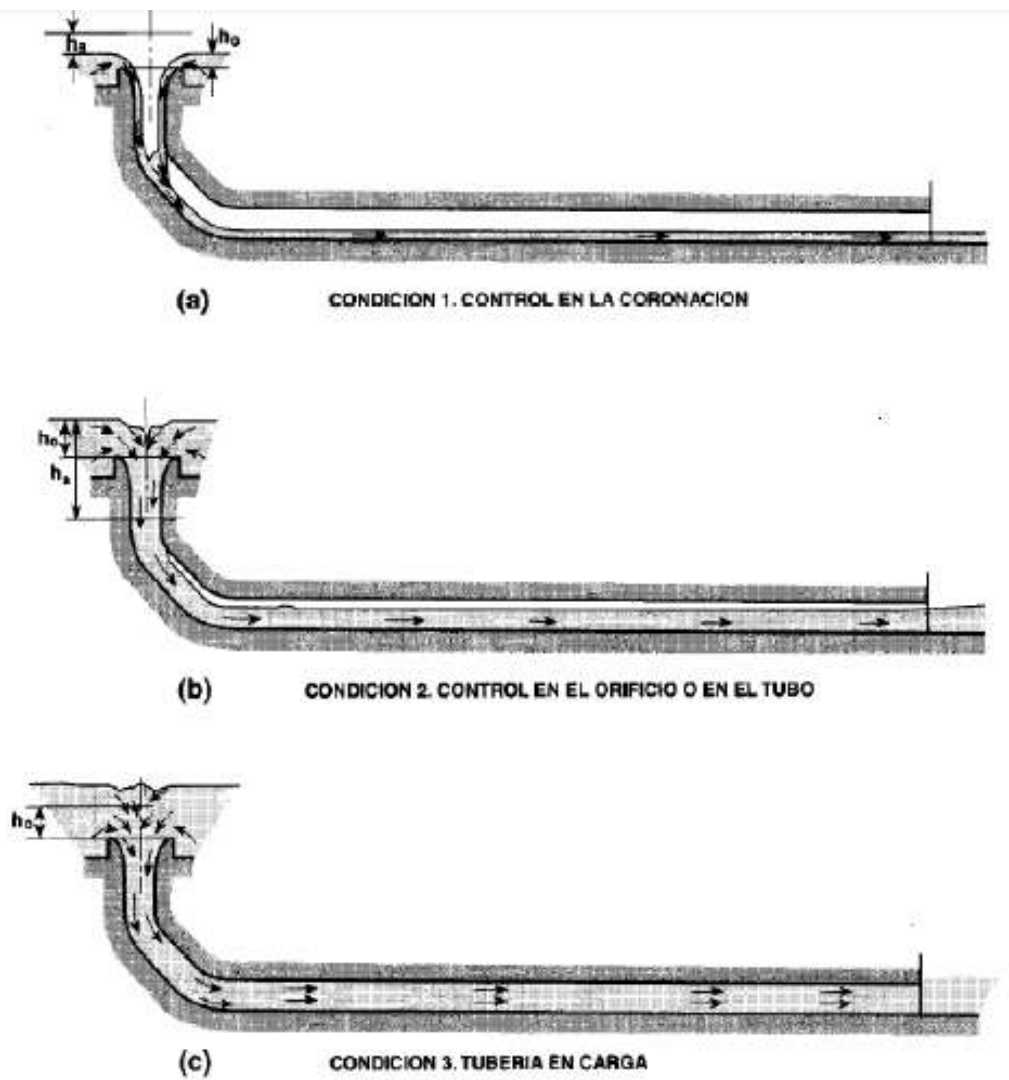
Transmitter, H. L. (s. f.). *User ' s Guide LH Series Hydrostatic Level Transmitter.*

Wiley, J. (2014). *Raspberry Pi User Guide (tercera).*

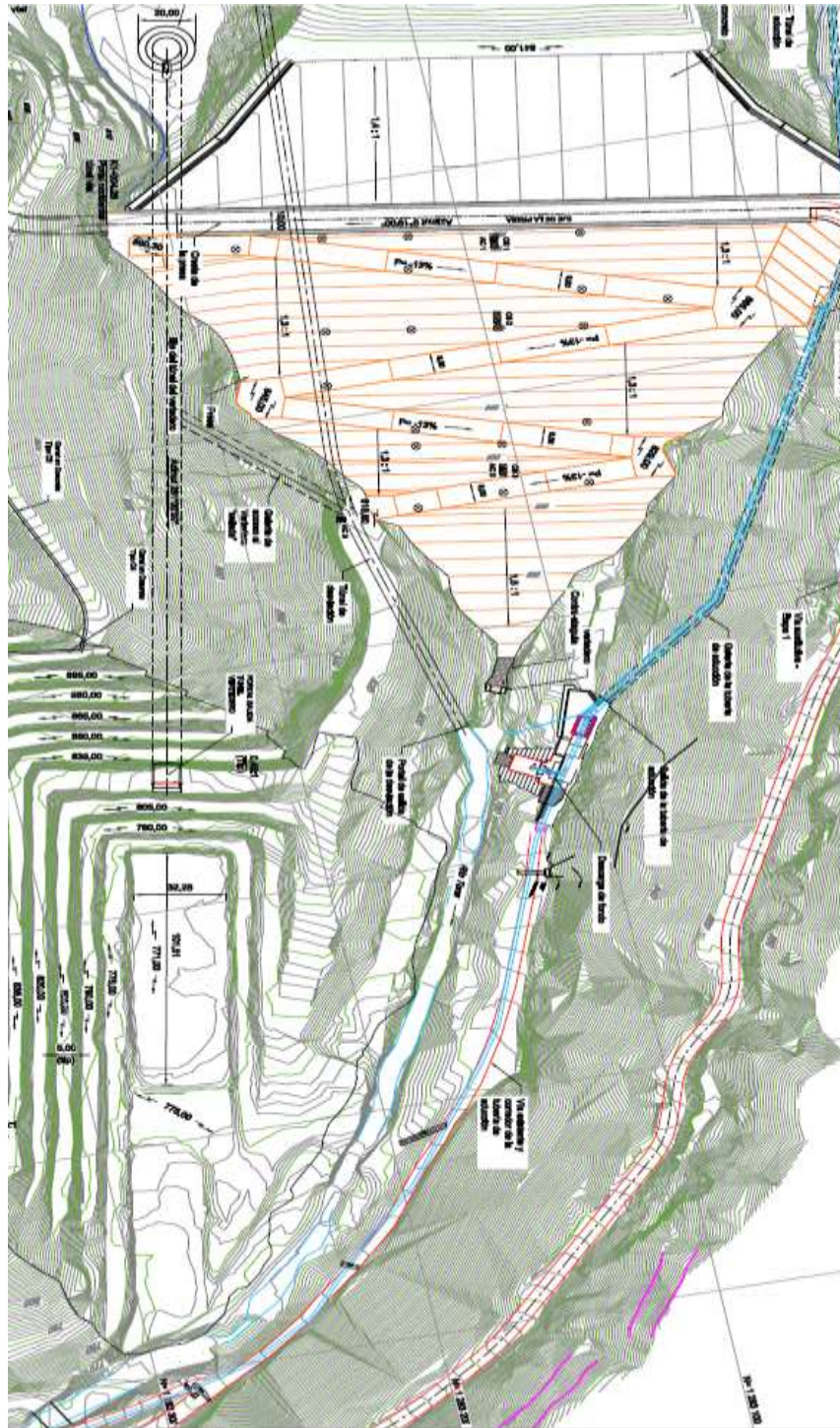
Wulf Klohn. (1969). *Nota Tecnica Sobre Procedimientos de aforo con molinete (Segunda).* Bogota, Colombia.

