

DETERMINACIÓN Y EVALUACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DEL FLUJO Y SU EFICIENCIA, EN LA ESTRUCTURA DE ENTRADA SUMERGIDA PARA EL CONDUCTO PRINCIPAL Y LATERALES DE SECCIÓN CONSTANTE Y VARIABLE, EN UN TANQUE DECANTADOR DE PLACAS INCLINADAS.

**JENNIFER ALEXANDRA CABRERA VIVEROS.
FRANCISCO JAVIER OTAYA BOLAÑOS.**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2014.**

DETERMINACIÓN Y EVALUACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DEL FLUJO Y SU EFICIENCIA, EN LA ESTRUCTURA DE ENTRADA SUMERGIDA PARA EL CONDUCTO PRINCIPAL Y LATERALES DE SECCIÓN CONSTANTE Y VARIABLE, EN UN TANQUE DECANTADOR DE PLACAS INCLINADAS.

**JENNIFER ALEXANDRA CABRERA VIVEROS.
OTAYA BOLAÑOS FRANCISCO JAVIER.**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil.**

DIRECTOR:

**ROBERTO SALAZAR CANO.
Ingeniero Civil.
Magister en Ingeniería Sanitaria y Ambiental**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2014.**

NOTA DE RESPONSABILIDAD

Las ideas y conclusiones aportadas en el trabajo de grado son responsabilidad exclusiva del autor.

Artículo 1º del acuerdo No. 324 de octubre 11 de 1966, emanado del honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

“La Universidad de Nariño no se hace responsable de las opiniones o resultados obtenidos en el presente trabajo y para su publicación priman las normas sobre el derecho de autor”.

Artículo 13, Acuerdo N. 005 de 2010 emanado del Honorable Consejo Académico

NOTA DE ACEPTACIÓN:

DIRECTOR

JURADO

JURADO

San Juan de Pasto, Mayo de 2014.

RESUMEN

Normalmente en los diseños de desarenadores y/o sedimentadores de placas inclinadas, en la zona de entrada se utilizan conductos principales de sección rectangular constante y diámetro de laterales constante. La presente investigación contribuye al mejoramiento de esta zona, haciendo uso de un conducto principal de sección variable y diámetro de laterales constante, con el fin de obtener una mejor uniformidad en la distribución de caudales a lo largo del tanque decantador, incrementando hidráulicamente la eficiencia del sistema.

Para el desarrollo de la investigación, se determinó la eficiencia de una sección variable con respecto a una constante en diferentes condiciones de trabajo: Conducto libre (escurrimiento libre y a presión) y conducto sumergido (método colorimétrico y gravimétrico), analizando los datos obtenidos mediante un análisis estadístico, en donde se evaluó las diferencias entre ellos, para determinar el mejor comportamiento de la distribución del flujo a través de los conductos.

Mediante la utilización del conducto de sección variable como estructura de entrada en el tanque decantador de placas inclinadas, se logró una mayor uniformidad en la distribución de caudales, en comparación con los resultados obtenidos en el conducto de sección variable, en las diferentes etapas de la investigación.

Palabras claves: Tanque decantador, conducto, sección constante, sección variable, zona de entrada, distribución, uniformidad.

ABSTRACT

Normally desarenadores designs and / or inclined plate settler in the main duct inlet area of constant rectangular section and constant diameter side are used. This research contributes to the improvement of this region using a main conduit with a variable section and constant diameter side, in order to obtain a more uniform flow distribution along the settling tank, which is an efficient hydraulically system.

For the development of research, the efficiency of a variable section with respect to a constant in different working conditions are determined: Free Duct (free drainage and pressure) and immersed pipe (colorimetric and gravimetric method), analyzing the data obtained by statistical analysis, where the differences between them are evaluated to determine the best performance of distribution of flow through the ducts.

By using the duct with variable section as input structure to settler inclined plate tank, greater uniformity is achieved in the distribution of flow rates, compared to the results obtained in the conduit with a variable section at different stages of the research.

Keywords: Decanter tank, duct, constant section, variable section, entrance area, distribution uniformity.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	16
1. MARCO TEÓRICO	19
1.1 GENERALIDADES	19
1.2 ALTERACIONES EN LA ZONA DE ENTRADA	19
1.3 DISEÑO DE MÚLTIPLES	19
1.4 SEDIMENTACION.....	20
1.4.1 Definición.....	20
1.4.2 Tipos de sedimentación	20
1.5 TASA DE FLUJO SUPERFICIAL:.....	21
1.6 EL FLUJO LAMINAR EN LA SEDIMENTACION:.....	22
1.7 SEDIMENTADORES CON PLACAS PARALELAS	22
1.8 HIDRÁULICA DE LA DISTRIBUCION DEL AGUA.....	23
1.9 ZONA DE ENTRADA EN UN TANQUE DECANTADOR.....	26
1.9.1 Criterios de diseño.....	26
1.10 DISEÑO DE MÚLTIPLES.	28
1.11 DISEÑO DE TABIQUES DIFUSORES:.....	30
1.12 DIMENSIONAMIENTO DE LOS ORIFICIOS	30
1.13 ZONA DE LODOS	31
1.14 EL FRASCO DE MARIOTTE	32
1.14.1 Descripción	32

1.14.2	Funcionamiento del frasco de Mariotte	33
1.15	TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO	34
2.	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE LOS CONDUCTOS	35
2.1	CONDUCTO DE SECCIÓN VARIABLE	35
2.1.1	Distribución de los orificios laterales.	37
2.2	CONDUCTO DE SECCIÓN CONSTANTE	38
2.2.1	Distribución de los orificios laterales	40
3.	CONSTRUCCIÓN DE LOS CONDUCTOS	41
3.1	MATERIALES UTILIZADOS:	41
3.2	HERRAMIENTAS – EQUIPOS UTILIZADOS:.....	41
4.	ETAPA EXPERIMENTAL.....	42
4.1	ENSAYOS EN LA PLANTA PILOTO.....	42
4.1.1	Ensayos en condiciones de escurrimiento libre.....	42
4.1.1.1	Adaptación de los canales a la planta piloto.....	42
4.1.1.2	Procedimientos para la toma de datos.	43
4.1.1.3	Análisis de resultados en condiciones de escurrimiento libre	43
4.1.1.4	Análisis de las gráficas.....	46
4.1.1.5	Análisis estadístico	46
4.2	ENSAYOS DE LABORATORIO EN EL BANCO DE PRUEBAS.....	49
4.2.1	Ensayos en condiciones de presión	49
4.2.1.1	Adaptación de los conductos al banco de pruebas.	49
4.2.1.2	Procedimiento para la toma de datos.....	49

4.2.1.3	Resultados de los ensayos en condiciones de presión..	50
4.2.1.4	Análisis de las gráficas.....	52
4.2.1.5	Análisis estadístico	52
4.2.2	Ensayos con tubería en condiciones de presión..	55
4.2.2.1	Resultados de los ensayos con tubería en condiciones de presión.....	55
4.2.2.2	Análisis de las gráficas.....	58
4.2.2.3	Análisis estadístico.	58
4.3	ENSAYOS DE LABORATORIO EN EL TANQUE DECANTADOR DE PLACAS INCLINADAS.....	61
4.3.1	Adaptación del banco de pruebas	61
4.3.2	Método colorimétrico.....	62
4.3.2.1	Calibración para la entrada de la anilina	62
4.3.2.2	Procedimiento para la toma de datos.....	63
4.3.2.3	Análisis de datos e interpretación de resultados método colorimétrico...64	
4.3.3	Método gravimétrico	68
4.3.3.1	Procedimiento de ensayo y toma de datos.....	68
4.3.3.2	Obtención del sedimento	68
4.3.3.3	Ensayos de granulometría.	68
4.3.3.3.1	Equipo.	68
4.3.3.3.2	Procedimiento.....	69
4.3.3.4	Calibración del caudal sólido.....	70
4.3.3.5	Procedimiento para la toma de datos.....	70

4.3.3.6	Análisis de datos e interpretación de resultados..	¡Error! Marcador no definido.
4.3.3.7	Análisis de las gráficas.....	73
4.3.3.8	Análisis estadístico.	73
5.	SÍNTESIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA INVESTIGACIÓN.....	76
6.	CONCLUSIONES	77
7.	RECOMENDACIONES	79
	BIBLIOGRAFÍA.....	80

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING.....	83
ANEXO B. VALORES DE $\sqrt{\frac{v}{\mu}}$	83
ANEXO C. CÁLCULO DEL CONDUCTO DE SECCIÓN VARIABLE.	84
ANEXO D. CÁLCULO DEL CONDUCTO DE SECCIÓN CONSTANTE.....	84
ANEXO E. DATOS OBTENIDOS EN CONDICIONES DE ESCURRIMIENTO LIBRE	85
ANEXO F. DATOS OBTENIDOS EN CONDICIONES DE PRESIÓN	89
ANEXO G. DATOS OBTENIDOS CON TUBERÍA.....	93
ANEXO H. DATOS OBTENIDOS EN EL METODO COLORIMETRICO	96
ANEXO I. DATOS OBTENIDOS EN EL METODO GRAVIMETRICO.....	98

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.	Presiones en un múltiple distribuidor de agua.	23
FIGURA 2.	Soluciones a la mala distribución de caudales en un múltiple (Caso b.)	25
FIGURA 3.	Soluciones a la mala distribución de caudales en un múltiple (Caso c.).....	25
FIGURA 4.	Distribución de flujo ideal en un múltiple.....	28
FIGURA 5.	Frasco de Mariotte.	33
FIGURA 6.	Conducto de sección constante.....	41
FIGURA 7.	Conducto de sección variable.....	41
FIGURA 8.	Planta piloto # 1.....	42
FIGURA 9.	Planta piloto #2	42
FIGURA 10.	Transiciones y accesorios acoplados a uno de los conductos	43
FIGURA 11.	Gráfico de perfil representando el efecto de la interacción caudal-sección	48
FIGURA 12.	Conducto adaptado al banco de pruebas	49
FIGURA 13.	Gráfico de perfil representando el efecto de la interacción <i>caudal-sección (condición presión)</i>	54
FIGURA 14.	Síntesis análisis estadístico para los ensayos con tubería a presión.....	60
FIGURA 17.	Estructura de salida existente en el banco de pruebas.....	62
FIGURA 18.	Nueva Estructura de salida	62
FIGURA 19.	Frasco de Mariotte, conectado al tanque decantador.	63
FIGURA 20.	Puntos de toma de las muestras en la canaleta de salida	64

FIGURA 21. Gráfico de perfil representando el efecto de la interacción entre Condición – Sección.	66
FIGURA 22. Gráfico de perfil Interacción entre Caudal – Sección (Tanque decantador con placas).....	67
FIGURA 23. Gráfico de perfil Interacción entre Caudal – Sección (Tanque decantador sin placas).....	67
FIGURA 24. Curva granulométrica de la arena comprendida entre fina y muy fina.	69
FIGURA 25. Numeración de las tolvas	71
FIGURA 26. Interacción entre Conducto – Caudales en la obtención de los valores de desviación estándar.	75
FIGURA 27. Interacción entre Conducto – Caudales en la obtención de los porcentajes conseguidos en las tolvas con respecto a la concentración inicial.	75

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. Valores de Caudales obtenidos en cada orificio para los dos tipos de sección en condiciones de escurrimiento libre.	44
TABLA 2. Contrastes multivariados.....	46
TABLA 3. Medias estimadas (factor caudal)	47
TABLA 4. Medias estimadas (factor sección).....	47
TABLA 5. Interacción sección - caudal.....	48
TABLA 6. Valores de caudales obtenidos en cada orificio para los dos tipos de sección en condiciones de presión.....	50
TABLA 7. Contrastes multivariados.....	52
TABLA 8. Medias estimadas (factor caudal)	53
TABLA 9. Medias estimadas (factor sección).....	53
TABLA 10. Interacción sección – caudal.....	53
TABLA 11. Valores de caudales obtenidos en cada orificio para la tubería de sección constante en condiciones de presión.	56
TABLA 12. Valores de caudales obtenidos en cada orificio para la tubería de sección variable en condiciones de presión.	56
TABLA 13. Contrastes multivariados.....	58
TABLA 14. Medias estimadas (factor caudal)	59
TABLA 15. Medias estimadas (factor sección).....	59
TABLA 16. Interacción sección - caudal.....	60
TABLA 17. Calibración del Frasco de Mariotte.....	63
TABLA 18. Calculo del número de vueltas según el caudal de entrada.	64

TABLA 19. Análisis de Varianza para Desviación Estándar de Color.....	65
TABLA 20. Interacción entre los Factores de Condición – Sección.....	66
TABLA 21. Pruebas de Múltiples Rangos para Desviación Estándar de Color....	66
TABLA 22. Análisis granulométrico para una muestra de 1000gr.	69
TABLA 23. Calibración del cono dosificador.	70
TABLA 24. Calculo del número de vueltas según el caudal de entrada.	71
TABLA 25. Porcentajes (%) decantados con respecto al total.	74
TABLA 26. Desviación estándar.	74
TABLA 27. Resumen de los valores de Desviación Estándar en los análisis estadísticos.	76

INTRODUCCIÓN

El suministro de agua potable a las poblaciones es una necesidad prioritaria e indispensable para la vida, por lo tanto, es necesario proporcionar técnicas que conlleven a conocer novedosos procesos que permitan obtener mejores resultados en diversos aspectos, como es el caso de la calidad del agua para consumo humano. Teniendo en cuenta esta problemática, se plantea el presente proyecto de investigación, el cual pretende demostrar que se puede mejorar la eficiencia de un sistema de abastecimiento de agua si se opta por cambiar la sección constante por una variable en el conducto provisto de laterales dispuesto en la estructura de entrada en un tanque decantador de placas inclinadas, con el fin de mejorar hidráulicamente la zona de entrada, teniendo en cuenta que esta constituye una de las variables importantes de diseño y de la cual depende el buen funcionamiento y eficiencia del sistema, ya que una buena distribución del flujo hacia las placas hace que el proceso de decantación se realice de manera homogénea.

Una forma de evidenciar el comportamiento de una sección constante, es que por lo general en la mayoría de diseños se ha usado un conducto principal con dicha sección, la cual si bien cumple con la función de distribuir el flujo, no la realiza de la mejor manera, ya que dentro del conducto existen diferentes velocidades de paso del caudal de entrada, lo que ocasiona una salida desproporcional del flujo a través de los orificios laterales y por lo tanto, se presenta una mala distribución de partículas en la zona lodos, después de ser decantadas.

La importancia del tema radica en que una optimización del sistema, daría como resultado una mejor calidad de agua al usuario, implementando alternativas sencillas y a moderados costos que se adapten a la tecnología empleada en la región.

PRELIMINARES

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Planteamiento del problema.

¿Qué tipo de sección en un conducto principal es el que mejor distribuye el flujo en un tanque decantador de placas inclinadas?

¿Cómo afectan las condiciones de entrada del flujo la eficiencia en la remoción de partículas en un tanque decantador de placas inclinadas?

Descripción del problema. El problema consiste en que para la distribución del flujo en un desarenador y/o sedimentador de placas inclinadas usualmente se usan conductos rectangulares de sección constante y laterales de diámetro constante, los cuales no distribuyen el flujo de manera equitativa y esto hace que se afecte la eficiencia del sistema.

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Los objetivos que se plantean, para este proyecto son los siguientes:

Objetivo general.

Mejorar la zona de entrada en un tanque decantador de placas inclinadas, haciendo uso de un conducto principal de sección variable y diámetro de conductos laterales constante, para obtener una distribución equitativa del flujo a lo largo del tanque incrementando la eficiencia del sistema.

Objetivos específicos.

- Determinar por medio de experimentación piloto qué sección variable en un conducto rectangular distribuye mejor el flujo.
- Llevar a cabo el diseño y la construcción de los conductos tanto de sección constante como variable.
- Acondicionar el banco de pruebas para la adaptación de los conductos.

- Determinar la eficiencia de una sección con respecto a la otra usando el banco de pruebas y el método colorimétrico con el uso de anilina.
- Analizar en el banco de pruebas la influencia del tipo de conducto en la decantación de partículas haciendo uso del método gravimétrico.
- Determinar la distribución de partículas en la zona de lodos, según el tipo de conducto.
- Establecer hasta que límite de caudal la distribución del flujo es uniforme, mediante el método volumétrico.

HIPÓTESIS

Un conducto rectangular de sección variable y diámetro de conductos laterales constantes distribuye mejor el flujo a lo largo de un desarenador y/o sedimentador de placas inclinadas, que un conducto rectangular de sección y diámetro de laterales constante.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 GENERALIDADES

La zona de entrada tiene como función el conseguir una distribución uniforme de las líneas de flujo dentro de la unidad, uniformizando a su vez la velocidad. El diseño de esta zona es considerado más importante que el de la zona de salida ya que de este depende mucho el funcionamiento y el diseño de las demás partes del sistema. “Por lo tanto, el propósito de la estructura de entrada, es:

- a) Distribuir el afluente tan uniformemente como sea posible en toda el área transversal del sedimentador.
- b) Evitar chorros de agua que puedan provocar movimientos rotacionales de la masa líquida, u otras corrientes cinéticas.
- c) Disipar la energía que trae el agua.
- d) Evitar las altas velocidades que puedan perturbar los sedimentos del fondo.”¹

1.2 ALTERACIONES EN LA ZONA DE ENTRADA

La estructura de entrada del flujo al tanque decantador hace parte fundamental del buen funcionamiento del sistema, teniendo en cuenta que una distribución homogénea en todo el tanque da como resultado un proceso de decantación más eficiente. El Ingeniero José Pérez (consultor en tratamiento de agua, centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente), dice: “al producirse una distribución desigual de flujo en la entrada del sedimentador, o cuando las masas de agua entran con un alto gradiente de velocidad crean corrientes cinéticas, las cuales originan una distribución no uniforme en las celdas”, perturbaciones que pasan a tener mucha importancia cuando la altura de la zona de entrada es menor de la altura de sedimentación y pierden importancia cuando se obtiene una altura de zona de entrada igual a la de sedimentación².

1.3 DISEÑO DE MÚLTIPLES

“Debido a la carencia de un método adecuado de cálculo se ha descuidado el diseño de estas estructuras por lo cual es frecuente observar que su pobre

¹Arboleda, J. (2000). “Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua”. Tomo 1. McGraw- Hill Interamericana, S.A. de C.V., 3° Edición, Colombia. Pág. 28-30.