Apendices

Apéndice A Funcionamiento del vertedero tipo "MORNING GLORY"



Apéndice B Vista planta Proyecto de regulación del embalse de Bucaramanga



Apéndice C Pluviómetro embalse de Rio Tona lluvias 01/10/2019 hasta 31/03/2020

Fecha	mm	Fecha	mm	Fecha	mm
01/10/2019	1.27	01/11/2019	0.00	01/12/2019	0.00
02/10/2019	0.00	02/11/2019	0.00	02/12/2019	0.00
03/10/2019	0.00	03/11/2019	0.00	03/12/2019	0.00
04/10/2019	0.00	04/11/2019	0.00	04/12/2019	0.00
05/10/2019	0.00	05/11/2019	0.00	05/12/2019	0.00
06/10/2019	0.00	06/11/2019	0.00	06/12/2019	0.00
07/10/2019	0.00	07/11/2019	0.00	07/12/2019	0.00
08/10/2019	3.30	08/11/2019	0.00	08/12/2019	0.00
09/10/2019	13.72	09/11/2019	0.00	09/12/2019	0.00
10/10/2019	9.91	10/11/2019	0.00	10/12/2019	0.00
11/10/2019	0.00	11/11/2019	0.00	11/12/2019	0.00
12/10/2019	0.00	12/11/2019	0.00	12/12/2019	0.00
13/10/2019	0.00	13/11/2019	0.00	13/12/2019	0.51
14/10/2019	0.00	14/11/2019	0.00	14/12/2019	0.00
15/10/2019	0.00	15/11/2019	0.00	15/12/2019	13.46
16/10/2019	0.00	16/11/2019	0.00	16/12/2019	0.00
17/10/2019	0.00	17/11/2019	0.00	17/12/2019	0.51
18/10/2019	6.35	18/11/2019	0.00	18/12/2019	0.00
19/10/2019	10.92	19/11/2019	0.00	19/12/2019	0.00
20/10/2019	2.79	20/11/2019	0.00	20/12/2019	0.00
21/10/2019	1.02	21/11/2019	0.00	21/12/2019	1.02
22/10/2019	7.11	22/11/2019	0.00	22/12/2019	0.00
23/10/2019	0.76	23/11/2019	0.00	23/12/2019	0.00
24/10/2019	0.00	24/11/2019	0.00	24/12/2019	0.00
25/10/2019	0.00	25/11/2019	0.00	25/12/2019	8.89
26/10/2019	0.00	26/11/2019	0.00	26/12/2019	2.29
27/10/2019	0.00	27/11/2019	0.00	27/12/2019	0.76

Fecha	mm	Fecha	mm	Fecha	mm
28/10/2019	0.00	28/11/2019	0.00	28/12/2019	0.00
29/10/2019	0.00	29/11/2019	0.00	29/12/2019	0.00
30/10/2019	0.00	30/11/2019	0.00	30/12/2019	0.00
31/10/2019	0.00			31/12/2019	8.89

Fecha	mm	Fecha	mm	Fecha	mm
01/01/2020	0.00	01/02/2020	0.00	01/03/2020	4.57
02/01/2020	0.00	02/02/2020	0.00	02/03/2020	6.35
03/01/2020	0.00	03/02/2020	0.00	03/03/2020	0.00
04/01/2020	0.00	04/02/2020	0.00	04/03/2020	0.00
05/01/2020	0.00	05/02/2020	0.00	05/03/2020	0.00
06/01/2020	0.00	06/02/2020	0.00	06/03/2020	0.00
07/01/2020	0.00	07/02/2020	0.00	07/03/2020	0.00
08/01/2020	0.00	08/02/2020	0.00	08/03/2020	9.40
09/01/2020	0.00	09/02/2020	0.00	09/03/2020	0.00
10/01/2020	0.00	10/02/2020	0.00	10/03/2020	0.00
11/01/2020	0.00	11/02/2020	0.00	11/03/2020	0.25
12/01/2020	0.00	12/02/2020	0.00	12/03/2020	33.02
13/01/2020	0.00	13/02/2020	0.00	13/03/2020	17.02
14/01/2020	0.00	14/02/2020	0.00	14/03/2020	12.70
15/01/2020	0.00	15/02/2020	0.25	15/03/2020	2.29
16/01/2020	0.00	16/02/2020	10.41	16/03/2020	4.57
17/01/2020	0.00	17/02/2020	0.00	17/03/2020	0.00
18/01/2020	0.00	18/02/2020	0.00	18/03/2020	0.00
19/01/2020	0.00	19/02/2020	0.00	19/03/2020	0.00
20/01/2020	0.00	20/02/2020	0.00	20/03/2020	0.00
21/01/2020	0.00	21/02/2020	13.72	21/03/2020	0.00
22/01/2020	1.02	22/02/2020	14.99	22/03/2020	0.00
23/01/2020	0.00	23/02/2020	0.25	23/03/2020	0.00

Fecha	mm	Fecha	mm	Fecha	mm
24/01/2020	0.00	24/02/2020	3.30	24/03/2020	0.00
25/01/2020	0.00	25/02/2020	3.56	25/03/2020	0.00
26/01/2020	0.00	26/02/2020	0.25	26/03/2020	5.59
27/01/2020	38.61	27/02/2020	0.00	27/03/2020	0.00
28/01/2020	13.97	28/02/2020	0.00	28/03/2020	0.00
29/01/2020	0.00	29/02/2020	0.00	29/03/2020	0.25
30/01/2020	0.76			30/03/2020	4.57
31/01/2020	1.02			31/03/2020	0.00

Apéndice E Instructivo del protocolo del monitoreo y seguimiento del agua para cálculo de aforos

Instructivo del protocolo del monitoreo y seguimiento del agua para cálculo de aforos.

Primera (1) columna donde registraremos el Punto de referencia (R.) se mide en metros.

Columna (2) dos profundidades totales (P.T.) estas distancias se miden en metros para cada una de las verticales, para la profundidad total es la medida de la distancia entre la lámina de agua y el fondo de la corriente de agua.

Columna (3) Profundidad de aforo (P.A.) esta distancia corresponde a la lámina de agua y la distancia de colocación del molinete.

columna (4) número de revoluciones (N), que registrara la cantidad de revoluciones que el contador genera en cada punto donde se haga la medición.

Columna (5) tiempo de aforo (T) es el tiempo para la medición en cada punto que para nuestra campaña se tomaron tiempos de 50 segundos.

Cálculo de datos

Para el cálculo de datos, iniciamos en la columna (6) Revoluciones sobre tiempo que es (N/T) ,

Columna (7) Velocidad puntual (VP) es necesario de la formula $VP = a + b * (N/T)$ donde a y b son factores de calibración según el tipo de molinete y especificaciones del fabricante.

Columna (8) de Velocidad media en la vertical (VMV) es el valor promedio de tomas que se hizo para la vertical.

Columna (9) media en la sección (VM) se anotará: según sea el caso cuando se trate de velocidad media en la vertical próxima a una orilla será $VM = (2/3) * (VMV)$ Y el promedio de las velocidades medidas en los en los verticales sucesivos.

Columna (10) ancho de la sección parcial (Pm) Es el promedio de las los dos PT que se delimitan a la sección parcial

Columna (11) Ancho de la selección parcial (AP) es la resta de la distancia contiguas desde el punto de referencia (P.R.), oportuno a las dos secciones contiguas.

Columna (12) de área de la sección parcial (SP) se anota el producto del ancho de la selección Parcial (A*P) por el ancho de la sección parcial (Pm)

Finalmente, Columna (13) caudal parcial es la multiplicación de la velocidad media en la sección parcial por área parcial correspondiente


Para el total del caudal es la sumatoria de todos los caudales parciales. (Wulf Klohn, 1969)

Apéndice F calculo tipo de aforo hidráulico 31/10/2019


Se parte desde el formato de aforo de caudales implementado por el AMB.

Pagina 1 de 1		FORMATO DE AFORO DE CAUDALES									
F RHD 701-004											
Rev.: 0											
PROYECTO RECURSOS HIDRICOS											
RIO:	TONA				FECHA:	31/10/2019					
ESTACION:	PTE TONA				HORA INICIAL:	8:50	FINAL:	9:50			
VELOCIDAD:	m/s	ANCHO:	m		NIVEL INICIAL:		FINAL:	MEDIO:			
AREA SECCION:	m2	CAUDAL:	m3/seg								
DISTANCIA	PROFUNDIDADES		REVOLUCIONES			VELOCIDADES			SECCION		CAUDAL PARCIAL
DESDE LA ORILLA (R)	PT	PA	N	T	N/T	VP	VMY	VM	PM	AP	
m	m		No	s	Rev/s	m/s			m		m2
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)


El registro de datos inicia identificando los valores a calcular especificados en el formato: Profundidad total (pt), profundidad de aforo (pa), numero de revoluciones (N) y tiempo de aforo(T). La toma de datos se realiza desde el borde del Río recorriendo el ancho del mismo.

Pagina 1 de 1		FORMATO DE AFORO DE CAUDALES									
F RHD 701-004											
Rev.: 0											
PROYECTO RECURSOS HIDRICOS											
RIO:	TONA				FECHA:	31/10/2019					
ESTACION:	PTE TONA				HORA INICIAL:	8:50	FINAL:	9:50			
VELOCIDAD:	m/s	ANCHO:	m		NIVEL INICIAL:		FINAL:	MEDIO:			
AREA SECCION:	m2	CAUDAL:	m3/seg								
DISTANCIA	PROFUNDIDADES		REVOLUCIONES			VELOCIDADES			SECCION		CAUDAL PARCIAL
DESDE LA ORILLA (R)	PT	PA	N	T	N/T	VP	VMV	VM	PM	AP	
m	m		No	s	Rev/s	m/s			m		m2
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
0.00	0.120	0.000	0.00	50.00							

Cada 40 cm a lo ancho del río se debe ir registrando una medición para cada uno de los valores descritos en el formato.

Pagina 1 de 1		FORMATO DE AFORO DE CAUDALES										
F RHD 701-004												
Rev.: 0												
PROYECTO RECURSOS HIDRICOS												
RIO: _____ TONA _____ ESTACION: _____ PTE TONA _____ VELOCIDAD: _____ m/s ANCHO: _____ m AREA SECCION: _____ m2 CAUDAL: _____ m3/seg FECHA: _____ 31/10/2019 HORA INICIAL: _____ 8:50 FINAL: _____ 9:50 NIVEL INICIAL: _____ FINAL: _____ MEDIO: _____												
DISTANCIA	PROFUNDIDADES		REVOLUCIONES			VELOCIDADES			SECCION			CAUDAL PARCIAL
DESDE LA ORILLA (R)	PT	PA	N	T	N/T	VP	VMV	VM	PM	AP	SP	
m	m		No	s	Rev/s	m/s			m			m2
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
0.00	0.120	0.000	0.00	50.00								
0.40	0.110	0.040	2.00	50.00								

Se cubre el ancho del río midiendo los 5 parámetros haciendo mediciones cada 40 cm