²Pérez, A. J., Tratamiento de aguas., Universidad Nacional - Facultad de minas. Pág. 345-348

comportamiento es causa importante de bajas eficiencias en distintas unidades de tratamiento.”³

En cuanto al diseño de múltiples el Ingeniero Antonio Castilla R. de la Universidad del Valle y otros autores consiguieron un procedimiento de cálculo sencillo para tener en cuenta en el diseño de un múltiple, las pérdidas de carga en el conducto principal, el cual se considera que representa un aporte útil a la Ingeniería Sanitaria y que es una aclaración importante a la teoría que sobre los múltiples existe en la actualidad. Se muestra con claridad cómo estas pérdidas producen un efecto compensatorio que tiende a producir un caudal uniforme y que la no consideración de dichas pérdidas puede producir errores importantes.

El método de cálculo es un método iterativo, en donde se ha obtenido una ecuación para calcular con precisión el verdadero valor del coeficiente de la pérdida de carga y así continuar con el cálculo de la iteración siguiente. Este coeficiente se obtiene a partir de las ecuaciones de H. Hudson⁴.

1.4 SEDIMENTACION

1.4.1 Definición. Por sedimentación se denomina el proceso mediante el cual se asientan los sólidos suspendidos en un fluido, bajo la acción de la gravedad. La sedimentación realiza la separación de las partículas más densas que el agua y, que tengan una velocidad de sedimentación tal, que permita que lleguen al fondo del tanque sedimentador en un tiempo económicamente aceptable. La cantidad de sólidos sedimentables se expresa en mililitros de sólido por litro de agua pero también se da en partes por millón, en peso. Se le da el nombre de sedimentador, a la estructura que sirve para reducir la velocidad del agua para que puedan sedimentar los sólidos sedimentables.

1.4.2 Tipos de sedimentación. La sedimentación puede ser Simple cuando las partículas que se asientan son discretas, o sea partículas que no cambian de forma tamaño o densidad durante el descenso en el fluido.

La sedimentación se denomina Inducida cuando las partículas que se sedimentan son aglomerables, o sea que durante la sedimentación se aglutinan entre sí cambiando de forma y tamaño y aumentando de peso específico.

La sedimentación simple es, por ejemplo, lo que ocurre en un tanque desarenador que se coloca contiguo a la bocatoma y cuyo objeto es separar la arena del agua.

³Castilla, A. R. (1985). Diseño de múltiples. En: Curso de abasto de agua para poblaciones. 2 ed. Santiago De Cali: Oficina de publicaciones – Facultad de Ingeniería – Universidad del Valle. Pág. 1-26

⁴Hudson H., Uhler R. y Bailey R. "Proceedings of the American Society of Civil Engineers"

La sedimentación inducida es el tipo que se presenta en una planta de tratamiento y se logra en un tanque, llamado Sedimentador o Decantador, que se coloca a continuación del floculador y que permite la separación de las partículas floculentas que se forman en los procesos de coagulación y floculación. Las partículas floculentas adquieren su dimensión, forma y peso casi definitivos durante la floculación, de forma que su comportamiento en el sedimentador es muy similar al de las partículas discretas. Es por esto que los criterios para el diseño de los sedimentadores para agua coagulada se basan en la sedimentación de partículas discretas, fenómeno que trata de representar la Ley de Stokes.

Según el sentido de flujo del agua en los sedimentadores, éstos pueden ser de flujo horizontal, de flujo vertical y manto de lodos, y sedimentadores de alta rata. Dentro de los primeros están los sedimentadores de plantas convencionales y los desarenadores. Los segundos, según la forma de mantener el manto suspendido, son hidráulicos o mecánicos.⁵

1.5 TASA DE FLUJO SUPERFICIAL:

Teóricamente se puede demostrar que, tanto en los sedimentadores de flujo horizontal como en los sedimentadores de flujo vertical que funcionan con partículas discretas sin turbulencia, las condiciones límites de diseño son dadas por la siguiente relación:

$$V_s = \frac{Q}{A} \quad [1]$$

Dónde:

Vs: Velocidad de sedimentación en partículas menores que van a sedimentar, M/d

Q: Caudal (m³/d)

A: área del sedimentador (m²)

En el caso de partículas floculantes, ellas pueden juntarse en el trayecto, alterando las condiciones durante la sedimentación. En este caso, la velocidad de descenso (Vs) tiende a aumentar, acelerando el proceso. (Se podría considerar una velocidad media Vs aparente).

⁵Camp, T.R. (1946). "Sedimentation and the Design of Settling Tanks" Trans. ASCE Vol. III pág. 895.

1.6 EL FLUJO LAMINAR EN LA SEDIMENTACION:

Examinado las condiciones hidráulicas en los sedimentadores de tipo clásico, se constata que el régimen de flujo es turbulento, con número de Reynolds entre 2.000 y 200.000.

En esas condiciones, las partículas del agua se desplazan con movimientos irregulares y erráticos, interfiriendo en el fenómeno de la sedimentación.

La experiencia demuestra que el régimen de flujo laminar, con números de Reynolds bajos, en que las trayectorias de las partículas del agua son regulares, es más propicio a la sedimentación.

Para obtener valores más bajos de número de Reynolds es necesario reducir el radio hidráulico o la velocidad de flujo del agua (V).

Con ese propósito se procura modernamente introducir en los sedimentadores “módulos” formados por tubos, ductos especiales o placas paralelas.

Aplicando esos elementos en los tanques se reduce no solamente el número de Reynolds sino también la carga superficial efectiva (que lleva en cuenta el número múltiplo de las superficies o los “fondos”), disminuyendo la distancia vertical que los floculos deben recorrer en la sedimentación.

1.7 SEDIMENTADORES CON PLACAS PARALELAS

Los ingenieros Hansen y Gordon, después de varias experiencias llegaron a la conclusión de que el flujo a través de tubos múltiples y paralelos presenta condiciones óptimas para la sedimentación.

Los sedimentadores equipados con esos elementos tienen las siguientes ventajas:

a) se comportan como sedimentadores de fondos múltiples, de gran área y pequeño trayecto de disposición para las partículas.

b) aseguran el movimiento laminar (con valores bajos de números de Reynolds). El flujo laminar no arrastra partículas depositadas (lodo).

En consecuencia, el periodo de detención puede ser extraordinariamente reducido (fueron obtenidos resultados satisfactorios en instalaciones experimentales, con apenas algunos minutos de detención).

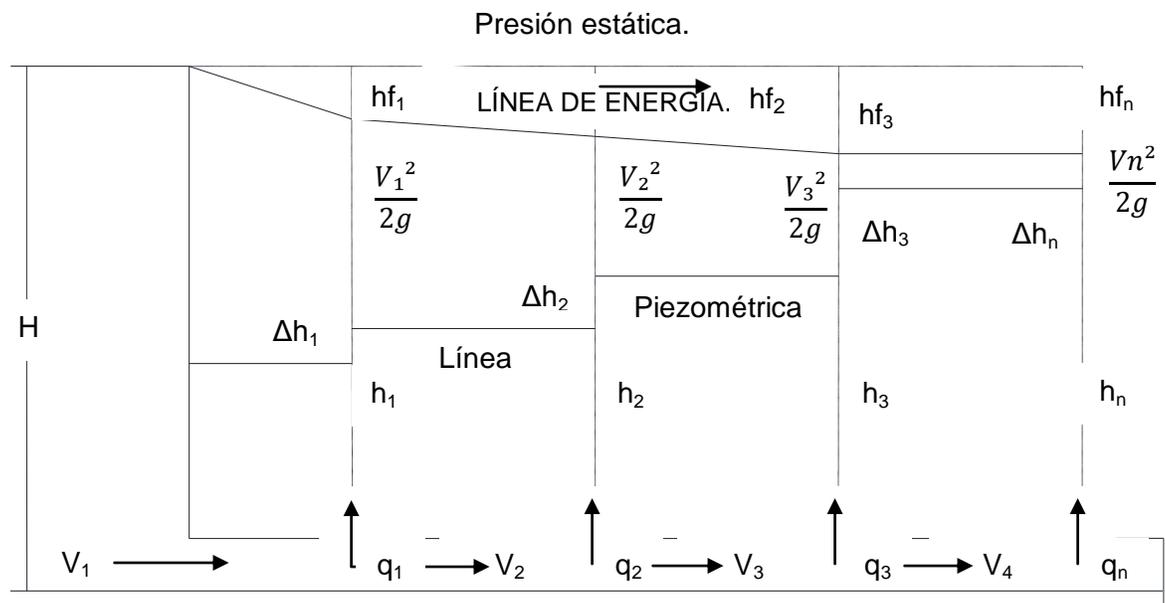
La nueva tecnología de empleo de módulos de tubos o placas tomó práctica, gracias a la aparición de material plástico de bajo costo (PVC, polietileno y otros).

Las cargas superficiales calculadas en función del área efectivamente cubierta por los módulos, generalmente están comprendidas entre 180 y 240 m³/m²/día. Esto corresponde a cerca de 5 veces las cargas adoptadas en los sedimentadores convencionales.⁶

1.8 HIDRÁULICA DE LA DISTRIBUCION DEL AGUA.

La teoría de los múltiples debe aplicarse al cálculo de los sistemas de drenaje en forma similar a la explicada para la extracción de lodos en los sedimentadores. La diferencia con dicho caso es que los drenes del filtro se diseñan no para succionar agua de manera uniforme por todos los orificios, sino para inyectar el flujo de lavado. La igualdad con la cual distribuyan dicho flujo va a depender de la velocidad y sección que se dé al ducto distribuidor.

FIGURA 1. Presiones en un múltiple distribuidor de agua.



Fuente: Arboleda, J. (2000). "Teoría y práctica de la purificación del agua".

De acuerdo al a Figura 1., considerando una carga H sobre un múltiple en cada orificio distribuidor se cumplirá que

⁶Pérez J. (2007) Centro panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Sedimentadores Laminareos pág. 37-40.

$$H = h + \frac{v^2}{2g} + hf \quad [2]$$

En dónde;

h : Altura piezométrica hasta donde teóricamente (excluida la resistencia del aire) subirá el chorro de agua si se los dejara fluir libremente.

$\frac{v^2}{2g}$: Carga de velocidad

hf : Perdida por fricción.

Como a medida que va saliendo por los orificios los caudales q_1, q_2, q_3, q_n , las velocidades v_1, v_2, v_3, v_n , van a ir disminuyendo en el ducto, las alturas piezométricas h_1, h_2, h_3, h_n , van a ir aumentando en el valor de $\Delta h_1, \Delta h_2, \Delta h_3, \Delta h_n$, a lo largo del múltiple.

Eso implica que el gasto y la presión de salida en los orificios van a ser mayor en los del extremo opuesto a la entrada del flujo que en los del comienzo, a no ser que las pérdidas h y las cargas de velocidad $v^2/2g$ se balanceen hasta producir

una línea horizontal.

Para solucionar este problema existen tres alternativas:

- a. Ir disminuyendo el diámetro de los orificios distribuidores a lo largo del múltiple. Lo que no siempre es práctico dado el gran número de orificios que hay en un sistema de drenaje de un filtro.
- b. Incrementar en tal forma las pérdidas de carga en los orificios distribuidores que las pérdidas por fricción en el ducto no tengan un influjo mayor en la equirrepartición de los flujos o sea hacer:

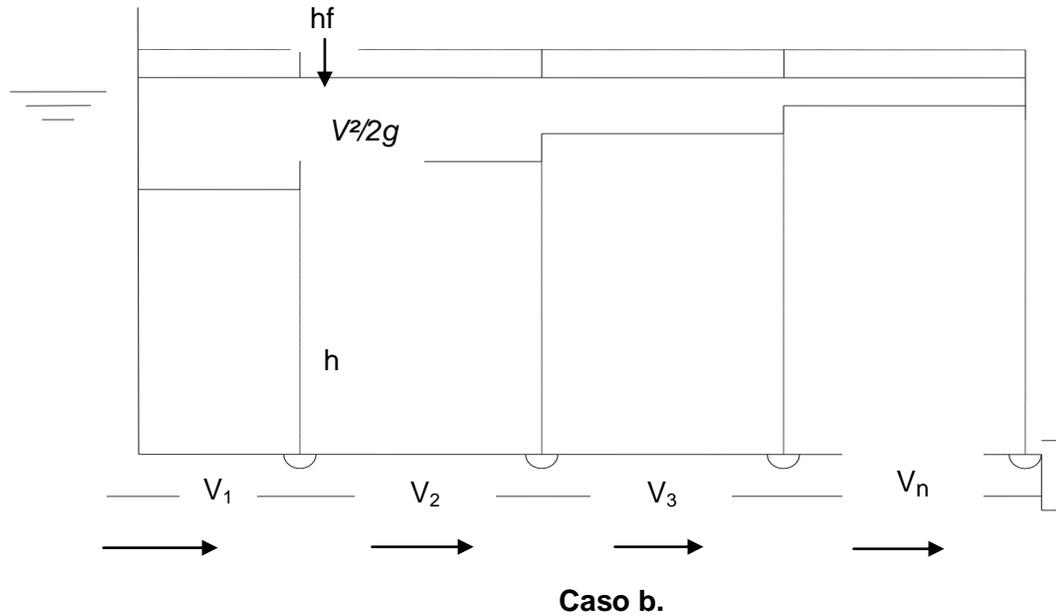
$$h \gg \frac{v^2}{2g} + hf$$

Esta es la solución adoptada en la mayoría de los sistemas de drenes patentados que producen pérdidas de carga entre 0.90 y 1.80 m. En este caso el área de los orificios debe ser del orden de 0.4 el área del múltiple distribuidor.

- c. Disminuir la velocidad de transporte del agua en el ducto de tal manera que la carga de velocidad $v^2/2g$ y la fracción hf sean muy pequeñas, tanto que aunque las pérdidas en los orificios sean bajas (0.25 a 0.35 m) los h y las

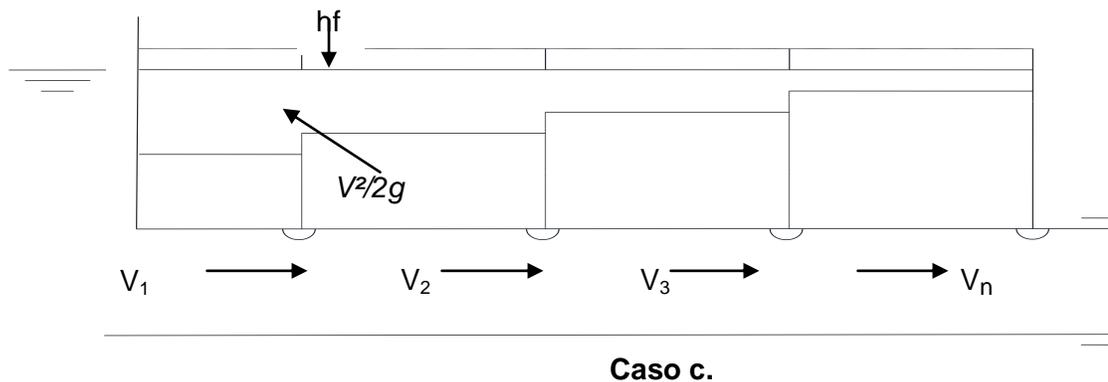
fracciones en el ducto sean poco significativas, con lo se garantiza una relativa horizontalidad de la línea piezométrica. Este es el sistema utilizado en los filtros de lavado mutuo que deben trabajar con baja pérdida de carga durante el lavado para no aumentar la profundidad de la caja del filtro.⁷

FIGURA 2. Soluciones a la mala distribución de caudales en un múltiple (Caso b.)



Fuente: Arboleda, J. (2000). "Teoría y práctica de la purificación del agua"

FIGURA 3. Soluciones a la mala distribución de caudales en un múltiple (Caso c.)



Fuente: Arboleda, J. (2000). "Teoría y práctica de la purificación del agua"

⁷Arboleda, J. (2000). "Teoría y práctica de la purificación del agua". Tomo 1. McGraw- Hill Interamericana, S.A. de C.V., 3° Edición, Colombia. Pág. 23-27.

1.9 ZONA DE ENTRADA EN UN TANQUE DECANTADOR

Un aspecto importante en el diseño de la entrada de los sedimentadores, es asegurar que el flujo se distribuya por partes iguales en todas las unidades. Este es un problema hidráulico complejo.

Se conoce por zona de entrada al canal o tubería que distribuye de manera uniforme el agua floculada al módulo de placas. Esta zona tiene como objetivo distribuir el caudal de manera uniforme a todas las unidades que operan en paralelo y a lo largo del módulo de placas. Esta función la desempeñan dos canales con diferente ubicación.¹⁰

1.9.1 Criterios de diseño.

1. Si se proyectan canales de sección variable, se consigue distribuir el caudal de manera uniforme a varias unidades, para que la velocidad se mantenga constante.
2. La sección del canal puede tener ancho constante y profundidad variable o ancho variable y profundidad constante. Los canales del primer tipo son los más convenientes porque permiten compactar más el área de la planta. En plantas grandes el ancho de este canal puede ser de varios metros, por lo que resulta muy conveniente que tenga un ancho constante y que la mayor dimensión esté en la profundidad, aprovechando la excavación que inevitablemente se hará para la construcción del decantador.
3. Se puede admitir una desviación de caudales de 5% entre la primera y la última compuerta u orificio lateral de distribución, lo cual se comprueba mediante la aplicación de los criterios de Hudson.
4. El coeficiente de pérdida de carga total en las compuertas (β) está dado por la siguiente expresión:

$$\beta = 1 + \theta + \varphi (V_c / V_L)^2 + \varphi. \quad [3]$$

Dónde:

1: Pérdida de carga debida a la disipación de energía en el lateral.

θ : Coeficiente de pérdida de carga en la entrada. En canales cortos como los que se diseñan en las plantas de tratamiento de agua, el valor de este coeficiente es de 0,7.⁸

⁸Comisión Nacional del Agua, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Edición 2007, pág. 112- 114.

φ : Coeficiente de pérdida de carga en el cambio de dirección de la corriente, $\varphi=1,67$.

V_c : Velocidad en el canal o tubo principal de distribución en m/s.

V_L : Velocidad en los laterales: compuertas o tuberías laterales que reciben el caudal distribuido en m/s.

5. La velocidad real en los laterales (V_L) se comprueba mediante la siguiente expresión:

$$V_L = \frac{Q_t}{AL \cdot \sqrt{\beta_1 \left(\sum_{i=1}^n 1/\sqrt{\beta_1} \right)}} \quad [4]$$

Dónde:

Q_t : Caudal total por distribuir (m^3/s)

AL : Área de cada uno de los orificios de las compuertas o de los tubos laterales de distribución (m^2)

6. Para comprobar el gradiente de velocidad medio (G) en los orificios o secciones de paso, se empleará la siguiente expresión:

$$G = (\gamma/2\mu g)^{0,5} \cdot (f/4 RH)^{0,5} \cdot V_L^{1,5} \quad [5]$$

Dónde:

γ : Densidad del agua en kg/cm^3

RH : Radio hidráulico de la sección en m

μ : Viscosidad absoluta ($kg/cm^2 \times s$)

f : Coeficiente de Darcy - Weisbach: varía entre 0,015 y 0,030

$$hf = \beta V_L n^2 / 2g \quad [6]$$

Dónde:

hf : Pérdida de carga en m.

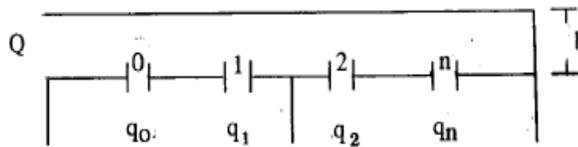
$V_L n$: Velocidad real en el lateral número n en m/s. ⁹

⁹Comisión Nacional del Agua, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Edición 2007, pág. 112- 114.

El caso ideal en el diseño de canales de entrada, el flujo Q se distribuirá por partes iguales en el número n de salidas idénticas y por tanto:

$$q_0 = \frac{Q}{n+1} \quad [7]$$

FIGURA 4. Distribución de flujo ideal en un múltiple.



Fuente: Arboleda, J. (2000). “Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua”

En sistemas reales, en cambio, el flujo q_0 es mayor o menor que el q_n y por lo tanto $q_0 = m q_n$, en donde m es la fracción de q_0 que sale por la abertura n .

1.10 DISEÑO DE MÚLTIPLES.

Los múltiples consisten en un conducto principal con laterales normalmente espaciados a intervalos regulares (véase Figura 4.) por medio de los cuales se pretende alcanzar una requerida distribución de flujos y garantizar así, al menos desde el punto de vista hidráulico, el mejor comportamiento de la estructura o reactor al cual el múltiple esté asociado.

Los múltiples son estructuras hidráulicas importantes y de frecuente uso en plantas de potabilización, plantas de tratamiento de aguas residuales, piscinas de enfriamiento, bocatomas, industrias, etc.

Pueden ser diseñados dos tipos de múltiples: Unos que distribuyen el flujo (Múltiples difusores) y otros que lo recolectan (Múltiples recolectores). Algunos múltiples cumplen esa doble función como es el caso de los sistemas de drenaje en los filtros rápidos, en plantas de potabilización.¹⁰

Debido a la carencia de un método adecuado de cálculo se ha descuidado el diseño de estas estructuras por lo cual es frecuente observar que su pobre

¹⁰Arboleda, J. (2000). “Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua”. Tomo 1. McGraw- Hill Interamericana, S.A. de C.V., 3° Edición, Colombia. Pág. 35-40.

comportamiento es causa importante de bajas eficiencias en distintas unidades de tratamiento.

En la revista "Proceedings of the American Society of Civil Engineers" apareció un estudio muy interesante de los ingenieros H. Hudson, R. Uhler y R. Bailey quienes con base en la evidencia experimental de otros investigadores (Mcnown, Hartigan, Lansford, Miller, Thoma y Vennard), obtienen ecuaciones que permiten calcular los coeficientes de pérdida de carga en los laterales tanto de múltiples difusores como recolectores y dan un procedimiento de cálculo para múltiples difusores cuando sólo se tienen en cuenta las pérdidas por entrada o salida de los laterales.

En el presente estudio se usan las ecuaciones obtenidas por Hudson et Al y se presenta un procedimiento generalizado de cálculo que incluye las pérdidas por rozamiento y por cambio de velocidad a lo largo del conducto principal del múltiple.

Se hacen además interesantes precisiones sobre la acción combinada de las pérdidas de carga y de los coeficientes de descarga y su efecto compensador en la distribución del flujo. Se precisa además la relación adecuada de área entre laterales y conducto principal lo que es utilizado para indicar un método sencillo de cálculo, con el grado de uniformidad aceptado en el flujo como parámetro de diseño.¹¹

Es interesante analizar el coeficiente B y la presión a lo largo del conducto principal lo cual se hará en los párrafos siguientes:

a) Coeficiente B:

La situación ideal para un orificio de descarga a un lateral es que aguas arriba de la derivación el fluido esté perfectamente quieto.

En un múltiple el último lateral se acerca a esta condición. Al inicio del múltiple el conducto principal lleva todo el caudal y por lo tanto la velocidad a lo largo del conducto es máxima en esta zona si su sección es constante. Al final, habiéndose derivado la casi totalidad del caudal la velocidad es mínima. Mientras menor sea la velocidad en el conducto principal menor será la fuerza necesaria para producir el cambio de velocidad hacia el lateral por lo cual se facilita la entrada del agua en este último conducto. Por esta razón el coeficiente B va disminuyendo hasta aguas abajo y los laterales finales, por este aspecto, tienden a derivar más caudal. Se comprende pues, la importancia de este coeficiente en la distribución del flujo a lo largo del múltiple.

¹¹Hudson H., Uhler R. y Bailey R. "Proceedings of the American Society of Civil Engineers"

b) Presión a lo largo del conducto principal:

Si las pérdidas por fricción y cambios de velocidad fueran menores que la carga de recuperación a lo largo del conducto principal la presión aumentaría hacia aguas abajo en este conducto. En estas condiciones la descarga en los laterales finales sería mayor que en los iniciales por este concepto. Generalmente, las pérdidas por fricción son mayores que la carga de recuperación y, por este solo aspecto, las descargas tienden a disminuir hacia el final del múltiple. Las pérdidas de carga a lo largo del conducto principal tienen un efecto compensador en relación con el efecto del coeficiente B, en un múltiple difusor. En resumen, la descarga en los laterales es el resultado del efecto combinado de las cargas de recuperación, del coeficiente B y de las pérdidas por fricción y cambios de velocidad a lo largo del conducto principal.¹²

1.11 DISEÑO DE TABIQUES DIFUSORES:

Los tabiques difusores deben cumplir con los siguientes requisitos:

1. Debe hacerse un gran número de orificios pequeños.
2. La forma ideal es la circular y después la cuadrada.
3. Si no hay remoción mecánica de lodos, los orificios más bajos deben estar a $h/4$ o $h/5$ por encima del fondo.
4. Los orificios más altos deben estar a $h/5$ o $h/6$ de la superficie del agua.
5. El tabique difusor deberá estar a 0.80 m de la pared frontal del decantador (espacio suficiente para la limpieza).

Hudson sugiere conservar el mismo gradiente de velocidad de la última parte del floculador, tanto en los canales de adición de agua al decantador, como en los orificios de los tabiques o cortinas difusoras de entrada, cuando las hay.

1.12 DIMENSIONAMIENTO DE LOS ORIFICIOS

CRITERIO 1. Se basa en la velocidad del flujo. Si esa velocidad fuera demasiado baja, la distribución será mala. Si fuera demasiada alta habrá de causar perjuicio a los flocs constituidos.

Camp recomendaba velocidades comprendidas entre 0,15 y 0,30 m/s.

¹²Arboleda, J. (2000). "Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua". Tomo 1. McGraw- Hill Interamericana, S.A. de C.V., 3° Edición, Colombia. Pág. 35-40.

Cox recomienda 0,12 a 0,24 m/s.

CRITERIO II: según Hudson prefiere medir los orificios a partir de un valor conveniente de G ($< 15 \text{ Seg}^{-1}$).

CRITERIO III: Camp Tiene en cuenta el efecto de los chorros producidos por los orificios y el valor de G .¹³

CRITERIO DE CARGA (Energía disponible)

La distribución uniforme del caudal a través de compuertas, orificios o tubos puede ser facilitada, haciendo la pérdida de carga en las entradas relativamente grande en comparación con la diferencia de energía disponible (carga) entre los puntos extremos del conducto.

Siendo:

hf = diferencia de energía en el canal entre los puntos extremos de salida (compuertas primera y última).

h_o = pérdida de carga en la entrada (compuerta).

Energía perdida en la primera compuerta $h_o=q^2$

Energía perdida en la última compuerta $h_o- hf = (mq)^2$

$$\frac{h_o}{h_o-hf} = \frac{1}{m^2} \text{ (m es la relación de caudales entre las compuertas extremas)}$$

1.13 ZONA DE LODOS

Los lodos se depositan en el fondo del sedimentador de manera desuniforme. Entre el 60% y el 90% queda almacenado al comienzo del mismo, en el primer tercio de su longitud. La cantidad de lodos varía en proporción directa con la cantidad de coagulantes usados.

La zona de lodos debe almacenar entre el 90 % y el 99% de ese material, el cual sufre un proceso de contracción cuando está sedimentando, que disminuye su volumen. Autores sugieren que se deje un volumen adicional del 10 al 20 % en el tanque sedimentados, para almacenamiento de lodos.

Dos aspectos deben, además, tenerse en cuenta:

¹³Ingersoll A., McKee, J., Brooks, N.Y., (Jan 1955) "Fundamental concepts of rectangular settling tanks" Proc. ASCE, Vol. 81, p. 590-1 pág. 83-89.

a) La velocidad horizontal del agua en el fondo

b) La forma de remoción de los lodos.

Si la velocidad del agua en el fondo del sedimentados es muy grande, las partículas asentadas pueden ser resuspendidas en el flujo y acarreadas en el efluente.¹⁴

1.14 EL FRASCO DE MARIOTTE

1.14.1 Descripción. El Frasco de Mariotte es un dispositivo destinado a conseguir una velocidad de efusión constante simultáneamente para un líquido y un gas. Consta de un frasco o botella de vidrio con un orificio lateral cerca de la base en el que eventualmente puede insertarse un tubo recto horizontal, y un tubo, también de vidrio, que por medio de un tapón ajusta perfectamente a su garganta, quedando en posición vertical.

Para observar su funcionamiento, se coloca un tapón de corcho en el tubo horizontal para evitar la salida de líquido y se llena frasco con agua, teniendo en cuenta que debe verterse suficiente cantidad para cubrir ampliamente el extremo inferior del tubo vertical, y que éste debe quedar siempre a una altura h por encima del nivel marcado por el tubo horizontal. En ese momento se quita el tapón de corcho y se observa la salida de agua a través del tubo horizontal con velocidad constante, a pesar de que con el paso del tiempo desciende el nivel del agua en el frasco (siempre que se sigan cumpliendo las dos condiciones anteriormente expuestas). De esta forma, el frasco de Mariotte logra una velocidad de efusión constante para un líquido, en este caso agua. Sin embargo, también se observa la entrada regular de burbujas de aire a través del extremo inferior del tubo vertical, lo que implica una velocidad de efusión constante también para un gas, en este caso aire.

Históricamente, el principio del Frasco de Mariotte fue utilizado habitualmente en el siglo XIX en los quinqués y lámparas del alumbrado doméstico de Argan, en los que, a pesar de tener el depósito más alto que el nivel por donde se alimenta la llama, se impide el salto del aceite en forma de surtidor como debería hacerlo si no fuera por esta ingeniosa disposición.¹⁵

¹⁴Salazar, R. C. (2006) Acueductos segunda edición pág. 78-80. "Estudio de desarenadores convencionales y de placas inclinadas, teoría de sedimentación"

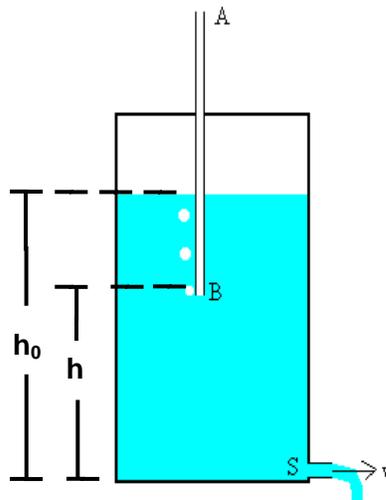
¹⁵Njock J, Mechanics of the slow draining of a large tank under gravity. Am. J. Phys. 71 (11) November 2003, pp. 1204-1207

1.14.2 Funcionamiento del frasco de Mariotte. De acuerdo con el teorema de Torricelli, la velocidad de salida de un líquido por un orificio practicado en su fondo es la misma que la que adquiere un cuerpo que cayese libremente en el vacío desde una altura h , siendo h la altura de la columna de fluido; es decir:

$$V = \sqrt{2gh} \quad [8]$$

A medida que el fluido sale por el orificio, la altura h de fluido en el depósito va disminuyendo. Si S es la sección del orificio, el gasto Sv , o volumen de fluido que sale por el orificio en la unidad de tiempo no es constante. Si queremos producir un gasto constante podemos emplear el denominado frasco de Mariotte.¹⁶

FIGURA 5. Frasco de Mariotte.



Fuente: Maroto, J. A, de Dios J., de las Nieves F. J. Utilización de un frasco de Mariotte para el estudio experimental de la transición de régimen laminar a turbulento. Revista Española de Física, Vol-13, nº 5, págs. 42-47

El frasco de Mariotte consiste básicamente en un frasco lleno de fluido hasta una altura h_0 (véase **Figura 5**), que está cerrado por un tapón atravesado por un tubo cuyo extremo inferior está sumergido en el líquido. El fluido sale del frasco por un orificio practicado en el fondo del recipiente. En el extremo inferior B del tubo, la presión es la atmosférica ya que está entrando aire por el tubo, a medida que sale el líquido por el orificio.

La velocidad de salida del fluido no corresponderá a la altura h_0 desde el orificio a la superficie libre de fluido en el frasco, sino a la altura h o distancia entre el extremo inferior B del tubo y el orificio

¹⁶SHAMES, Irving H. Mecánica de fluidos, 3ª Ed. Santafé de Bogotá. McGraw Hill, 1998. 825 p

Dado que h permanece constante en tanto que el nivel de líquido esté por encima del extremo inferior del tubo, la velocidad del fluido y por tanto, el gasto se mantendrán constantes. Cuando la altura de fluido en el frasco h_0 es menor que h , la velocidad de salida v del fluido deja de ser constante. La velocidad de salida v puede modificarse subiendo o bajando el extremo inferior del tubo AB en el frasco.¹⁷

1.15 TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO

El tiempo de retención hidráulico es el tiempo promedio que se demoraría el fluido encruzar un cierto volumen fijo, es decir que para este caso, dicho tiempo se trata de cuánto tarda un partícula en recorrer la longitud del tanque decantador en sentido horizontal, desde el momento de su entrada al sistema. El tiempo de retención, se calcula a partir del gasto promedio, es decir:

$$Trh = \frac{V}{Q} \quad [9]$$

Dónde:

t : tiempo de retención en h

V: volumen del tanque en m³

Q: gasto promedio diario en m³/h

¹⁷Maroto, J. A, de Dios J., de las Nieves F. J. *Utilización de un frasco de Mariotte para el estudio experimental de la transición de régimen laminar a turbulento*. Revista Española de Física, Vol-13, nº 5, págs 42-47.

2. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE LOS CONDUCTOS

2.1 CONDUCTO DE SECCIÓN VARIABLE

El procedimiento de cálculo comenzó mediante la suposición de diferentes valores de velocidad en el orificio, de acuerdo a un rango pertinente (**ANEXO C**), luego se procedió a calcular los gradientes de velocidad correspondientes en los orificios; con el fin de observar su comportamiento y verificar que este se encuentre dentro de los parámetros establecidos, es decir alrededor de los 15 s^{-1} . Esto mediante la ecuación [10].

$$\text{Gradiente} = n * \sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} * \left(\frac{A}{P}\right)^{-0,67} * V^{1,5} \quad [10]$$

De donde;

n ; coeficiente de rugosidad para acrílico= 0,01 (**ANEXO A**)

Temperatura del agua = 17° C

Valor de $\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} = 2982,65$ para 17° C (**ANEXO B**)

Haciendo orificios de $\frac{1}{2}$ ", es decir de $\phi = 0,0127 \text{ m}$

Velocidad supuesta en los orificios = $0,05 \text{ m/s}$

Entonces, se tiene:

$$\begin{aligned} \text{Gradiente de velocidad en los orificios} &= 0,01 * 2982,65 * \left(\frac{\frac{1}{2} * 0,0254 \text{ m}}{4}\right)^{-0,67} \\ &= 15,41 \text{ s}^{-1} \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta el cumplimiento de este gradiente, se hizo el cálculo del caudal en el orificio, de acuerdo a la ecuación [11].

$$Q = V * A \quad [11]$$

Siendo el área;

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad [12]$$

Entonces, se tiene:

$$Q = 0,05 \frac{m}{s} * \left(\frac{\pi * \left(\frac{1}{2} * 0,0254 m \right)^2}{4} \right) = 0,0000063 \frac{m^3}{s}$$

Posteriormente, se supusieron diferentes cantidades de orificios y secciones iniciales de entrada del conducto, con el fin de calcular el caudal total, verificando, mediante iteraciones que tanto la velocidad como el gradiente en el conducto se encontraran dentro de los rangos pertinentes; es decir, 0,07 y 0,20 m/s y 30 s⁻¹ respectivamente.

Para este caso el número de orificios con que chequeo la velocidad y el gradiente fue de 48 (**ANEXO C**) distribuidos en los dos lados, a lo largo del conducto. De acuerdo a esto, entonces, el caudal total queda definido como:

$$\text{Caudal total} = 0,0000063 \frac{m^3}{s} * 48 \text{ orificios} = 0,00030 \frac{m^3}{s}$$

Luego con ese caudal total, el cálculo de la velocidad en el conducto, quedó definido mediante la ecuación [14], la cual fue despejada de la ecuación [11]. En donde el área considerada, fue la sección inicial del conducto de sección variable, según la ecuación [13].