Pagina 1 de 1		FORMATO DE AFORO DE CAUDALES										
F RHD 701-004												
Rev.: 0												
PROYECTO RECURSOS HIDRICOS												
RIO:		TONA			FECHA:		31/10/2019					
ESTACION:		PTE TONA			HORA INICIAL:		8:50		FINAL:		3:50	
VELOCIDAD:		m/s		ANCHO:		m		NIVEL INICIAL:		MEDIO:		
AREA SECCION:		m2		CAUDAL:		m3/seg						
DISTANCIA DESDE LA ORILLA (R	PT	PA	N	T	N/T	YP	YMY	YM	PM	AP	SP	CAUDAL PARCIAL
m	m	m	No	s	Revs	m/s			m2			m3/s
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
0.00	0.120	0.000	0.00	50.00								
0.40	0.110	0.040	2.00	50.00								
0.80	0.340	0.140	4.00	50.00								
1.20	0.260	0.110	10.00	50.00								
1.60	0.250	0.100	25.00	50.00								
2.00	0.500	0.100	5.00	50.00								
		0.400	34.00	50.00								
2.40	0.500	0.100	25.00	50.00								
		0.400	52.00	50.00								
2.80	0.480	0.100	13.00	50.00								
		0.380	61.00									
3.20	0.500	0.100	3.00	50.00								
		0.400	54.00	50.00								
3.60	0.470	0.090	24.00	50.00								
		0.380	43.00	50.00								
4.00	0.520	0.100	19.00	50.00								
		0.420	38.00	50.00								
4.40	0.520	0.100	10.00	50.00								
		0.420	23.00	50.00								
4.80	0.480	0.100	10.00	50.00								
		0.380	13.00	50.00								
5.20	0.450	0.180	8.00	50.00								
5.60	0.420	0.170	7.00	50.00								
6.00	0.400	0.160	1.00	50.00								
6.40	0.320	0.130	3.00	50.00								
6.80	0.180	0.000	0.00	50.00								

Página 1

Partiendo de los datos extraídos en campo se realiza el análisis en cada sección para obtener los valores correspondientes de las velocidades, en el caso de V_p su cálculo se realiza utilizando la fórmula del molinete y la relación (N/t) , teniendo en cuenta los datos de la sección 1 de análisis, la cantidad de datos que se realicen para cada sección, depende del número de mediciones realizadas en campo, este número de mediciones depende del tirante hidráulico, si la medición de este supera los 0.45 cm de profundidad, se deben realizar más mediciones en la sección de análisis, situación que ocasiona otro nuevo cálculo para (N/t) y V_p . El cálculo del V_{mv} se obtiene considerando el promedio de V_p (columna 7) del punto de cálculo. Para calcular V_m depende del punto de cálculo de los datos de la sección parcial, en los extremos de la sección transversal del Río se calcula como un tercio del V_{mv} y en los tramos intermedios se calcula como el promedio de los V_{mv} de los puntos que conforman cada sección.

Sección 1 comprende desde 0.0 m desde la orilla hasta 0.4 m de la sección transversal del Río.

Cálculo de relación N/T , V_p , V_{mv} del punto 1 (0.0 m de la orilla) de la sección

$$\frac{N}{T} = \frac{0}{50} = 0 \text{ Rev/s}$$

$$V_p = 0 \text{ m/s}$$

$$V_{mv} = 0 \text{ m/s}$$

Cálculo de relación N/T , V_p , V_{mv} del punto 2 (0.4 m de la orilla) de la sección

$$\frac{N}{T} = \frac{2}{50} = 0.04 \text{ Rev/s}$$

$$V_p = 0.258 * 0.04 + 0.015 = 0.025 \text{ m/s}$$

$$V_{mv} = 0.025 \text{ m/s}$$

Cálculo de Vm sección 1:

$$Vm = \frac{1}{3} * 0.025 = 0.008 \text{ m/s}$$

Pm se obtiene calculando el promedio del tirante hidráulico de los puntos extremos de la sección parcial 1. Cálculo de Pm sección 1:

$$Pm = \frac{0.12 + 0.11}{2} = 0.115m$$

AP (ancho parcial) se obtiene restando la distancia de los puntos de la sección parcial medidos desde la orilla del río. Cálculo del AP sección 1:

$$AP = 0.40 - 0.00 = 0.40 \text{ m}$$

SP (Sección Parcial) se obtiene de realizar la multiplicación AP*PM.

$$SP = \left(\frac{0.12 - 0.11}{2} \right) * 0.40 = 0.046m^2$$

Caudal parcial 1 se obtiene luego de multiplicar VM*SP

$$caudal \text{ parcial } 1 = 0.046 * 0.008 = 3 * 68 * 10^{-4} \text{ m}^3/s \approx 0.000$$

DISTANCIA DESDE LA ORILLA (R)	PROFUNDIDADES		REVOLUCIONES			VELOCIDADES			SECCION			CAUDAL PARCIAL
	PT	PA	N	T	N/T	VP	VMV	VM	PM	AP	SP	
m	m		No	s	Rev/s	m/s			m		m2	m3/s
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
0.00	0.120	0.000	0.00	50.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.115	0.400	0.046	0.000
0.40	0.110	0.040	2.00	50.00	0.040	0.025	0.025	0.008	0.115	0.400	0.046	0.000

Sección 2 comprende desde 0.4 m desde la orilla hasta 0.8 m de la sección transversal del río.

Vp, Vmv para el punto 0.4 m ya está calculado, se calcula para el punto 0.8m

Cálculo de relación N/T, Vp, Vmv del punto 3 (0.8 m de la orilla) de la sección

$$\frac{N}{T} = \frac{4}{50} = 0.08 \text{ Rev/s}$$

$$Vp = 0.258 * 0.08 + 0.015 = 0.036 \text{ m/s}$$

$$Vmv = 0.036 \text{ m/s}$$

Cálculo de Vm, Pm, Ap y Sp sección 2:

$$Vm = \frac{0.025 + 0.036}{2} = 0.030 \text{ m/s}$$

$$Pm = \frac{0.11 + 0.34}{2} = 0.225 \text{ m}$$

$$AP = 0.80 - 0.40 = 0.40 \text{ m}$$

$$SP = \left(\frac{0.34 + 0.11}{2} \right) * 0.40 = 0.09 \text{ m}^2$$

Caudal parcial 2 se obtiene luego de multiplicar VM*SP

$$\text{caudal parcial 2} = 0.09 * 0.030 = 0.0027 \text{ m}^3/\text{s}$$

DISTANCIA DESDE LA ORILLA (R)	PROFUNDIDADES		REVOLUCIONES			VELOCIDADES			SECCION			CAUDAL PARCIAL
	PT	PA	N	T	N/T	VP	VMV	VM	PM	AP	SP	
m	m		No	s	Rev/s	m/s			m			m2
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
0.00	0.120	0.000	0.00	50.00	0.000	0.000	0.000					
0.40	0.110	0.040	2.00	50.00	0.040	0.025	0.025	0.008	0.115	0.400	0.046	0.000
0.80	0.340	0.140	4.00	50.00	0.080	0.036	0.036	0.030	0.225	0.400	0.090	0.0027

De esta forma se continúan realizando este procedimiento hasta determinar todos los caudales parciales.

DISTANCIA DESDE LA ORILLA (R)	PROFUNDIDADES		REVOLUCIONES			VELOCIDADES			SECCION			CAUDAL PARCIAL	
	PT	PA	N	T	N/T	VP	VMV	VM	PM	AP	SP		
m	m		No	s	Rev/s	m/s			m		m2	m3/s	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	
0.00	0.120	0.000	0.00	50.00	0.000	0.000	0.000		0.008	0.115	0.400	0.046	0.000
0.40	0.110	0.040	2.00	50.00	0.040	0.025	0.025		0.030	0.225	0.400	0.090	0.0027
0.80	0.340	0.140	4.00	50.00	0.080	0.036	0.036		0.051	0.310	0.400	0.124	0.006
1.20	0.280	0.110	10.00	50.00	0.200	0.067	0.067		0.105	0.265	0.400	0.106	0.011
1.60	0.250	0.100	25.00	50.00	0.500	0.144	0.144		0.207	0.375	0.400	0.150	0.031
2.00	0.500	0.100	5.00	50.00	0.100	0.041	0.270						
		0.400	94.00	50.00	1.880	0.500			0.242	0.500	0.400	0.200	0.048
2.40	0.500	0.100	25.00	50.00	0.500	0.144	0.214						
		0.400	52.00	50.00	1.040	0.283			0.163	0.490	0.400	0.196	0.032
2.80	0.480	0.100	19.00	50.00	0.380	0.113	0.113						
		0.380	61.00						0.145	0.490	0.400	0.196	0.028
3.20	0.500	0.100	9.00	50.00	0.180	0.061	0.178						
		0.400	54.00	50.00	1.080	0.294			0.190	0.485	0.400	0.194	0.037
3.60	0.470	0.090	24.00	50.00	0.480	0.139	0.203						
		0.380	49.00	50.00	0.980	0.268			0.183	0.495	0.400	0.198	0.036
4.00	0.520	0.100	19.00	50.00	0.380	0.113	0.162						
		0.420	38.00	50.00	0.760	0.211							
									0.131	0.520	0.400	0.208	0.027
4.40	0.520	0.100	10.00	50.00	0.200	0.067	0.100						
		0.420	23.00	50.00	0.460	0.134							
									0.095	0.500	0.400	0.200	0.019
4.80	0.480	0.100	10.00	50.00	0.200	0.067	0.090						
		0.380	19.00	50.00	0.380	0.113							
									0.073	0.465	0.400	0.186	0.014
5.20	0.450	0.180	8.00	50.00	0.160	0.056	0.056						
									0.054	0.435	0.400	0.174	0.009
5.60	0.420	0.170	7.00	50.00	0.140	0.051	0.051						
									0.036	0.410	0.400	0.164	0.006
6.00	0.400	0.160	1.00	50.00	0.020	0.020	0.020						
									0.025	0.360	0.400	0.144	0.004
6.40	0.320	0.130	3.00	50.00	0.060	0.030	0.030						
									0.010	0.250	0.400	0.100	0.001
6.80	0.180	0.000	0.00	50.00	0.000	0.015	0.015						

Ahora al tener los anchos parciales, secciones parciales, caudales parciales, se procede a sumarlos en cada columna y determinar: Ancho total, Área de la sección total y caudal total

Ancho total (AP)

$$= 0.4 + 0.4 + 0.4 + 0.4 + 0.4 + 0.4 + 0.4 + 0.4 + 0.4 + 0.4 + 0.4 + 0.4 + 0.4 + 0.4 + 0.4 + 0.4 + 0.4 + 0.4 = 6.8 \text{ m}$$

Area de la sección total


$$= 0.046 + 0.09 + 0.124 + 0.106 + 0.150 + 0.2 + 0.196 + 0.196 + 0.194 + 0.198 + 0.208 + 0.2 + 0.186 + 0.174 + 0.164 + 0.144 + 0.1 = 2.676 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} \text{caudal total} &= 0.0003 + 0.0027 + 0.006 + 0.011 + 0.031 + 0.048 + 0.032 + 0.028 \\ &+ 0.037 + 0.036 + 0.027 + 0.019 + 0.014 + 0.009 + 0.006 + 0.004 + 0.001 \\ &= 0.313 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