Entonces, se tiene:

$$A = L^2 \quad [13]$$

$$Q = V * A; \text{ De donde } V = \frac{Q}{A} \quad [14]$$

Con el caudal total y el área inicial del conducto, se calcula la velocidad de la siguiente forma:

$$V = \frac{0,0003 \frac{m^3}{s}}{0,06 m * 0,06 m} = 0,084 \frac{m}{s}$$

Por último, el chequeo del gradiente en el conducto, quedó definido mediante la ecuación [10], es decir:

$$\begin{aligned} \text{Gradiente de velocidad en orificio} &= 0,01 * 2982,65 * (0,06 \text{ m} * 0,06 \text{ m})^{-0,67} * \\ &\left(0,084 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^{1,5} \\ &= 31,09 \text{ s}^{-1} \end{aligned}$$

2.1.1 Distribución de los orificios laterales. Teniendo las dimensiones del conducto de sección variable se prosiguió a hacer el cálculo de la distribución de los orificios laterales (*ANEXO C*), con un diámetro de ½” previamente calculado, en el metro de longitud dispuesto en el tanque decantador de placas inclinadas. Primero se calculó la separación (t) mediante la ecuación [15].

$$\text{Separación}(t) \left(\frac{\text{Longitud conducto}}{\frac{\text{Número de orificios}}{2}} \right) - \text{Diámetro orificio} \quad [15]$$

Entonces, se tiene:

$$\text{Separación (t)} = \left(\frac{1 \text{ m}}{\frac{48 \text{ orificios}}{2}} \right) - 0,0127 \text{ m} = 0,029 \text{ m}$$

Con el valor de t= 0,029 m, se calculó la distancia entre la pared y el primer orificio, según la ecuación [16]

$$\text{Distancia entre la pared y el primer orificio} = \frac{\text{Diámetro orificio}}{2} + \frac{t}{2} \quad [16]$$

Entonces, se tiene:

$$\begin{aligned} \text{Distancia entre la pared y el primer orificio} &= \frac{0,0127 \text{ m}}{2} + \frac{0,029 \text{ m}}{2} \\ &= 0,021 \text{ m} \end{aligned}$$

Luego se calculó la separación centro a centro entre orificios, de acuerdo a la ecuación [17]

$$\text{Separación centro a centro entre orificios} = \text{Diámetro orificio} + t \quad [17]$$

Por lo tanto:

$$\text{Separación centro a centro entre orificios} = 0,0127 \text{ m} + 0,029 \text{ m} = 0,042 \text{ m}$$

Finalmente, se chequeó que el número de orificios calculado este de acuerdo a la longitud dispuesta, mediante la ecuación [18].

$$\begin{aligned} \text{Chequeo} &= \text{Distancia entre la pared y el primer orificio} * 2 \\ &+ \text{Separación centro a centro entre orificios} * 23 \end{aligned} \quad [18]$$

$$\text{Chequeo} = 0,021 \text{ m} * 2 + 0,042 \text{ m} * 23 = 1 \text{ m}$$

2.2 CONDUCTO DE SECCIÓN CONSTANTE

Con el caudal obtenido en el cálculo del conducto de sección variable, se supuso una velocidad en el conducto de sección constante; con el fin de poder calcular el área de su sección inicial, según la ecuación [19], la cual fue despejada de la ecuación [11].

Caudal obtenido en el cálculo de la sección variable = 0,00030 m³/s

Velocidad supuesta en el conducto de sección constante = 0,079 m/s

$$Q = V * A; \text{ De donde } A = \frac{Q}{V} \quad [19]$$

Entonces, se tiene:

$$A = \frac{0,00030 \text{ m}^3/\text{s}}{0,079 \text{ m/s}} = 0,0038 \text{ m}^2$$

Luego se despejó dicha sección, de acuerdo a la ecuación [20], la cual fue despejada de la ecuación [13], es decir;

$$A = L^2; \text{ De donde } L = \sqrt{A} \quad [20]$$

Entonces, se tiene:

$$L = \sqrt{0,0038 \text{ m}^2} = 0,062 \text{ m}$$

Luego se supuso la velocidad en los orificios, con el fin de poder calcular su área, según la ecuación [19], es decir;

Velocidad supuesta en los orificios = 0,05 m/s

$$A = \frac{Q}{V} = \frac{0,0003 \text{ m}^3/\text{s}}{0,05 \text{ m/s}} = 0,006 \text{ m}^2$$

Se dividió el área de los orificios entre 2, teniendo en cuenta que son dos los lados del conducto en donde van ubicados estos, o sea;

$$\frac{A}{2} = \frac{0,006 \text{ m}^2}{2} = 0,003 \text{ m}^2$$

Conociendo el área total de los orificios por cada lado y adoptando como diámetro del orificio $\frac{1}{2}$ ", se calculó el número que le correspondía a cada uno, usando la ecuación [21]

$$N = \frac{A_c * 4}{\pi * D^2} \quad [21]$$

Entonces, se tiene:

Haciendo orificios de $\frac{1}{2}$ ", es decir de $\phi = 0,0127 \text{ m}$

$$N = \frac{0,003 * 4}{\pi * 0,0127^2} = 24 \text{ orificios}$$

Por último, se calcularon los gradientes de velocidad tanto en el conducto como en el orificio, de acuerdo a la ecuación [10], es decir;

$$\text{Gradiente de velocidad en orificio} = 0,01 * 2982,65 * \left(\frac{\frac{1}{2} * 0,0254}{4}\right)^{-0,67} * \left(0,05 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^{1,5}$$

$$\text{Gradiente de velocidad en orificio} = 15,40 \text{ s}^{-1}$$

$$\text{Gradiente de velocidad en el conducto} = 0,01 * 2982,65 * (0,055 \text{ m} * 0,055 \text{ m})^{-0,67}$$

$$* \left(0,079 \frac{\text{m}}{\text{seg}}\right)^{1,5} = 31,60 \text{ s}^{-1}$$

Luego de ser calculados, se debe comprobar que estos valores se encuentren alrededor de 15 s^{-1} y 30 s^{-1} respectivamente¹⁸. Si es así, se da por finalizado el cálculo, de lo contrario se replantearán las velocidades, el diámetro de los orificios laterales o en su defecto la sección del conducto. Los datos obtenidos mediante este procedimiento se resumen en el **ANEXO D**.

2.2.1 Distribución de los orificios laterales. Teniendo en cuenta que la longitud disponible en el tanque decantador era igual para los dos tipos de conductos, el cálculo de la distribución de los laterales fue el mismo.

¹⁸Ingersoll A., McKee, J., Brooks, N.Y., (Jan 1955) "Fundamental concepts of rectangular settling tanks" Proc. ASCE, Vol. 81, p. 590-1 pág. 83-89.

3. CONSTRUCCIÓN DE LOS CONDUCTOS

La construcción de los canales se llevó a cabo en un taller, con la asesoría de un maestro que contaba con experiencia en la manipulación del acrílico y las herramientas necesarias para su trabajo. Teniendo los planos dibujados de acuerdo al diseño, se comenzó a trazar las diferentes medidas en la lámina, después se procedió al corte de las piezas necesarias para formar los conductos, luego haciendo uso de un taladro con broca de $\frac{1}{2}$ ", se realizaron las perforaciones de sus tapas laterales, para obtener los 48 orificios en toda la sección. Posteriormente, se unieron las respectivas piezas usando cloruro de metileno, finalmente, se pulió la superficie de cada conducto y se los ensayó con agua con el objetivo de verificar que no existiera ninguna fisura y así evitar posibles filtraciones.

3.1 MATERIALES UTILIZADOS:

- Lámina de acrílico.
- Cloruro de metileno

3.2 HERRAMIENTAS – EQUIPOS UTILIZADOS:

- Metro
- Escuadra
- Taladro
- Máquina para cortar de disco.

FIGURA 7. Conducto de sección variable.



FIGURA 6. Conducto de sección constante



4. ETAPA EXPERIMENTAL

4.1 ENSAYOS EN LA PLANTA PILOTO

4.1.1 Ensayos en condiciones de escurrimiento libre. La investigación inicial se pretendía efectuar en primera instancia en la planta piloto No. 1 (*Figura 8*), lo cual fue plasmado en el proyecto, pero una vez construidos los canales y al momento de la realizar los respectivos acoples, se observó que la toma de datos se iba a ver afectada ya que la planta no contaba con el área suficiente, por lo que fue conveniente trasladar los canales a otra planta piloto (*Figura 9*), la cual facilitaba condiciones como la graduación del caudal de entrada mediante una llave de paso, y su aforo mediante el uso de un vertedero.

En esta planta piloto, se efectuaron los primeros ensayos para la comparación de la distribución del agua en los dos tipos de conductos, estos se trabajaron con caudales bajos para evaluar su comportamiento en condiciones de escurrimiento libre.

FIGURA 9. Planta piloto # 1.



FIGURA 8. Planta piloto #2



4.1.1.1 Adaptación de los canales a la planta piloto. Para el desarrollo de los ensayos, fue necesario efectuar un acondicionamiento a la planta piloto, con el fin de hacer el ensamble de cada conducto, se realizaron cambios de accesorios como uniones, bujes, codos. Además, se adaptó una bomba con una potencia mayor que pudiera mantener la carga constante.

En cuanto a los conductos se requirió la construcción de unas transiciones en acrílico en forma de tronco de pirámide, para que el cambio de sección de tubular a rectangular no se hiciera de manera brusca y afecte la entrada del flujo al conducto (*Figura 11*).

FIGURA 10. Ajustes hechas a la planta piloto



FIGURA 11. Transiciones en acrílico



FIGURA 10. Transiciones y accesorios acoplados a uno de los conductos



4.1.1.2 Procedimientos para la toma de datos. Con el montaje listo en la planta piloto, se comenzó la realización de los ensayos en el laboratorio. Dichos ensayos consistieron en el uso del método volumétrico que es la forma más sencilla de calcular caudales pequeños, el proceso consistió en la toma directa del tiempo que se tardaba cada orificio en llenar un recipiente de volumen conocido, con la ayuda de un cronómetro y una probeta, se optó por aforar tres veces cada punto ya que la variación entre diversas mediciones efectuadas sucesivamente dará una indicación de la precisión de los resultados.

Estas mediciones se efectuaron con una carga constante, graduando tres veces el caudal, con 0,5, 1, y 1,5 l/s Este procedimiento se realizó con el conducto de sección constante y variable.

Los datos obtenidos se ordenaron de acuerdo al tipo de caudal, indicando para cada orificio la cantidad aforada en (ml), tal como se muestran en el **ANEXO E** en donde se plasmaron los valores recogidos con el conducto de sección constante y variable respectivamente.

4.1.1.3 Análisis de resultados en condiciones de escurrimiento libre. Los análisis de los datos obtenidos en las condiciones de escurrimiento libre, se realizaron en dos etapas: La primera consistió en una serie de gráficas que representan el comportamiento de la distribución del flujo a través de los orificios y la interpretación de lo observado en cada ensayo, y la segunda en un análisis estadístico.

En la primera etapa, se calculó el caudal en cada orificio, para cada tipo de sección y caudal ensayados, en la **Tabla 1**, se indican los resultados para el

conducto de sección constante y variable, posteriormente los valores obtenidos se representaron mediante diagramas de barras, graficando en las ordenadas los caudales en (l/s) y en las abscisas las distancias en centímetros de la ubicación de los orificios.

TABLA 1. Valores de Caudales obtenidos en cada orificio para los dos tipos de sección en condiciones de escurrimiento libre.

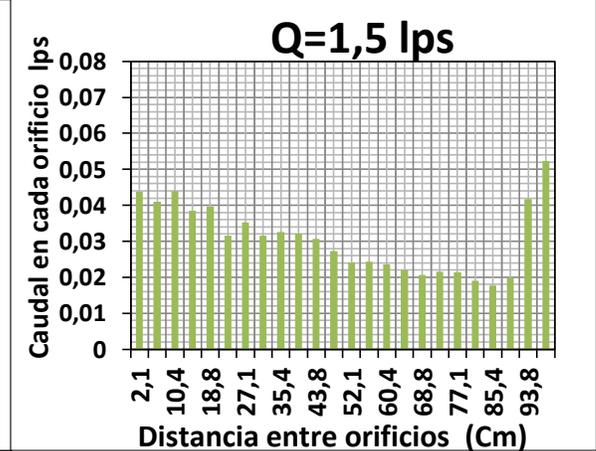
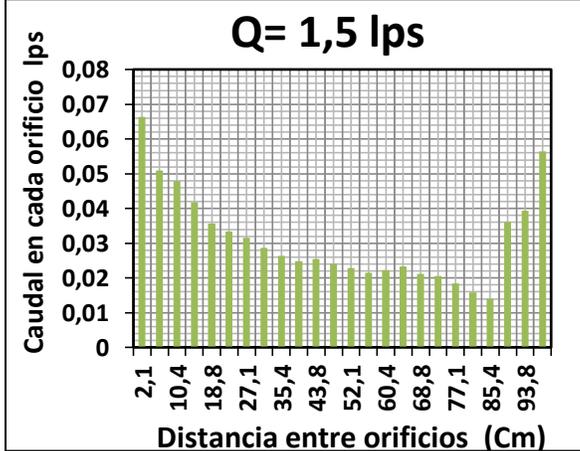
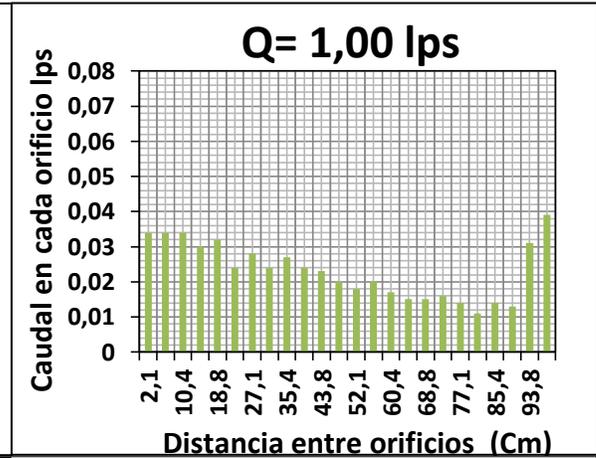
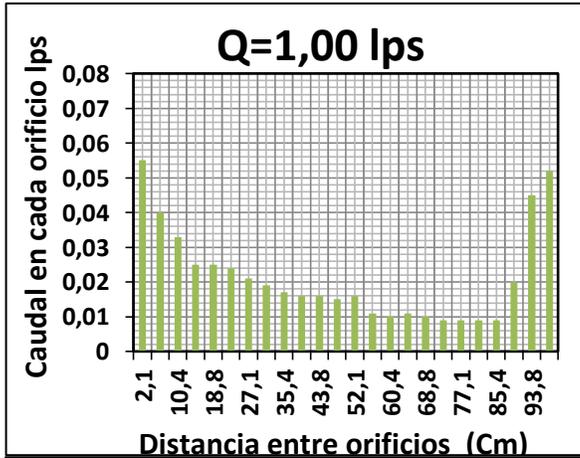
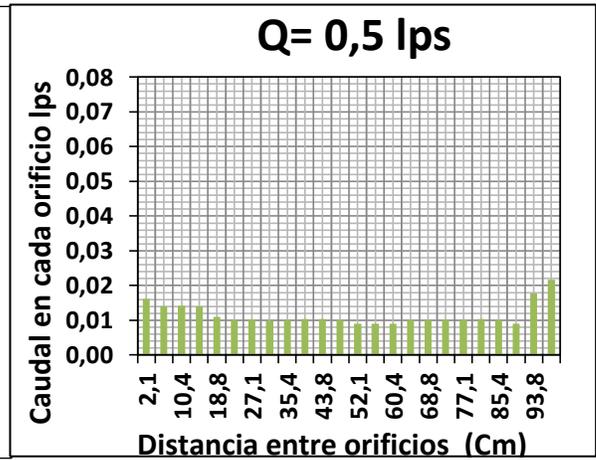
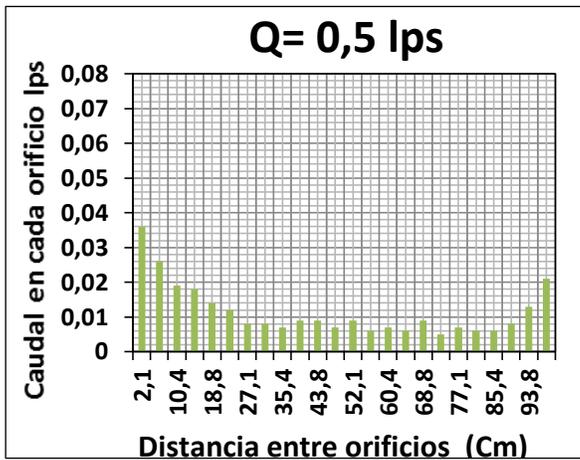
Nº ORIFICIO	SECCIÓN CONSTANTE			SECCIÓN VARIABLE		
	Q= 0,5 lps	Q= 1,00 lps	Q= 1,5 lps	Q= 0,5 lps	Q= 1,00 l/s	Q= 1,5 lps
	CAUDAL (lps)			CAUDAL (lps)		
1	0,036	0,055	0,066	0,016	0,034	0,044
2	0,026	0,04	0,051	0,014	0,034	0,040
3	0,019	0,033	0,048	0,014	0,034	0,040
4	0,018	0,025	0,042	0,014	0,030	0,040
5	0,014	0,025	0,036	0,011	0,032	0,040
6	0,012	0,024	0,033	0,010	0,024	0,040
7	0,008	0,021	0,032	0,010	0,028	0,040
8	0,008	0,019	0,029	0,010	0,024	0,030
9	0,007	0,017	0,026	0,010	0,027	0,030
10	0,009	0,016	0,025	0,010	0,024	0,030
11	0,009	0,016	0,025	0,010	0,023	0,030
12	0,007	0,015	0,024	0,010	0,020	0,030
13	0,009	0,016	0,023	0,009	0,018	0,020
14	0,006	0,011	0,022	0,009	0,020	0,020
15	0,007	0,01	0,022	0,009	0,017	0,020
16	0,006	0,011	0,023	0,010	0,015	0,020
17	0,009	0,01	0,021	0,010	0,015	0,020
18	0,005	0,009	0,021	0,010	0,016	0,020
19	0,007	0,009	0,018	0,010	0,014	0,020
20	0,006	0,009	0,016	0,010	0,011	0,020
21	0,006	0,009	0,014	0,010	0,014	0,020
22	0,008	0,02	0,036	0,009	0,013	0,020
23	0,013	0,045	0,039	0,018	0,031	0,040
24	0,021	0,052	0,056	0,022	0,039	0,050

Las gráficas que representan los valores obtenidos en la **Tabla 1**, se indican a continuación.

SECCIÓN CONSTANTE



SECCIÓN VARIABLE



4.1.1.4 Análisis de las gráficas. Mediante la observación de las gráficas correspondientes a cada conducto, se evidencia que la distribución del flujo en la parte inicial del conducto de sección constante, presenta unos picos altos de caudal en comparación con el resto de flujo distribuido a lo largo del mismo, mientras que para las mismas condiciones, en el conducto de sección variable, el paso del flujo desde la entrada al resto del conducto se hace de manera más uniforme.