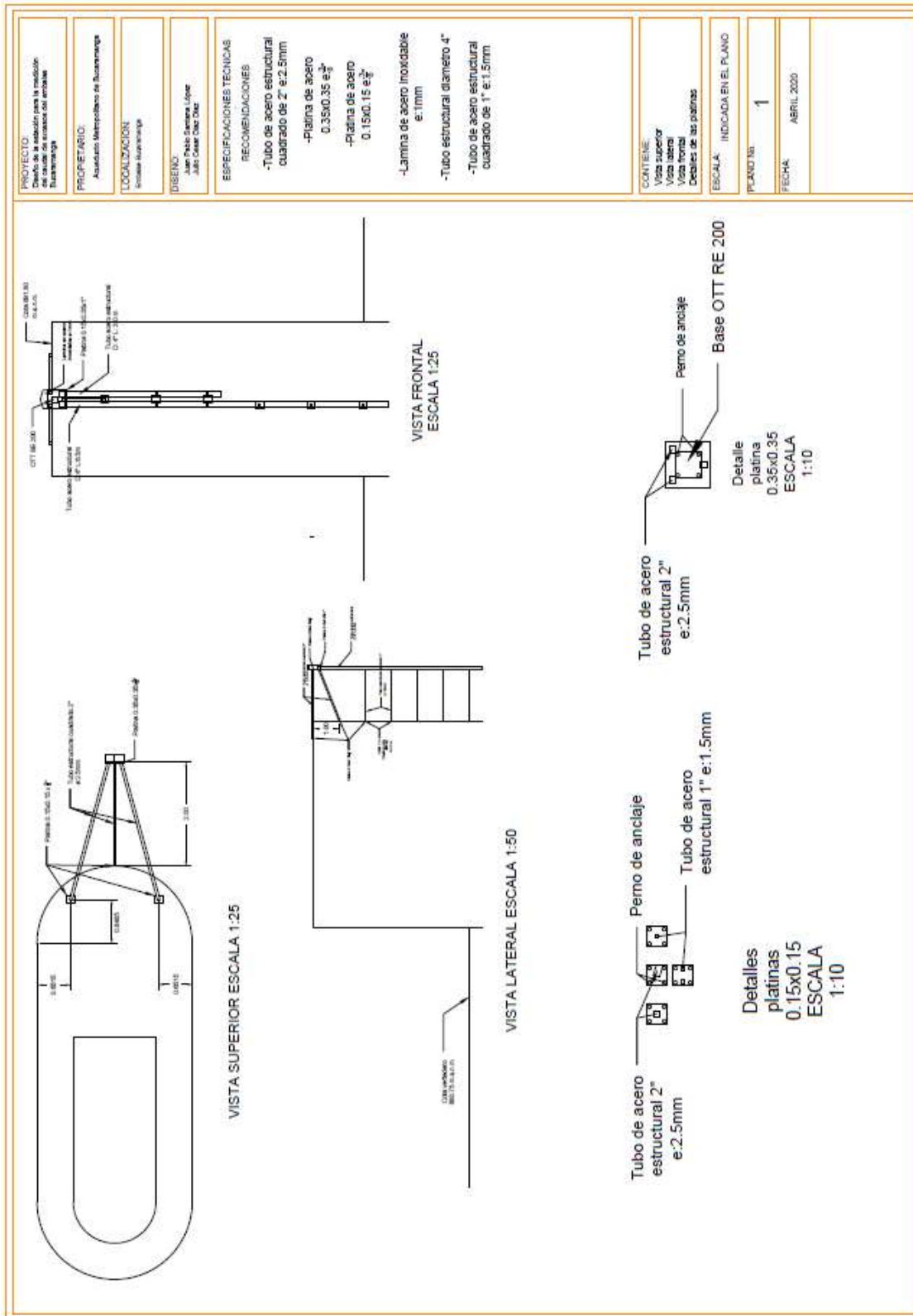
Y se determina la velocidad de aforo que es el caudal sobre área de la sección total

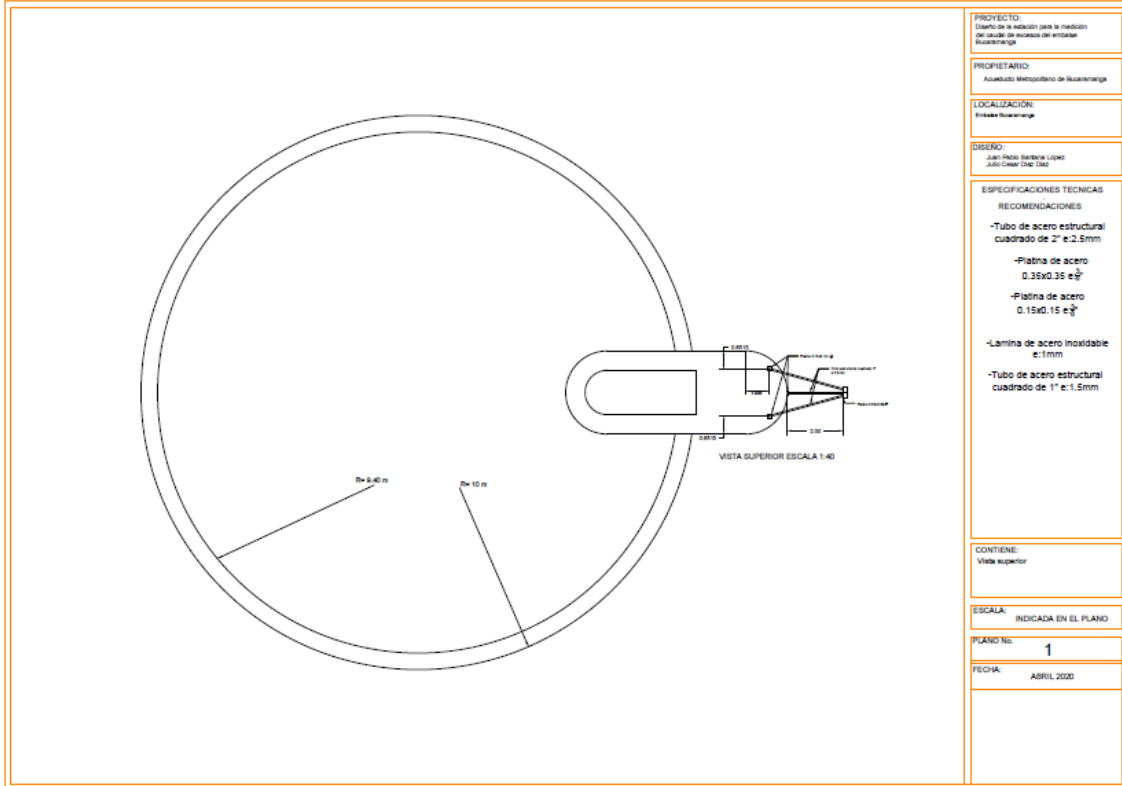
$$\text{Velocidad aforo} = \frac{0.313}{2.676} = 0.12 \text{ m/s}$$

Al haber determinado los valores totales, se tiene esta tabla con todos los resultados consignados.

Pagina 1 de 1			FORMATO DE AFORO DE CAUDALES													
F RHD 701-004																
Rev.: 0																
PROYECTO RECURSOS HIDRICOS																
RIO:			TONA			FECHA:			31/10/2019							
ESTACION:			PTE TONA			HORA INICIAL:			8:50 FINAL: 9:50							
VELOCIDAD:			0.12 m/s			ANCHO:			6.80 m							
AREA SECCION:			2.676 m2			CAUDAL:			0.313 m3/seg							
NIVEL INICIAL:						NIVEL FINAL:			MEDIO:							
DISTANCIA DESDE LA ORILLA (R	PROFUNDIDADES		REVOLUCIONES			VELOCIDADES			SECCION			CAUDAL PARCIAL				
m	PT	PA	N	T	N/T	VP	VMY	VM	PM	AP	SP	m3/s				
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)				
0.00	0.120	0.000	0.00	50.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008	0.115	0.400	0.046	0.000			
0.40	0.110	0.040	2.00	50.00	0.040	0.025	0.025	0.030	0.225	0.400	0.030	0.0027				
0.80	0.340	0.140	4.00	50.00	0.080	0.036	0.036	0.051	0.310	0.400	0.124	0.006				
1.20	0.280	0.110	10.00	50.00	0.200	0.067	0.067	0.105	0.265	0.400	0.106	0.011				
1.60	0.250	0.100	25.00	50.00	0.500	0.144	0.144	0.207	0.375	0.400	0.150	0.031				
2.00	0.500	0.100	5.00	50.00	0.100	0.041	0.270	0.242	0.500	0.400	0.200	0.048				
2.40	0.500	0.100	25.00	50.00	0.500	0.144	0.214	0.163	0.430	0.400	0.136	0.032				
2.80	0.480	0.100	19.00	50.00	0.380	0.113	0.113	0.145	0.430	0.400	0.136	0.028				
3.20	0.500	0.100	9.00	50.00	0.180	0.061	0.178	0.130	0.485	0.400	0.134	0.037				
3.60	0.470	0.030	24.00	50.00	0.480	0.133	0.203	0.183	0.435	0.400	0.138	0.036				
4.00	0.520	0.100	19.00	50.00	0.380	0.113	0.162	0.131	0.520	0.400	0.208	0.027				
4.40	0.520	0.100	10.00	50.00	0.200	0.067	0.100	0.095	0.500	0.400	0.200	0.019				
4.80	0.480	0.100	10.00	50.00	0.200	0.067	0.090	0.073	0.465	0.400	0.186	0.014				
5.20	0.450	0.180	8.00	50.00	0.160	0.056	0.056	0.054	0.435	0.400	0.174	0.009				
5.60	0.420	0.170	7.00	50.00	0.140	0.051	0.051	0.036	0.410	0.400	0.164	0.006				
6.00	0.400	0.160	1.00	50.00	0.020	0.020	0.020	0.025	0.360	0.400	0.144	0.004				
6.40	0.320	0.130	3.00	50.00	0.060	0.030	0.030	0.010	0.250	0.400	0.100	0.001				
6.80	0.180	0.000	0.00	50.00	0.000	0.015	0.015									
OBSERVACIONES:									TOTAL				6.800	2.676	0.313	
OPERADORES: AD													V =		0.12	m/s
CALCULADO: Ing. CAAB																
REVISADO POR: Ing. CAAB																
R - Punto de aforo						VM - Velocidad media						CONTROL SGC				
P T - Profundidad total						PM - Profundidad media						2007-03-03				
PA - Profundidad del aforo						AP - Ancho parcial										
N - Numero de revoluciones						SP - Seccion parcial										