También se observa que para los dos tipos de conducto se origina un resalto hidráulico, producto del choque de la masa líquida con la pared final del conducto, esto ocasiona un aumento en la altura de la lámina de agua sobre los orificios finales que a su vez producen el incremento del caudal en esta zona. Este fenómeno es más notorio en el conducto de sección constante que en el variable.

Como se puede constatar en las gráficas, la distribución del flujo en el conducto de sección variable es más uniforme que el de sección constante, esta afirmación también se puede evidenciar en el análisis estadístico que se presenta a continuación.

4.1.1.5 Análisis estadístico. Con el fin de llevar a cabo el análisis en esta etapa, fue necesario implementar un programa estadístico conocido como SPSS, por sus siglas en inglés que significan Paquete Estadístico para las Ciencias Sociales. Este programa sirve para estudiar el efecto de uno o más factores, en el comportamiento de una variable en un grupo de sujetos, en el que tanto los factores como las variables pueden tener diferentes niveles.

El objetivo de este caso se centró en averiguar si existieron diferencias de una variable (uniformidad de la distribución del flujo), dependiendo de dos factores, el caudal, con tres niveles (0,5 lps; 1,00 lps; 1,5 lps) y el tipo de sección del conducto con dos niveles (constante, variable).

Lo primero que se hizo fue obtener la desviación estándar de los datos tomados en los ensayos, para luego ingresarlos en el programa. A continuación, se presenta una serie de tablas con los resultados basados en las especificaciones que el programa tiene establecidas por defecto.

TABLA 2. Contrastes multivariados

Efecto	Significancia
CAUDAL	0,019
SECCIÓN	0,033
CAUDAL*SECCIÓN	0,027

La **Tabla 2**, prueba la incidencia de los factores en la variable (uniformidad de la distribución del flujo), en otras palabras, analiza la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los datos evaluados, es decir que el valor en la casilla denominada significancia sea menor que 0,050; para este caso, tanto los factores como su interacción arrojaron valores menores a 0,05, por lo tanto, se concluye que estos influyeron en el grado de uniformidad de la distribución. Teniendo en cuenta esto, se prosigue a interpretar las siguientes tablas, las cuales indican el valor de las medias correspondientes a las desviaciones estándar para los niveles de cada factor; en donde un valor bajo representa variaciones pequeñas de los datos con respecto a su media aritmética.

TABLA 3. Medias estimadas (factor caudal)

Caudal	Media
1 (0,5 lps)	0,003
2 (1,00 lps)	0,005
3 (1,5 lps)	0,005

La **Tabla 3**, analiza los niveles del factor **caudal**. De acuerdo a esto, el valor más bajo se presentó con el caudal de 0,5 lps, por consiguiente, los mejores resultados en cuanto a la uniformidad de la distribución del flujo, mientras que con los caudales de 1 y 1,5 lps obtuvieron valores más altos, sin variaciones entre sí.

TABLA 4. Medias estimadas (factor sección)

Sección	Media
Constante	0,005
Variable	0,003

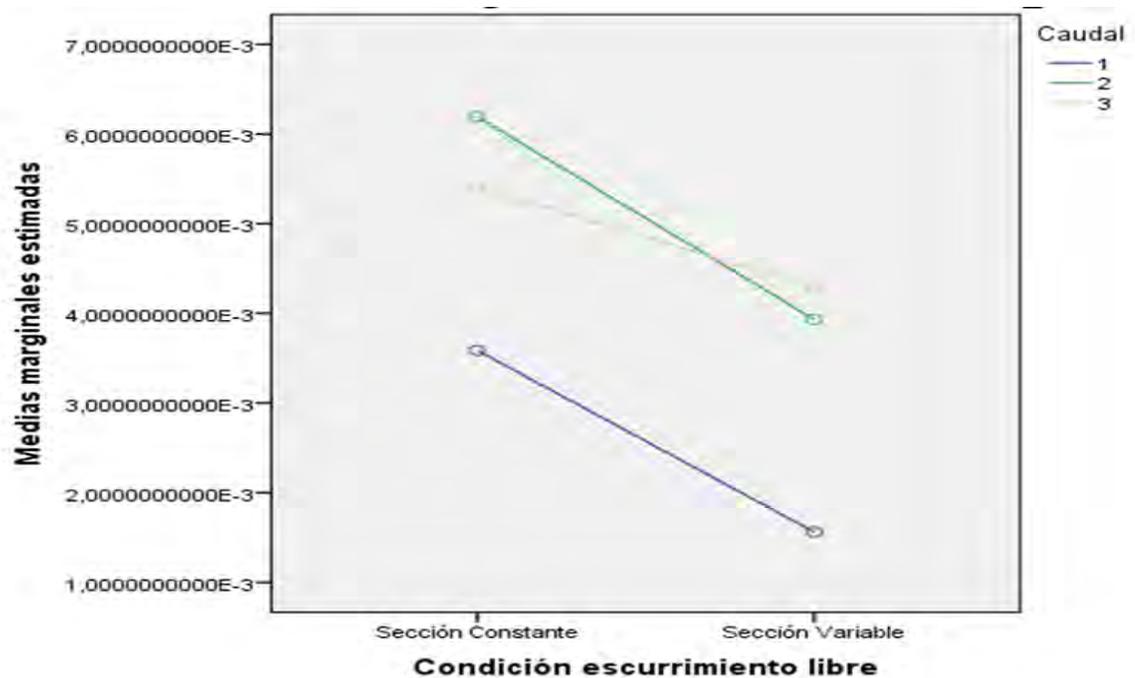
La **Tabla 4**, analiza los niveles del factor **sección**, en donde el valor más bajo se presentó con el conducto de sección variable, es decir que con esta sección se consiguió una buena uniformidad en la distribución.

A continuación se presenta la **Tabla 5**, en la cual se muestra la interacción entre los tipos de canal y los caudales; resultando como mejor opción el canal de sección variable puesto que con los tres caudales arrojó los menores valores de la media en comparación al conducto de sección constante, presentándose el mejor comportamiento con el caudal de 0,05 l/seg.

TABLA 5. Interacción sección - caudal

Condición escurrimiento libre	Caudal	Media
sección constante	1	0,004
	2	0,006
	3	0,005
sección variable	1	0,002
	2	0,004
	3	0,004

FIGURA 11. Gráfico de perfil representando el efecto de la interacción caudal-sección



El gráfico de perfil muestra un resumen del análisis estadístico, en él se puede observar la interacción que hay entre el tipo de caudal y sección, en la obtención de datos cuyos valores de medias sean relativamente bajos, para realizar la lectura en la gráfica hay que tener en cuenta que el número 1 hace referencia al caudal de 0,5 lps, el 2 y 3 al caudal de 1,00 y 1,5 lps respectivamente, como se puede observar en este gráfico se evidencia que los valores más bajos se obtuvieron con el conducto de sección variable para los tres tipos de caudal, obteniéndose el mejor comportamiento con el caudal de 0,5 lps, seguido del caudal de 1,00 lps y por último con el caudal de 1,5 lps

4.2 ENSAYOS DE LABORATORIO EN EL BANCO DE PRUEBAS.

4.2.1 Ensayos en condiciones de presión. Finalizados los ensayos en la planta piloto con los conductos de sección constante y variable, en donde se determinó cuál de las dos secciones realizó de mejor manera la distribución del flujo, en condiciones de escurrimiento libre. Se continuó con los siguientes análisis que consistieron en llevar a cabo los ensayos en condiciones de presión, es decir a conducto lleno. Para esto fue necesario aumentar la carga y de esta forma el caudal, por lo tanto, se optó por cambiar el sitio de los ensayos, de la planta piloto al banco de pruebas.

FIGURA 12. Conducto adaptado al banco de pruebas



4.2.1.1 Adaptación de los conductos al banco de pruebas. Para la realización de los ensayos, se hicieron los respectivos cambios de accesorios para hacer el acople de los conductos al banco de pruebas, para este caso se utilizaron las mismas transiciones en acrílico ya que al tubería principal de entrada del flujo también era de 2”.

4.2.1.2 Procedimiento para la toma de datos. Con el montaje listo en el banco de pruebas, se repitió el procedimiento para la toma de datos hecho en condiciones de escurrimiento libre, con caudales de 5 lps y 6,8 lps, con los cuales se logró conseguir que los conductos trabajaran a presión. Esto con el fin de hacer una comparación del comportamiento de la distribución del flujo a través de los conductos bajo diferentes condiciones de trabajo.

Los datos obtenidos se ordenaron de acuerdo al tipo de caudal, indicando para cada orificio la cantidad aforada en (ml), tal como se muestran en el **ANEXO F**, en donde se indican los valores recogidos con el conducto de sección constante y variable respectivamente.

4.2.1.3 Resultados de los ensayos en condiciones de presión. Los Análisis a los datos obtenidos en las condiciones de presión, se los realizó en las mismas etapas que en los de condición a escurrimiento libre.

En la **Tabla 6**, se indican los resultados para el conducto de sección constante y variable, posteriormente los valores obtenidos se representaron mediante diagramas de barras.

TABLA 6. Valores de caudales obtenidos en cada orificio para los dos tipos de sección en condiciones de presión.

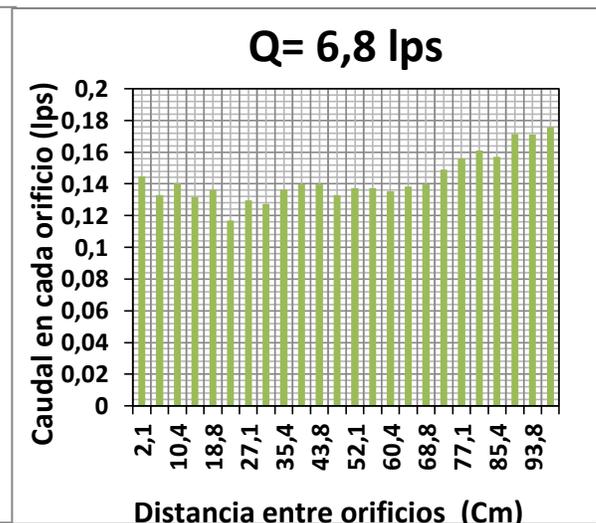
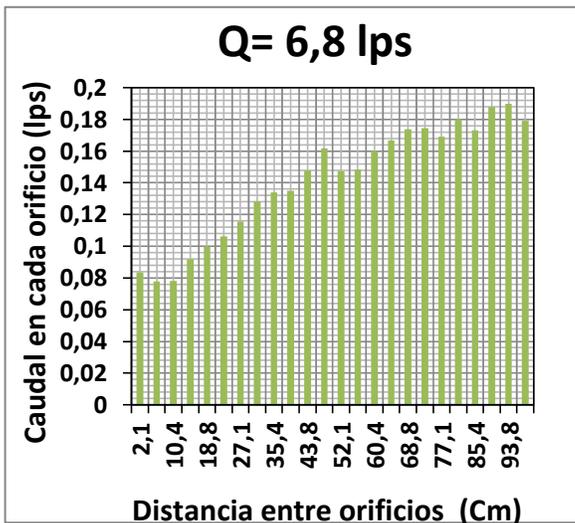
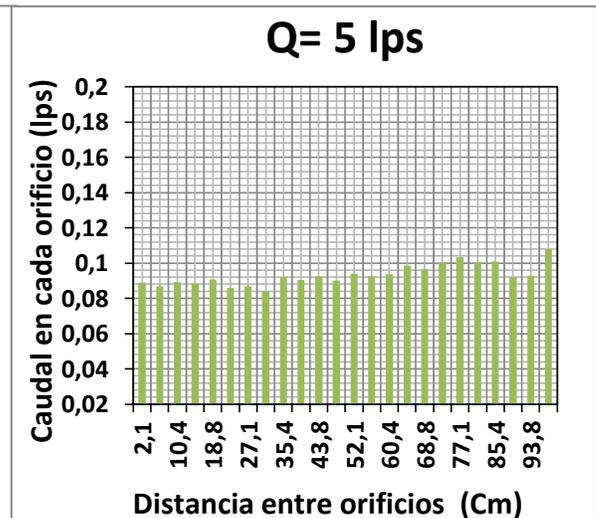
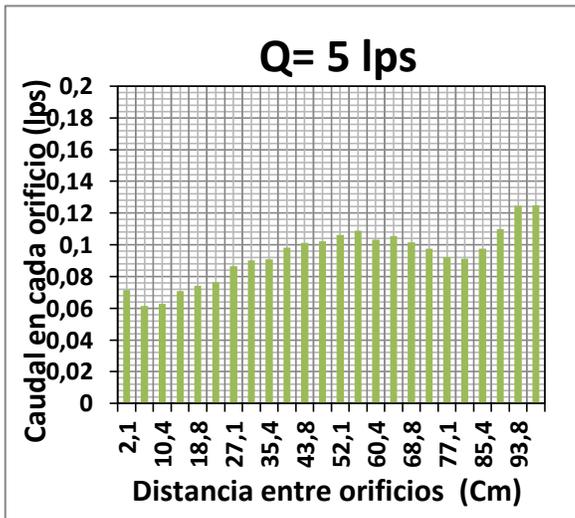
Nº ORIFICIO	SECCIÓN CONSTANTE		SECCIÓN VARIABLE	
	Q= 5 lps	Q= 6,8 lps	Q= 5 lps	Q= 6,8 lps
	CAUDAL (lps)		CAUDAL (lps)	
1	0,0715	0,083	0,089	0,145
2	0,0614	0,078	0,087	0,133
3	0,0628	0,078	0,089	0,140
4	0,0709	0,092	0,088	0,131
5	0,0741	0,100	0,091	0,136
6	0,0765	0,106	0,086	0,117
7	0,0866	0,116	0,087	0,129
8	0,0900	0,128	0,084	0,127
9	0,0907	0,134	0,092	0,136
10	0,0983	0,135	0,090	0,140
11	0,1011	0,148	0,093	0,140
12	0,1021	0,162	0,090	0,133
13	0,1061	0,147	0,094	0,137
14	0,1089	0,148	0,092	0,137
15	0,1030	0,160	0,094	0,135
16	0,1057	0,167	0,099	0,138
17	0,1016	0,174	0,096	0,140
18	0,0976	0,174	0,100	0,149
19	0,0922	0,169	0,103	0,156
20	0,0913	0,180	0,100	0,161
21	0,0976	0,173	0,101	0,157
22	0,1098	0,188	0,092	0,172
23	0,1246	0,190	0,093	0,171
24	0,1250	0,179	0,108	0,176

Las gráficas que representan los valores obtenidos en la **Tabla 10**, se indican a continuación.

SECCIÓN CONSTANTE



SECCIÓN VARIABLE



4.2.1.4 Análisis de las gráficas. El desempeño del conducto de sección constante en condiciones de presión fue mucho mejor que a escurrimiento libre, ya que no se originó el resalto hidráulico en la parte final, sin embargo, en las gráficas se puede observar que la distribución del flujo en la parte inicial presentó valores de caudales bajos los cuales se incrementaron en el resto del conducto pero de manera inequitativa.

Al igual que el conducto de sección constante, el variable también tuvo una notable mejoría en la distribución, debido a la ausencia del resalto hidráulico. Observando las respectivas gráficas se puede evidenciar que en comparación con el otro tipo de canal hay una mayor uniformidad.

Además, es importante resaltar que debido a que la variación de la sección del conducto se hizo de forma gradual y sin utilizar ningún tipo de accesorio, no se presentaron cambios bruscos en la distribución del caudal a lo largo de este.

4.2.1.5 Análisis estadístico. El objetivo de este caso fue analizar si existieron o no, diferencias en condiciones de presión, en una variable (uniformidad de la distribución del flujo), teniendo en cuenta dos factores, con dos niveles cada uno, el caudal (5 lps; y 6,8 lps) y el tipo de sección del conducto (constante, variable).

Lo primero que se hizo fue obtener la desviación estándar de los datos tomados en los ensayos, para luego ingresarlos en el programa. A continuación, se presenta una serie de tablas con los resultados basados en las especificaciones que el programa tiene establecidas por defecto.

TABLA 7. Contrastes multivariados

Efecto	Significancia
CAUDAL	0,004
SECCIÓN	0,044
CAUDAL*SECCIÓN	0,008

La **Tabla 7**, prueba la incidencia de los factores en la variable (uniformidad de la distribución del flujo), si el valor en la casilla de significancia es menor que 0,050, existen diferencias significativas, para este caso, tanto los factores como su interacción arrojaron valores menores a 0,05, por lo tanto se concluye que estos influyeron en el grado de uniformidad de la distribución, para esta condición. Teniendo en cuenta esto, se prosigue a interpretar las siguientes tablas, las cuales indican el valor de las medias correspondientes a las desviaciones estándar para los niveles de cada factor, en donde un valor bajo representa variaciones pequeñas de los datos con respecto a su media aritmética.

TABLA 8. Medias estimadas (factor caudal)

Caudal	Media
1 (5 lps)	0,005
2 (6,8 lps)	0,009

La **Tabla 8**, analiza los niveles del factor **caudal**. De acuerdo a esto, el valor más bajo se presentó con el caudal de 5 lps, por consiguiente, los mejores resultados en cuanto a la uniformidad de la distribución del flujo, mientras que con el caudal de 6,8 lps se obtuvo un valor más alto, por lo tanto una distribución menos uniforme.

TABLA 9. Medias estimadas (factor sección)

Sección	Media
Constante	0,008
Variable	0,006

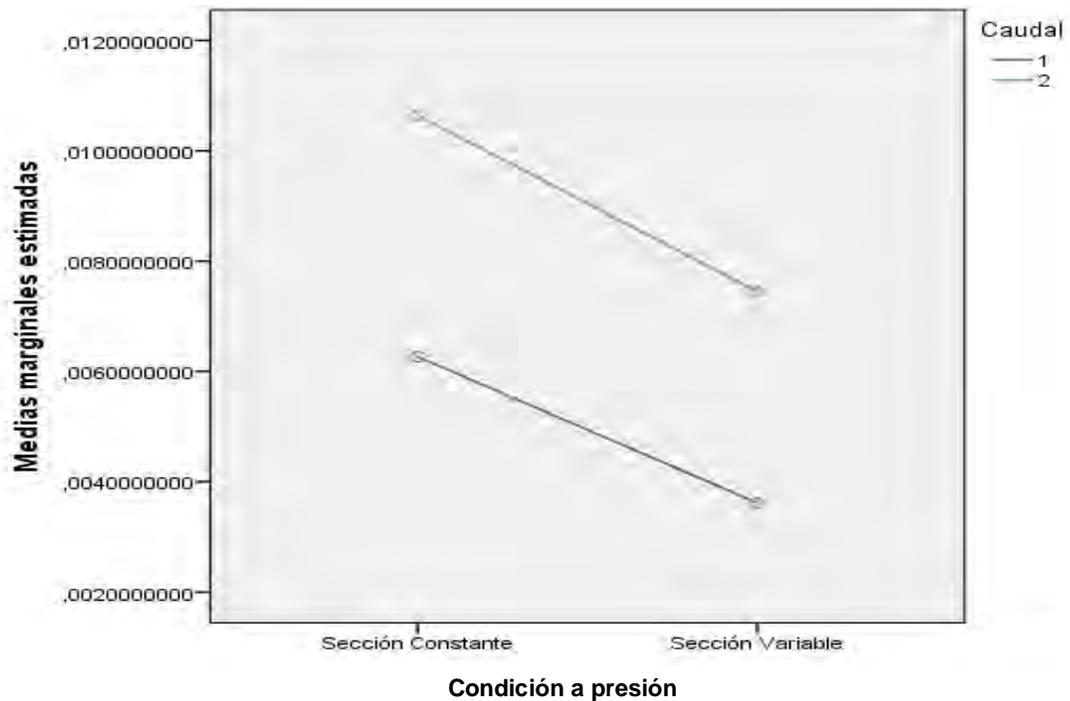
La **Tabla 9**, analiza los niveles del factor **sección**, en donde el valor más bajo se presentó con el conducto de sección variable, es decir que con esta sección se consiguió una buena uniformidad en la distribución.

A continuación, se presenta la **Tabla 10**, en la cual se muestra la interacción entre los tipos de canal y los caudales; resultando como mejor opción el canal de sección variable puesto que con los dos caudales arrojó los menores valores de la media en comparación al conducto de sección constante, presentándose el mejor comportamiento con el caudal 1 (5 lps.)

TABLA 10. Interacción sección – caudal

Condición a presión	Caudal	Media
Sección Constante	1	0,006
	2	0,011
Sección Variable	1	0,004
	2	0,007

FIGURA 13. Gráfico de perfil representando el efecto de la interacción *caudal-sección (condición presión)*



El gráfico de perfil muestra un resumen del análisis estadístico, en él se puede observar la interacción que hay entre el tipo de caudal y el tipo de sección, en la obtención de datos cuyos valores de medias sean relativamente bajos, para realizar la lectura en la gráfica hay que tener en cuenta que el número 1 hace referencia al caudal de 5 lps, el 2 al caudal de 6,8 lps respectivamente, como se puede observar en este gráfico se evidencia que los valores más bajos se obtuvieron con el conducto de sección variable para los dos tipos de caudal, obteniéndose el mejor comportamiento con el caudal de 5 lps, seguido del caudal de 6,8 lps.

4.2.2 Ensayos con tubería en condiciones de presión. Para complementar la investigación también se analizó el efecto de la distribución del flujo con el uso de tubería, para tal fin se construyeron dos conductos, uno de sección constante y el otro de sección variable. En la construcción del conducto de sección constante se usó un tubo de 3/4" mientras que el de sección variable consistió en el uso de tramos de tubería de diferente diámetro 1"-3/8"-1/2" Las pruebas realizadas con la tubería de sección variable se desarrollaron de dos maneras, la primera haciendo la entrada del flujo por la sección de mayor y luego por la de menor diámetro, esto con el objetivo de analizar el comportamiento de la distribución en ambos casos, además de la sección constante. Todos los ensayos se realizaron con tres caudales: 0,5 lps 1,00 lps; y 1,5 lps.

Los datos obtenidos se ordenaron de acuerdo al tipo de caudal, indicando para cada orificio la cantidad aforada en (ml), tal como se muestran en el **ANEXO G**, en donde se indican los valores recogidos con la tubería de sección constante, sección variable de mayor a menor y sección variable de menor a mayor, respectivamente.

4.2.2.1 Resultados de los ensayos con tubería en condiciones de presión. Los análisis se hicieron de igual manera que los realizados con los conductos.

En la **Tabla 11**, se indican los resultados del cálculo del caudal para la tubería de sección constante y en la **Tabla 12**, los de sección variable de mayor a menor y viceversa, posteriormente los valores obtenidos se representaron mediante diagramas de barras, graficando en las ordenadas los caudales en (lps) y en las abscisas, las distancias en centímetros de la ubicación de los orificios.

TABLA 11. Valores de caudales obtenidos en cada orificio para la tubería de sección constante en condiciones de presión.

Nº ORIFICIO	TUBERIA SECCIÓN CONSTANTE		
	Q= 0,5 lps	Q= 1,00 lps	Q= 1,5 lps
	Caudal lps		
1	0,017	0,034	0,051
2	0,017	0,035	0,047
3	0,017	0,033	0,049
4	0,020	0,040	0,053
5	0,021	0,041	0,054
6	0,024	0,045	0,060
7	0,025	0,049	0,066
8	0,027	0,051	0,069
9	0,029	0,055	0,076
10	0,029	0,056	0,084
11	0,030	0,056	0,089

TABLA 12. Valores de caudales obtenidos en cada orificio para la tubería de sección variable en condiciones de presión.

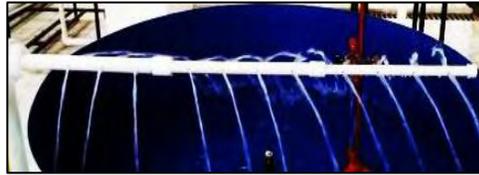
Nº ORIFICIO	TUBERÍA SECCIÓN VARIABLE					
	DE MAYOR A MENOR			DE MENOR A MAYOR		
	Q= 0,5 lps	Q= 1,00 lps	Q= 1,5 lps	Q= 0,5 lps	Q= 1,00 lps	Q= 1,5 lps
	Caudal lps			Caudal lps		
1	0,024	0,048	0,069	0,011	0,020	0,020
2	0,021	0,045	0,068	0,011	0,014	0,016
3	0,028	0,054	0,079	0,010	0,014	0,015
4	0,020	0,040	0,059	0,012	0,045	0,049
5	0,022	0,042	0,061	0,019	0,047	0,052
6	0,025	0,046	0,069	0,020	0,048	0,055
7	0,027	0,051	0,078	0,025	0,053	0,059
8	0,018	0,037	0,057	0,027	0,059	0,067
9	0,019	0,040	0,061	0,029	0,063	0,070
10	0,022	0,047	0,067	0,029	0,064	0,069
11	0,024	0,049	0,068	0,030	0,068	0,071

A continuación, se indican las gráficas para la tubería de sección constante y variable en sus dos tipos.

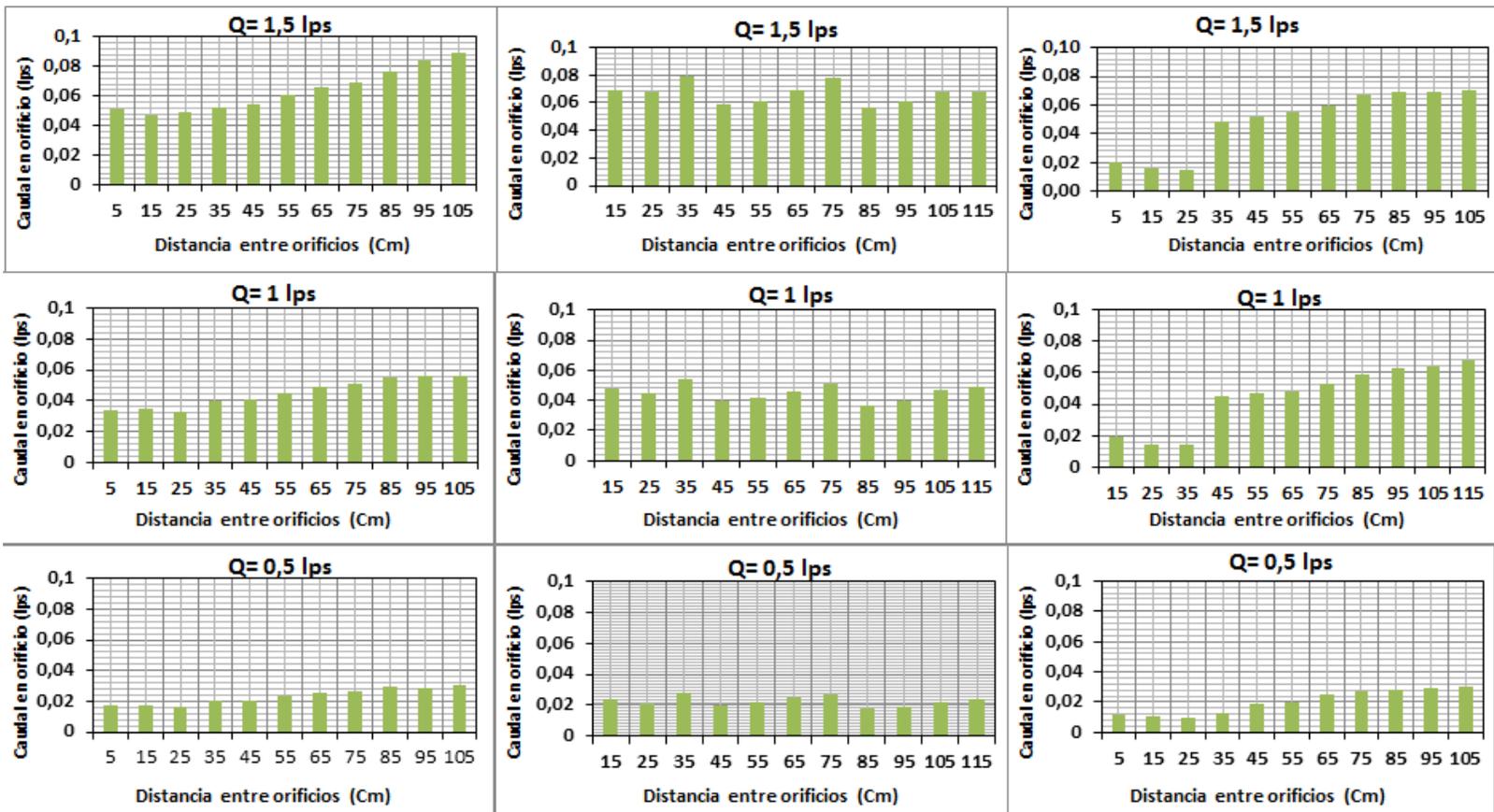
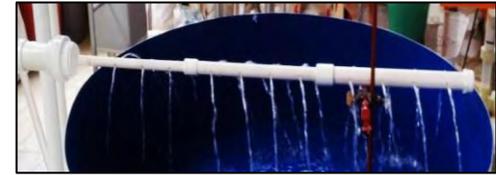
TUBERÍA SECCIÓN CONSTANTE



TUBERÍA SECCIÓN VARIABLE (Menor-Mayor)



TUBERÍA SECCIÓN VARIABLE (Mayor-Menor)



4.2.2.2 Análisis de las gráficas. En las pruebas hechas con tuberías de diferente diámetro utilizando tubos de 1", $\frac{3}{4}$ " y $\frac{1}{2}$ ", era evidente que debido al uso de accesorios para hacer los cambios de sección como es el caso de uniones y bujes soldados, se presentó una disminución del caudal debido a la pérdida de energía, lo que se puede observar en las respectivas gráficas mediante los ascensos y descensos que representan la demanda de caudal antes y después de la ubicación del accesorio, respectivamente. Esto sirve de apoyo para afirmar que no es conveniente trabajar con secciones variables circulares sino rectangulares, en donde la variación sea de forma gradual.

Al ensayar la sección variable con tubería, haciendo el acople en la entrada con el tubo de menor diámetro de la sección, es decir $\frac{1}{2}$ ", si bien las pérdidas por el uso de accesorios no fueron muy evidentes como en el caso anterior, si hubo una distribución inequitativa al comienzo del conducto que poco a poco se fue recuperando.

De acuerdo a los resultados obtenidos utilizando el conducto circular de sección constante con un diámetro de $\frac{3}{4}$ ", se concluye que en estas condiciones la distribución se presentó en forma desproporcional en comparación con el de sección variable, teniendo en cuenta que a medida que el caudal avanzaba a lo largo del conducto, la salida del flujo iba aumentando equitativamente, es decir que al principio de la estructura había menos caudal que al final, ocasionando así una mala distribución. En el caso del conducto circular de sección variable en las mismas circunstancias, hubo una mejor distribución del flujo considerando que si analizamos las respectivas gráficas, evidentemente existen ascensos y descensos, pero de forma gradual.

4.2.2.3 Análisis estadístico. El objetivo de este caso fue analizar si existieron o no, diferencias en condiciones de presión, utilizando tubería, en una variable (uniformidad de la distribución del flujo), teniendo en cuenta tres factores, con tres niveles cada uno, el caudal (0,5 lps, 1,00 lps y 1,5 lps) y el tipo de sección de la tubería (constante, variable de mayor a menor y variable de menor a mayor).

Lo primero que se hizo fue obtener la desviación estándar de los datos tomados en los ensayos, para luego ingresarlos en el programa. A continuación, se presenta una serie de tablas con los resultados basados en las especificaciones que el programa tiene establecidas por defecto.

TABLA 13. Contrastes multivariados

Efecto	Significancia
CAUDAL	0,003
SECCIÓN	0,001
CAUDAL*SECCIÓN	0,001

La **Tabla 13**, prueba la incidencia de los factores en la variable (uniformidad de la distribución del flujo), si el valor en la casilla de significancia es menor que 0,050, existen diferencias significativas, para este caso, tanto los factores como su interacción arrojaron valores menores a 0,05, por lo tanto se concluye que estos influyeron en el grado de uniformidad de la distribución, para esta condición y con el uso de tubería. Teniendo en cuenta esto, se prosigue a interpretar las siguientes tablas, las cuales indican el valor de las medias correspondientes a las desviaciones estándar para los niveles de cada factor; en donde un valor bajo representa variaciones pequeñas de los datos con respecto a su media aritmética.

TABLA 14. Medias estimadas (factor caudal)

Caudal	Media
1 (0,5 lps)	0,002
2 (1,00lps)	0,003
3 (1,5 lps)	0,014

La **Tabla 14**, analiza los niveles del factor **caudal** De acuerdo a esto, el valor más bajo se presentó con el caudal de 0,5 lps, por consiguiente, los mejores resultados en cuanto a la uniformidad de la distribución del flujo, seguido del caudal de 1,00 lps, mientras que con el caudal de 1,5lpsseobtuvo el valor más alto, por lo tanto una distribución menos uniforme.

TABLA 15. Medias estimadas (factor sección)

Sección tubería	Media
Constante	0,003
Variable mayor – menor	0,003
Variable menor – mayor	0,013

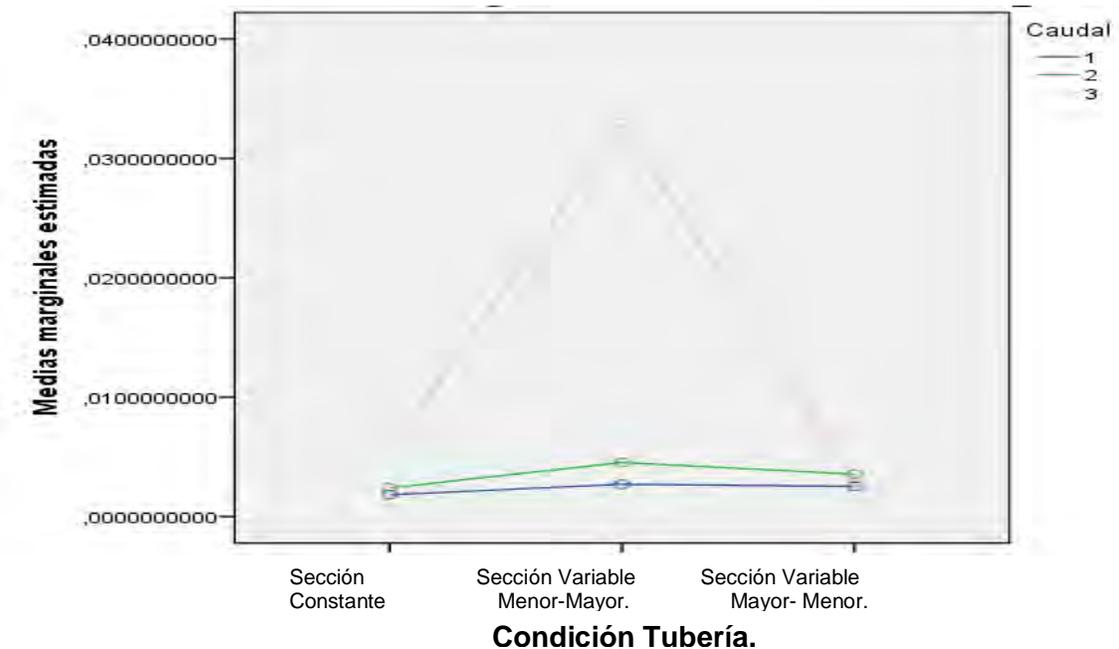
La **Tabla 15**, analiza los niveles del factor **sección**, en donde el valor más bajo se presentó con las secciones de tubería constante y variable de mayor a menor, es decir que con estas dos secciones se consiguió una buena uniformidad en la distribución del flujo

A continuación se presenta la **Tabla 16**, en la cual se muestra la interacción entre los tipos de sección de tubería y los caudales; resultando como mejor opción la tubería de sección constante puesto que con los tres caudales arrojó los menores valores de la media en comparación a la tubería de sección variable de mayor a menor y viceversa, presentándose el mejor comportamiento con el caudal de 0,5 lps, sin embargo, la sección de mayor a menor obtuvo valores de medias más bajas que la tubería de sección de menor a mayor.

TABLA 16. Interacción sección - caudal

Condición a presión	Caudal	Media
Sección constante	1	0,002
	2	0,003
	3	0,005
Sección Variable Mayor a menor	1	0,003
	2	0,004
	3	0,033
Sección Variable Menor a mayor	1	0,005
	2	0,005
	3	0,043

FIGURA 14. Síntesis análisis estadístico para los ensayos con tubería a presión.



El gráfico anterior muestra un resumen del análisis estadístico, en él se puede observar la interacción que hay entre el tipo de caudal y sección, en la obtención de datos cuyos valores de medias sean relativamente bajos, para realizar la lectura en la gráfica hay que tener en cuenta que el número 1 hace referencia al caudal de 0,5 lps, el 2 y 3 al caudal de 1,00 y 1,5 lps respectivamente, como se puede observar los valores más bajos se obtuvieron con la tubería de sección constante y variable de mayor a menor para los tres tipos de caudal, obteniéndose el mejor comportamiento con el caudal de 0,5 lps, seguido del caudal de 1,00 lps y por último con el caudal de 1,5 lps, además es importante mencionar que el rendimiento más bajo, se produjo con la sección variable menor-mayor con el caudal de 1,5 lps (caudal 3).