Apéndice G Planos para el diseño de la estación OTT SE 200

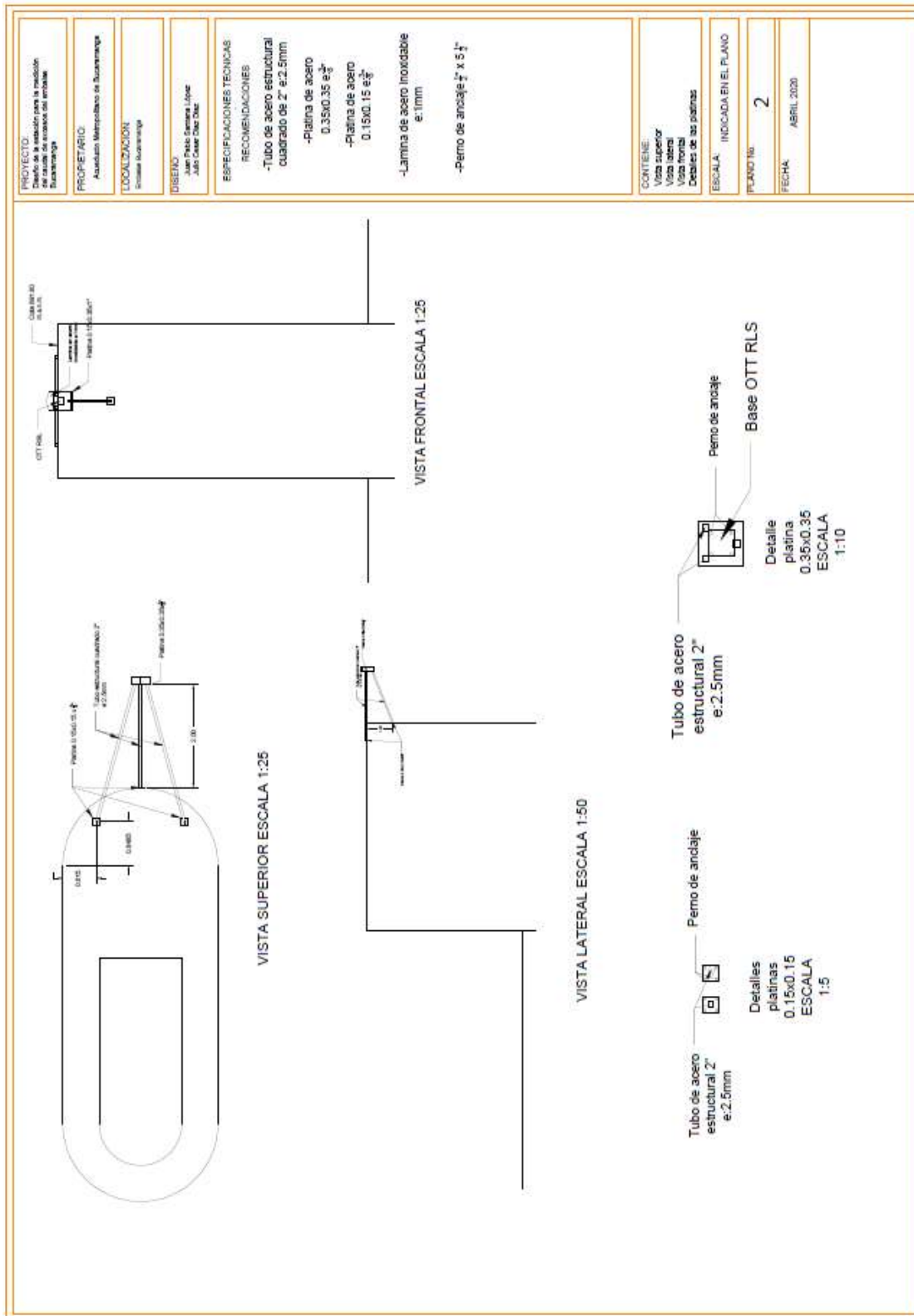




Apéndice H presupuesto preliminar del diseño OTT SE 200

PRESUPUESTO PRELIMINAR DEL DISEÑO OTT SE 200				
Descripción	Unidad	Consumo	Unitario	Precio
PLATINA 3/8"	M2	0.31	\$4,753	\$ 1,473
TUBO ESTRUCTURAL 2" e:2.5mm	M	7.6428	\$2,574	\$ 19,675
TUBO ESTRUCTURAL 1" e:1.5mm	M	22	\$1,023	\$ 22,502
PLATINA 1"	M2	0.0525	\$30,509	\$ 1,602
TUBO ACEROESTRUCTURAL D:4"	M	9.5	\$5,652	\$ 53,691
LAMINA ACERO INOXIDABLE e:1mm	M2	0.5	\$2,500	\$ 1,250
SOLDADURA	GLOBAL	1		\$ 1,000,000
			\$1,000,000	
PERNOS DE ANCLAJE	UNIDAD	38	\$10,200	\$ 387,600
BATERIAS + PANEL SOLAR KIT	UNIDAD	1	\$850,300	\$ 850,300
RASPBERRY	UNIDAD	1	\$550,000	\$ 550,000
OTT SE 200	UND	1	\$5,000,000	\$ 5,000,000
INSTALACIÓN	Y GLOBAL	1	\$4,000,000	\$ 4,000,000
PROGRAMACIÓN				
TOTAL COSTO DIRECTO				\$ 11,888,093
A.I.U (30%)				\$ 3,566,428
TOTAL				\$ 15,454,522

Apéndice I Planos para el diseño de la estación OTT RLS



Apéndice J presupuesto preliminar del diseño OTT RSL

PRESUPUESTO PRELIMINAR DEL DISEÑO OTT RSL				
Descripción	Unidad	Consumo	Unitario	Precio
PLATINA 3/8"	M2	0.31	\$4,753	\$1,473
TUBO ESTRUCTURAL 2" e:2.5mm	M	7.6428	\$2,574	\$19,675
TUBO ACEROESTRUCTURAL D:4"	M	9.5	\$5,652	\$53,691
LAMINA ACERO INOXIDABLE e:1mm	M2	0.5	\$2,500	\$1,250
SOLDADURA	GLOBAL	1	\$300,000	\$300,000
PERNOS DE ANCLAJE 1/2" X 5 1/2"	UNIDAD	16	\$15,680	\$250,880
BATERIAS + PANEL SOLAR KIT	UNIDAD	1	\$1,250,000	\$1,250,000
RASPBERRY	UNIDAD	1	\$550,000	\$550,000
OTT RSL	UND	1	\$15,000,000	\$15,000,000
INSTALACIÓN PROGRAMACION	Y GLOBAL	1	\$2,500,000	\$2,500,000
TOTAL, COSTO DIRECTO				\$19,926,969
A.I.U (30%)				\$5,978,091
TOTAL				\$25,905,060

Apéndice K método de Nash aplicado a curva de gasto teórico

Carga de hidráulica (m)	Caudal del vertedero de excesos (m ³ /s)	Caudal por curva de gasto teórico (m ³ /s)	$\sum(\text{caudal obs-caudal model})^2$	$\sum(\text{caudal obs-caudalmodel})^2$
0.01	0.16106	0.11928627	0.001745044	0.046803
0.05	1.33955	1.33366108	3.46794E-05	0.92573262
0.01	0.18537	0.11928627	0.004367059	0.03687552
0.012	0.17641	0.15680588	0.000384322	0.04039698
0.05	1.39439	1.33366108	0.003688002	1.03426866
0.001	0.0295	0.00377216	0.000661922	0.12103441
0.003	0.09721	0.01960073	0.006023198	0.07850644
0.001	0.01354	0.00377216	9.54106E-05	0.1323941
0.01	0.32676	0.11928627	0.043045347	0.00256441
0.002	0.05021	0.01066929	0.001563468	0.1070533
prom	0.3774	sumatoria	0.061608452	2.52562943
			Nash Sutcliffe	0.975606694

Apéndice L Parámetros del método de Nash

<i>NS</i>	<i>Ajuste</i>
< 0,2	Insuficiente
0,2 – 0,4	Satisfactorio
0,4 – 0,6	Bueno
0,6 – 0,8	Muy bueno
> 0,8	Excelente

Apéndice M método de RMSE aplicado a curva de gasto teórico

Carga de hidráulica (m)	Caudal del vertedero de exceso (m³/s)	curva de gasto teórico (m³/s)	Error
0.010	0.161	0.119	0.002
0.050	1.340	1.334	0.000
0.010	0.185	0.119	0.004
0.012	0.176	0.157	0.000
0.050	1.394	1.334	0.004
0.001	0.030	0.004	0.001
0.003	0.097	0.020	0.006
0.001	0.014	0.004	0.000
0.010	0.327	0.119	0.043
0.002	0.050	0.011	0.002
RMSE			7.849%

Apéndice N Método de Nash aplicado a curva de gasto experimental

Carga hidráulica (m)	Caudal del vertedero de exceso (m ³ /s)	caudal por curva de gasto experimental	$\sum(\text{caudal obs-caudal model})^2$	$\sum(\text{caudal obs-caudal model})^2$
0.01	0.16106	0.22849893	0.00454801	0.046803
0.05	1.33955	1.19381233	0.021239469	0.92573262
0.01	0.18537	0.22849893	0.001860105	0.03687552
0.012	0.17641	0.27556691	0.009832093	0.04039698
0.05	1.39439	1.19381233	0.040231402	1.03426866
0.001	0.0295	0.02145775	6.46778E-05	0.12103441
0.003	0.09721	0.06633318	0.000953378	0.07850644
0.001	0.01354	0.02145775	6.26908E-05	0.1323941
0.01	0.32676	0.22849893	0.009655238	0.00256441
0.002	0.05021	0.04373532	4.19215E-05	0.1070533
prom	0.3774	sumatoria	0.088488983	2.52562943
			Método Nash	0.964963592

Apéndice O Método de RMSE aplicado a curva de gasto experimental

Carga de hidráulica (m)	Caudal del vertedero de exceso (m³/s)	curva de gasto experimental(m³/s)	Error
0.010	0.161	0.228	0.005
0.050	1.340	1.194	0.021
0.010	0.185	0.228	0.002
0.012	0.176	0.276	0.010
0.050	1.394	1.194	0.040
0.001	0.030	0.021	0.000
0.003	0.097	0.066	0.001
0.001	0.014	0.021	0.000
0.010	0.327	0.228	0.010
0.002	0.050	0.044	0.000
RMSE			9.41%