4.3 ENSAYOS DE LABORATORIO EN EL TANQUE DECANTADOR DE PLACAS INCLINADAS.

Una vez finalizada la etapa de los ensayos con los dos tipos de conductos en condiciones de escurrimiento libre y presión, en donde se evaluó su comportamiento en cuanto a la uniformidad de la distribución del flujo. Se continuó con la siguiente etapa que consistió en llevar a cabo los ensayos en el tanque decantador de placas inclinadas, con el fin de estudiar la distribución del flujo en estado sumergido, utilizando las dos secciones de conducto como estructura de entrada en el decantador de placas inclinadas, se consideró emplear dos métodos, el colorimétrico y el gravimétrico. Para desarrollar dichos ensayos se empleó el cálculo del tiempo de retención hidráulico de acuerdo a la ecuación [22] ya que con su valor, se logró estimar el tiempo que tardaría el fluido en cruzar un que se mantenga fijo, en este caso el tanque decantador. Este tiempo fue calculado para cada uno de los tipos de caudales a trabajar: 0,5 lps, 1,00 lps y 1,5 lps.

$$Trh = \frac{V}{Q} \quad [22]$$

Dónde:

V= Volumen del tanque decantador (m³) = 0,27 m³

Q= Caudal de entrada el (m³/s)

4.3.1 Adaptación del banco de pruebas. Lo primero que se hizo fue adaptar el banco de pruebas, extrayendo la estructura de entrada que disponía hecha con tubería, con el fin de instalar los conductos; también hubo necesidad de cambiar la estructura de salida existente ubicada en la parte superior del tanque (*Figura 17*) la cual no proporcionaba la capacidad de recolección suficiente para mantener los caudales requeridos, por lo tanto se construyó una nueva estructura de salida más amplia, para lo cual se utilizó lámina de hierro galvanizada dispuesta de vertederos triangulares a los dos lados, ubicados en forma paralela, lo cual garantizara la entrada de la misma cantidad de agua a lo largo del canal (*Figura 18*).

FIGURA 15. Estructura de salida existente en el banco de pruebas



FIGURA 16. Nueva Estructura de salida



4.3.2 Método colorimétrico. Con el fin de observar de una mejor manera la uniformidad en la distribución del flujo a lo largo del conducto en estado sumergido y llevar a cabo un análisis visual y analítico de la forma como ascendía el agua por el tanque decantador; se realizaron algunos ensayos utilizando un colorante; para tal efecto se empleó anilina. Las pruebas se efectuaron en el tanque en dos condiciones, con la presencia de placas y sin ellas, esto con el objetivo de analizar la incidencia de las placas en la distribución del flujo.

De acuerdo a cada tiempo de retención hidráulico para cada uno de los caudales: 0,5 lps, 1 lps y 1,5 lps, se aplicó el colorante, luego se tomaron cuatro muestras en cada intervalo de tiempo. Finalizada la prueba, se prosiguió a leer las unidades de platino cobalto (UPC) con ayuda del colorímetro

4.3.2.1 Calibración para la entrada de la anilina. Para la realización de los ensayos, se fijó una disolución inicial de anilina en agua de 2 l, con una concentración de anilina en de 1gr/L, que posteriormente sería inyectada al sistema mediante el uso de un frasco de Mariotte (**Figura 19**) dispuesto de una válvula, el cual se lo calibró para que proporcione de manera constante la disolución de la anilina, la calibración de este frasco se hizo analizando la cantidad de caudal que suministraba de acuerdo al número de vueltas que se le podían dar a la válvula, el proceso se indica en la **Tabla 17**.

Con el Frasco de Mariotte calibrado, se continuo con su respectivo acople al decantador de placas, este frasco se conectó con una manguera a la tubería que alimentaba el tanque decantador, mediante la adición de una Tee recta que, dispuesta de un buje y un tapón de caucho con una pequeña abertura que permitió acoplar la manguera.

FIGURA 17. Frasco de Mariotte, conectado al tanque decantador.



TABLA 17. Calibración del Frasco de Mariotte.

No. VUELTAS	CANTIDAD DE DISOLUCIÓN (ml/min)
0,25	740
0,50	148,15
0,75	222,22
1,00	296,3
1,25	370,37
1,50	444,44
1,75	518,51
2,00	592,6
2,25	666,67

4.3.2.2 Procedimiento para la toma de datos. De acuerdo al tipo de caudal se calculó el tiempo de retención hidráulico y se dividió la concentración de anilina en ml entre dicho tiempo, obteniendo así la cantidad de anilina necesaria por minuto y por consiguiente el número de vueltas que requeriría la válvula para suministrar esta cantidad según la **Tabla 18**, se realizó 9 veces la toma de datos y se recogieron muestras en cuatro puntos a lo largo de la canaleta de salida, como se observa en la **Figura 20**, por lo tanto el tiempo de retención hidráulico para cada caudal se dividió entre nueve veces, con el fin de determinar el intervalo de tiempo para tomar las muestras (*ver Tabla 18*).

Instalado el Frasco de Mariotte, se abrió la válvula según el caudal a ensayar, en ese momento se activaba el cronometro para saber el momento exacto en el cual se debía tomar las muestras, al mismo tiempo se hacía un registro fotográfico y filmico como soporte a la investigación, para evidenciar el comportamiento de cada conducto. Luego de obtener las muestras en los frascos, se prosiguió a realizar las respectivas lecturas del color con el uso del colorímetro.

Los datos fueron organizados en tablas, según el conducto, caudal y lecturas obtenidas de acuerdo al punto donde se tomó la muestra con su respectivo tiempo (ver **ANEXO H**)

FIGURA 18. Puntos de toma de las muestras en la canaleta de salida

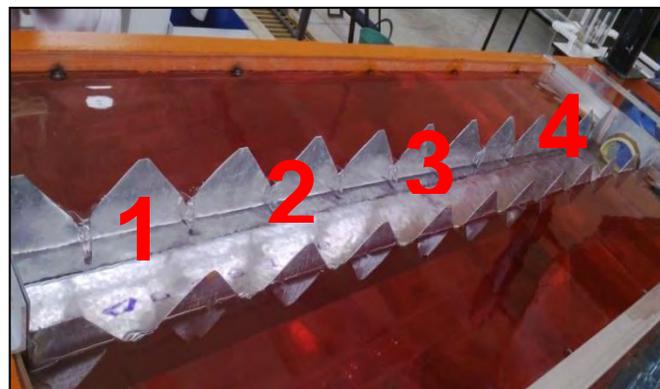


TABLA 18. Cálculo del número de vueltas según el caudal de entrada.

Caudal (lps)	Tiempo de retención hidráulico (min)	Cantidad (ml/min)	No. De vueltas en la válvula	Intervalo tiempo para toma de muestras (min)
0,50	9,0	222,22	0,75	1,00
1,00	4,5	444,44	1,5	0,50
1,50	3,0	666,67	2,25	0,33

4.3.2.3 Análisis de datos e interpretación de resultados método colorimétrico. Para analizar los datos obtenidos en esta etapa y con el fin de realizar una interpretación más completa, se optó por usar un programa para facilitar el análisis estadístico de datos. Mediante su aplicación es posible realizar unos análisis descriptivos de una o varias variables, utilizando gráficos que explican su distribución o calculando sus medidas características, además se destaca especialmente por sus capacidades para la representación gráfica de todo tipo de estadísticas y el desarrollo de experimentos, previsiones y simulaciones en función del comportamiento de los valores.

Para hacer la interpretación de los procedimientos y resultados obtenidos por este programa se usó una herramienta que realiza varias pruebas y gráficas para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la desviación estándar del color, además de evaluar la significancia de las interacciones entre sí. Para este caso los factores son: Condición (Sin placas – Con placas), Sección (Constante - Variable) y Caudal (0,5 lps – 1,00 lps – 1,5 lps).

La **Tabla 19**, evalúa cada factor e identifica si existen diferencias significativas entre sus resultados, es decir si el valor de significancia es menor que 0,05. De acuerdo a esta tabla los tres factores: Condición- Sección y Caudales, cumplen con esto. Además, también existe interacción entre la Condición - Sección y Sección – Caudales.

TABLA 19. Análisis de Varianza para Desviación Estándar de Color.

Fuente	Significancia
EFFECTOS PRINCIPALES	
A:Condición	0,0007*
B:Sección	0,0003*
C:Caudales	0,0000*
INTERACCIONES	
AB	0,0367*
AC	0,5486
BC	0,0212*

(*) Valores menores que 0,05.

Teniendo en cuenta que existieron diferencias significativas, se prosiguió a analizar las gráficas de Interacciones, las cuales ayudan a interpretar los factores significativos, es decir aquellos en donde hubo diferencias estadísticas, en donde el mejor comportamiento que se puede obtener es aquel que presenta el menor valor de desviación estándar de las lecturas de color, o sea aquel cuyo valor no presente una diferencia notable con respecto a su media aritmética.

En la **Figura 21**, se presenta la primera interacción, la cual evalúa la influencia de la condición del tanque decantador y el tipo de sección, sobre los valores de la desviación estándar de las lecturas del color, según esto el conducto de sección variable presentó los valores más bajos, tanto en la condición con placas como en la de sin placas; sin embargo el mejor comportamiento fue con presencia de las placas, esto se puede observar en la **Tabla 20**, donde se muestra el resumen de los valores obtenidos en la **Figura 21**.

FIGURA 19. Gráfico de perfil representando el efecto de la interacción entre Condición – Sección.

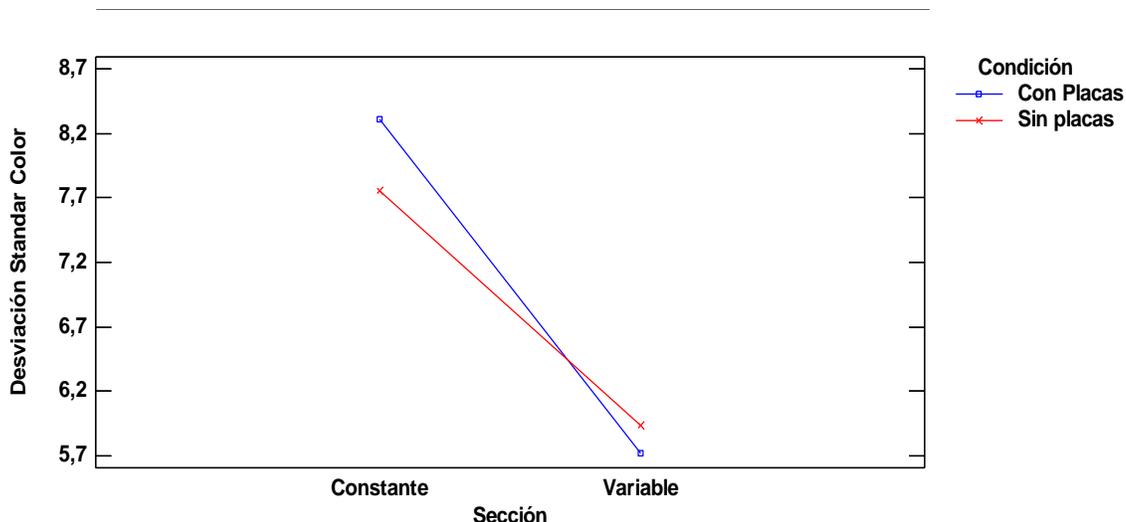


TABLA 20. Interacción entre los Factores de Condición – Sección.

CONDICIÓN	SECCIÓN	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
Sin Placas	Constante	7,73
	Variable	5,94*
Con Placas	Constante	8,28
	Variable	5,73*

(*) Valores más bajos obtenidos de la Desviación estándar.

Teniendo en cuenta lo anterior, se continuó a determinar cuál de las variables evaluadas en cada factor, presentó el mejor comportamiento. Esto se obtuvo leyendo el menor valor de la media en las pruebas de Múltiples Rangos.

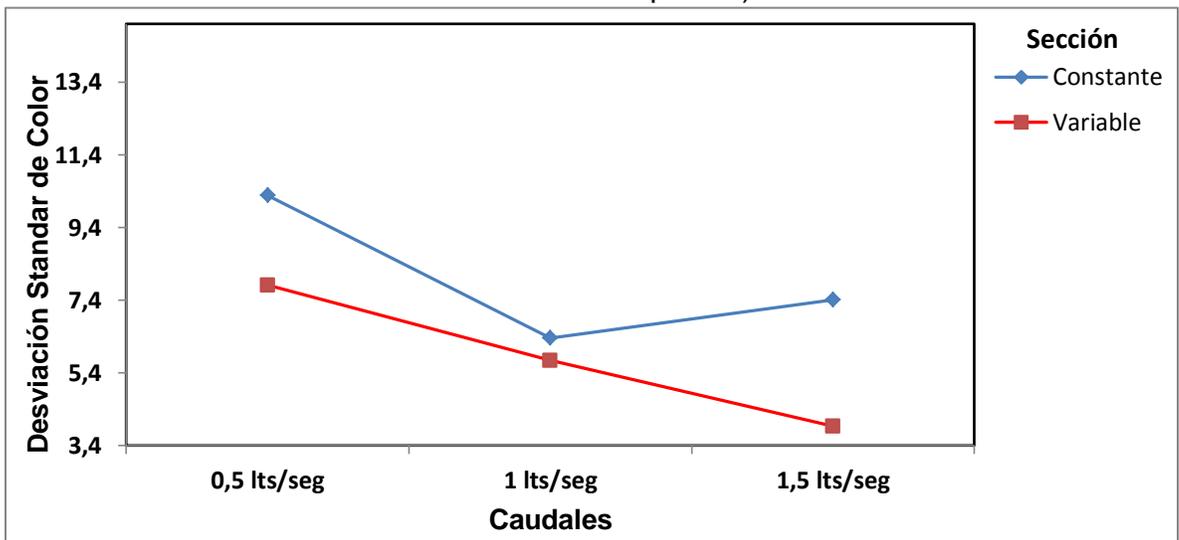
TABLA 21. Pruebas de Múltiples Rangos para Desviación Estándar de Color

CONDICIÓN	CAUDAL	MEDIAS DE DESVIACION ESTÁNDAR	
		CONSTANTE	VARIABLE
CON PLACAS	0,5 lps	10,28	7,81 *
	1,00 lps	6,36	5,74 *
	1,5 lps	7,41	3,93 *
SIN PLACAS	0,5 lps	13,43	10,72 *
	1,00 lps	9,11	7,02 *
	1,5 lps	9,18	5,63 *

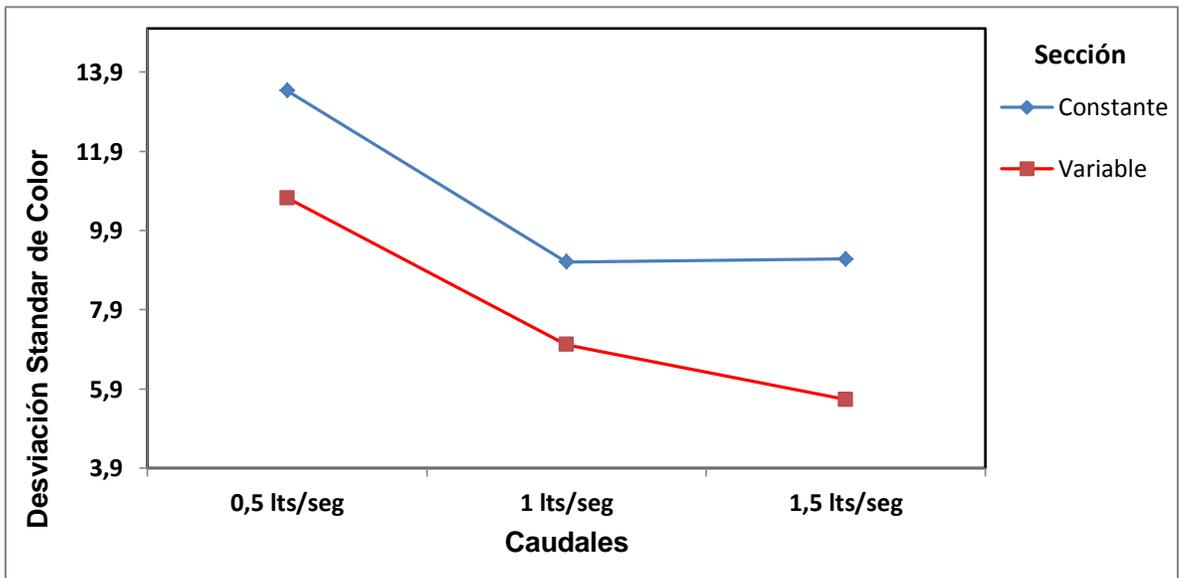
(*) Valores más bajos de Medias.

En la **Tabla 21** se evalúa la influencia del tipo de sección, el valor del caudal y la condición del tanque, sobre los valores de la desviación estándar de las lecturas del color, según esto, para las dos condiciones del tanque decantador y los tres tipos de caudales, se consiguieron valores bajos de medias en la desviación estándar con el conducto de sección variable, en donde la mejor uniformidad en la distribución de caudales se obtuvo en la condición del tanque con placas y el caudal de 1,5 lps, ya que con estos se logró el valor más bajo de las diferentes medias, igual a 3,93. Los resultados obtenidos en esta tabla se presentan en la **Figura 22 y 23**.

FIGURA 20. Gráfico de perfil Interacción entre Caudal – Sección (Tanque decantador con placas).



decantador sin placas)



4.3.3 Método gravimétrico. Terminado el análisis colorimétrico, se continuó con la última etapa de ensayos en el banco de pruebas, que consistió en la introducción de una clase de arena al sistema, para así evaluar la eficiencia del tipo de conducto en la decantación de las partículas y su distribución en la zona de lodos.

El desarrollo de este método se hizo con tres tipos de caudales: 0,5 lps, 1 lps y 1,5 lps; para cada uno de estos se calculó el tiempo de retención hidráulico con el fin de conocer el lapso de tiempo disponible para introducir 1 kg de arena al sistema.

4.3.3.1 Procedimiento de ensayo y toma de datos.

4.3.3.2 Obtención del sedimento. Para la realización de los ensayos, inicialmente se hizo una prueba preliminar con un tipo arena disponible en el laboratorio de hidráulica, cuya granulometría la clasificaba como arena entre gruesa y media, con la cual no se obtuvieron buenos resultados ya que sedimentaba en un 100%, por lo tanto hubo la necesidad de utilizar arena comprendida entre rangos de material fino y muy fino tal como lo muestra la granulometría en la **Tabla 22**, con el fin de obtener las condiciones que permitieran la realización de los ensayos; Esta arena fue obtenida de un material con el que contaba la universidad para una de sus construcciones actuales, la cual era proveniente de la mina ubicada en Pilcuán (Nariño).

4.3.3.3 Ensayos de granulometría. El análisis granulométrico tiene como objetivo la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de suelo.

Se hace el ensayo de granulometría para agregados según (INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS: 1998) I.N.V. E – 213 y otras referencias correspondientes:

- ASTM C-136
- AASHTO T-27
- NLT - 150
- Norma Icontec 77

4.3.3.3.1 Equipo.

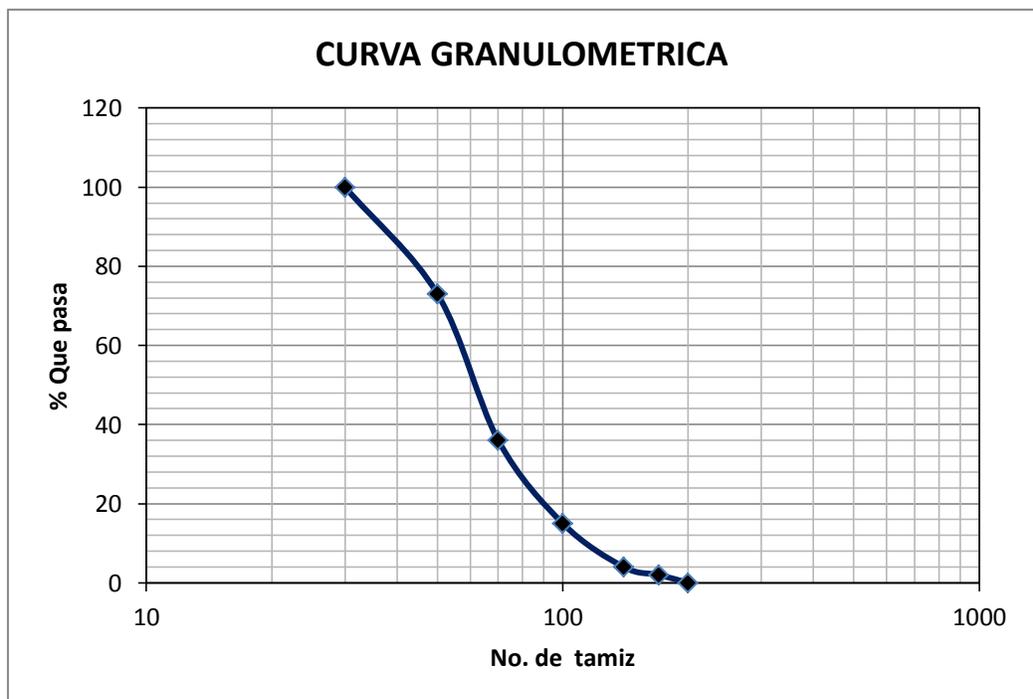
- Balanza de precisión, con sensibilidad de 0.1%
- Tamices de malla cuadrada
- Recipientes
- Horno

4.3.3.3.2 Procedimiento. Se seleccionó del material una muestra representativa, para luego llevarla a secar al horno durante 24 horas, posteriormente se la dejó enfriar y después se pesó la cantidad requerida para hacerla pasar por el grupo de tamices previamente seleccionados. El material retenido en cada tamiz fue pesado en una balanza de precisión, los datos obtenidos se registraron en la **Tabla 22**, en donde se hicieron los cálculos respectivos y por último se graficó la curva granulométrica.

TABLA 22. Análisis granulométrico para una muestra de 1000gr.

No tamiz	peso retenido (gr)	peso que pasa (gr)	% retenido	% pasa
30	0	1000	0	100
50	270	730	27,00	73
70	370	360	37,00	36
100	210	150	21,00	15
140	110	40	11,00	4
170	20	20	2,00	2
200	20	0	2,00	0
TOTAL	1000		100,00	

FIGURA 22. Curva granulométrica de la arena comprendida entre fina y muy fina.



4.3.3.4 Calibración del caudal sólido. Para la realización de los ensayos, se fijó una concentración de 1 kg de arena, la cual se introdujo en el caudal de entrada al decantador de placas inclinadas, mediante el uso de un cono dosificador dispuesto de una válvula de compuerta de 1", el cual se calibró para que proporcione de manera constante una concentración de sólidos, para esto fue necesario analizar la cantidad de arena suministrada de acuerdo al número de vueltas que se le podían dar a la válvula tal como lo indica la **Tabla 23**.

Teniendo calibrado el dosificador de arena, se continuó con su respectivo acople al decantador de placas inclinadas, este fue instalado en la parte anterior a la estructura de entrada, mediante la adición de una Tee recta al tubo que alimentaba al tanque y que conectaba a un tubo vertical de 2", en donde se ubicó el dosificador.

TABLA 23. Calibración del cono dosificador.

No. VUELTAS	CANTIDAD MATERIAL (gr/min)
0,25	22,22
0,50	44,44
0,75	66,66
1,00	88,89
1,25	111,11
1,50	133,33
1,75	155,55
2,00	177,78
2,25	199,99
2,50	222,22
2,75	244,44
3,00	266,66
3,25	288,89
3,50	311,11
3,75	333,33

4.3.3.5 Procedimiento para la toma de datos. Para cada tipo de caudal se calculó el tiempo de retención hidráulico y se dividió la concentración de arena entre dicho tiempo, obteniendo así la cantidad del caudal solido necesario por minuto (**Tabla 24**) y por consiguiente el número de vueltas que requeriría la válvula para suministrar esta cantidad según la **Tabla 23**.

Teniendo graduado el caudal, se prosiguió a abrir la válvula del dosificador de acuerdo al número de vueltas previsto anteriormente, teniendo en cuenta el tiempo de retención hidráulico para cada caudal, durante este proceso se ubicó el

tamiz #200 al final de la estructura de salida con el fin de retener algunas de las partículas que se escapaban. Posteriormente se desocuparon las tolvas, se colocó a secar el material obtenido y por último se tomó el peso de cada una de ellas, este procedimiento se realizó con el caudal de 0,5 lps, 1 lps y 1,5 lps.

Para efectos de cálculos las tolvas se numeraron por zonas de acuerdo al sentido de entrada del flujo tal como se indica en la **Figura 25**. Los datos obtenidos en cada ensayo se organizaron según el tipo de conducto, el caudal y la cantidad de arena en gramos obtenida en cada una de las zonas, tal como se indican en el **ANEXO I**.

TABLA 24. Calculo del número de vueltas según el caudal de entrada.

Caudal (lps)	Tiempo de retención hidráulico (min)	Cantidad (gr/min)	No. De vueltas en la válvula
0,5	9	111,11	1,25
1,00	4,5	222,22	2,5
1,5	3	333,33	3,75

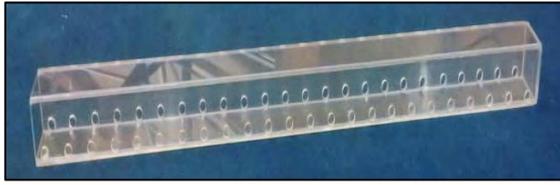
FIGURA 23. Numeración de las tolvas



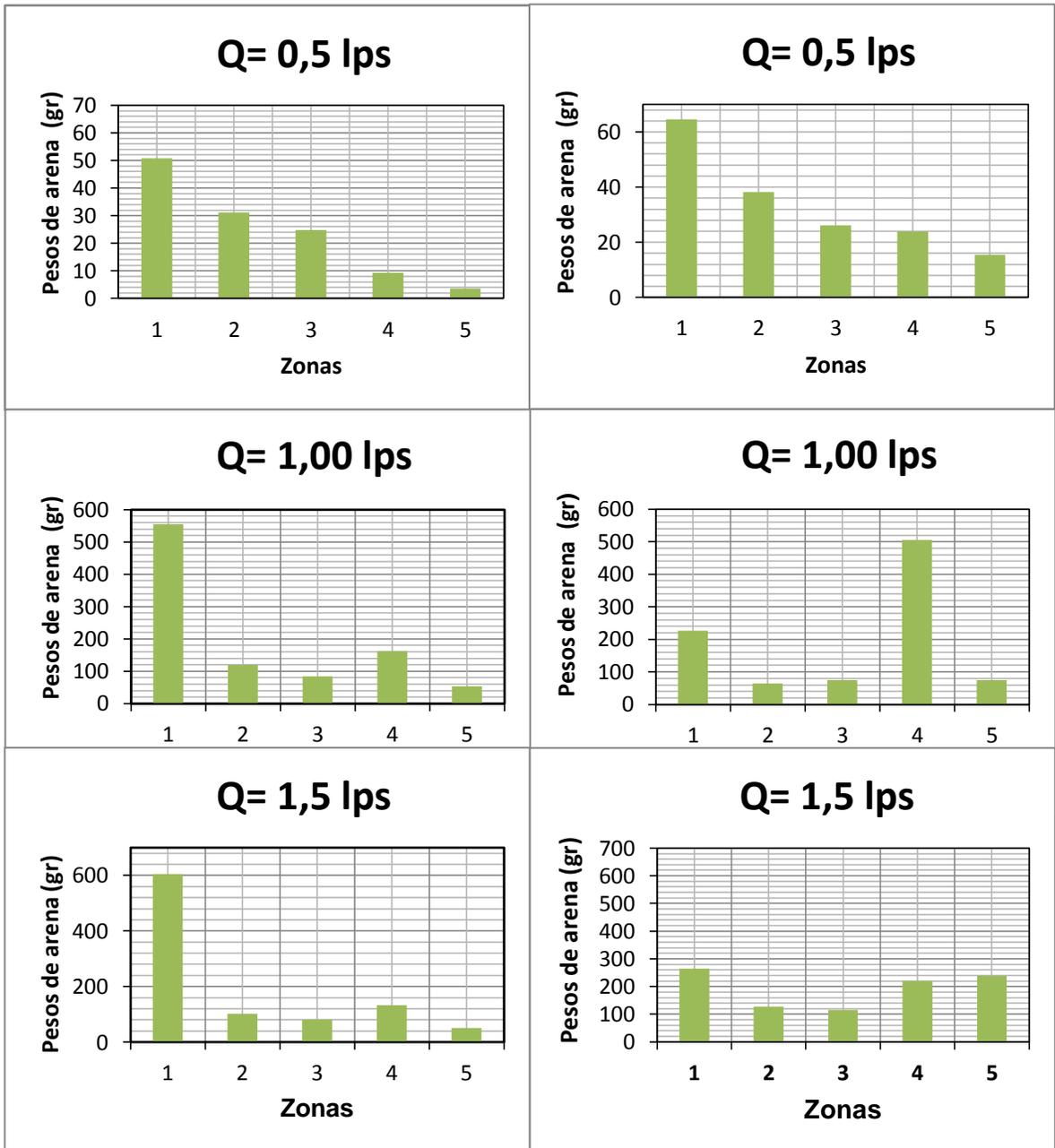
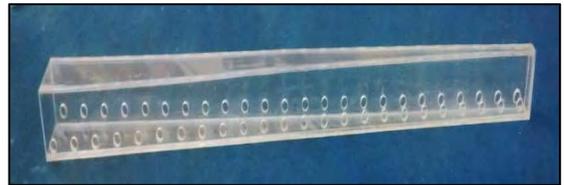
4.3.3.6 Análisis de datos e interpretación de resultados. Con los datos obtenidos en el **ANEXO I** se prosiguió a realizar su respectivo análisis, para evaluar la influencia del tipo de sección en la sedimentación de un tipo de arena, para esto se graficaron los valores obtenidos con cada sección de acuerdo al caudal con que se realizó el ensayo, adicionalmente se calculó la desviación estándar de los datos, y el porcentaje de lodos depositados en las tolvas y su cantidad sedimentada de acuerdo a la cantidad ingresada al sistema.

A continuación, se presentan las gráficas

CONDUCTO SECCIÓN CONSTANTE



CONDUCTO SECCIÓN VARIABLE



4.3.3.7 Análisis de las gráficas. Mediante la observación de las gráficas se deduce que para el caso del caudal de 0,5 lps, en el conducto de sección constante la mayor parte de la distribución de los lodos se presentó en las tres primeras tolvas y una menor parte en las dos últimas, esto debido a que la velocidad proporcionada por el caudal de entrada era baja e insuficiente para realizar un buen arrastre de este tipo de partículas. En el conducto de sección variable, aunque también se presentaron estas mismas características; es decir que la mayor parte del sedimento se ubicó en las zonas 1, 2 y 3, y el resto en las siguientes, hubo una mayor cantidad de arena decantada en las tolvas y además se presentó una mejor distribución con respecto a la obtenida con el conducto de sección constante.

Para el caudal de 1,00 lps, en el conducto de sección constante la mayor parte de lodos se presentaron en la primera tolva y el resto en las 4 zonas siguientes. En el conducto de sección variable, la mayor parte de la arena decantada se ubicó en la tolva 4, debido a la disminución de la sección, lo cual hizo que la velocidad de arrastre se compensara en la parte final del conducto. De lo anterior, se puede decir que para este tipo de caudal la uniformidad de la distribución de la arena con los dos conductos no presentó una diferencia notoria.

Para el caudal de 1,5 lps, el conducto de sección constante presentó el mismo comportamiento que con el caudal de 1,00 lps, mientras que bajo las mismas condiciones, con el conducto de sección variable se obtuvo una distribución más equitativa de los lodos en las 5 tolvas.

4.3.3.8 Análisis estadístico. Si bien los resultados de las gráficas proporcionaron una idea del comportamiento de la decantación de las partículas, fue necesario realizar un análisis estadístico; para este propósito se calculó la desviación estándar de los datos obtenidos y se graficó la influencia del tipo de sección y caudal en los resultados.

Los datos también fueron analizados por porcentajes, con el fin de hacer una comparación entre la concentración inicial de arena ingresada y la obtenida en conjunto de todas las zonas.

De acuerdo con la **Tabla 25**, se puede afirmar que para el caudal de 0,5 lps, solo decantó un porcentaje menor del 20%, con respecto a la cantidad total introducida, y el resto del material fue sedimentado en el fondo del conducto tal como se indica en el **ANEXO I**, para los dos tipos de sección, pero con una mayor cantidad en el de sección constante. En cuanto a la desviación estándar, los valores obtenidos fueron bajos para los dos tipos de conductos, esto significa que hubo una distribución uniforme en las tolvas, no obstante, si se tiene en cuenta el porcentaje total decantado con este tipo de caudal hubo una deficiente decantación de partículas.

Con el caudal de 1 lps, se consiguió decantar porcentajes cercanos al 100%, y se obtuvieron valores altos en la desviación estándar; en donde las diferencias entre los dos tipos de conductos fueron pequeñas, por lo que para este tipo de caudal las dos secciones se comportaron de manera similar, sin embargo la distribución de partículas fue un poco mejor con el conducto variable (ver **Tabla 25 y 26**).

Finalmente, con el caudal de 1,5 lps, con los dos conductos se obtuvieron porcentajes de sedimentos cercanos al 100% con respecto a la concentración inicial, en cuanto a la desviación estándar, un valor bajo se consiguió con el conducto de sección variable, lo que significa que hubo una buena distribución de los sedimentos a lo largo de las zonas (ver **Tabla 25 y 26**).

TABLA 25. Porcentajes (%) decantados con respecto al total.

Caudal (lps)	Variable	Constante
0,5	17	12,9
1	94,7	97,4
1,5	96	97,2

TABLA 26. Desviación estándar.

Caudal (lps)	Variable	Constante
0,5	19,044	25,00
1	188,857	205,110
1,5	67,733	230,886

FIGURA 24. Interacción entre Conducto – Caudales en la obtención de los valores de desviación estándar.

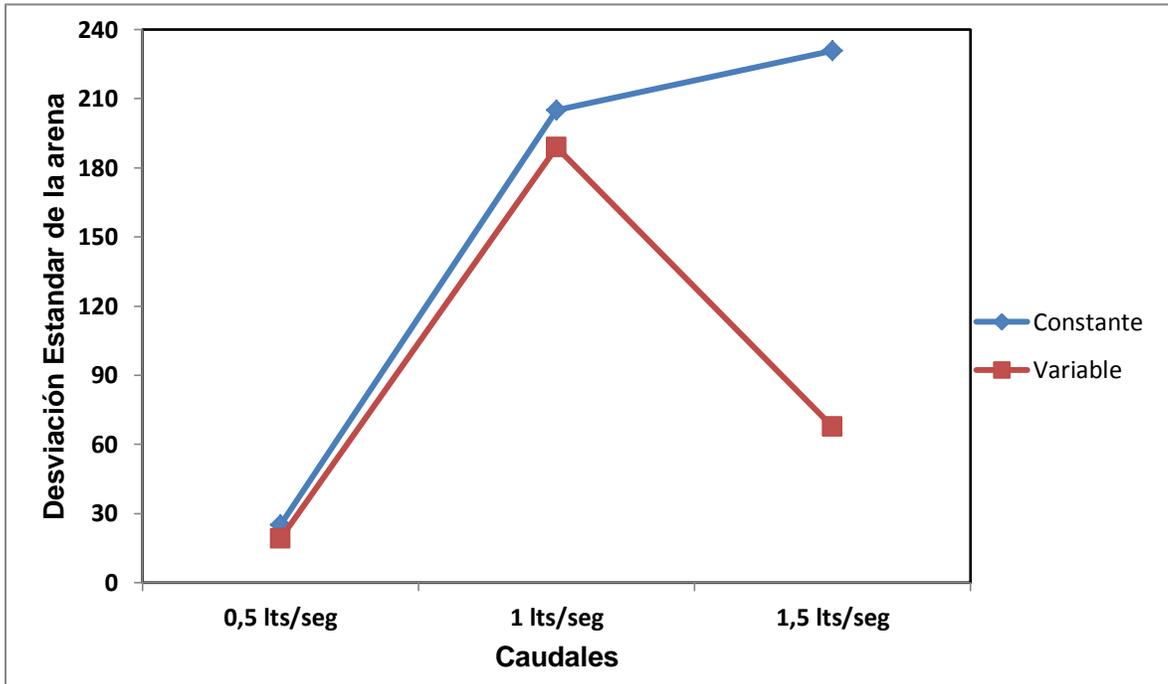
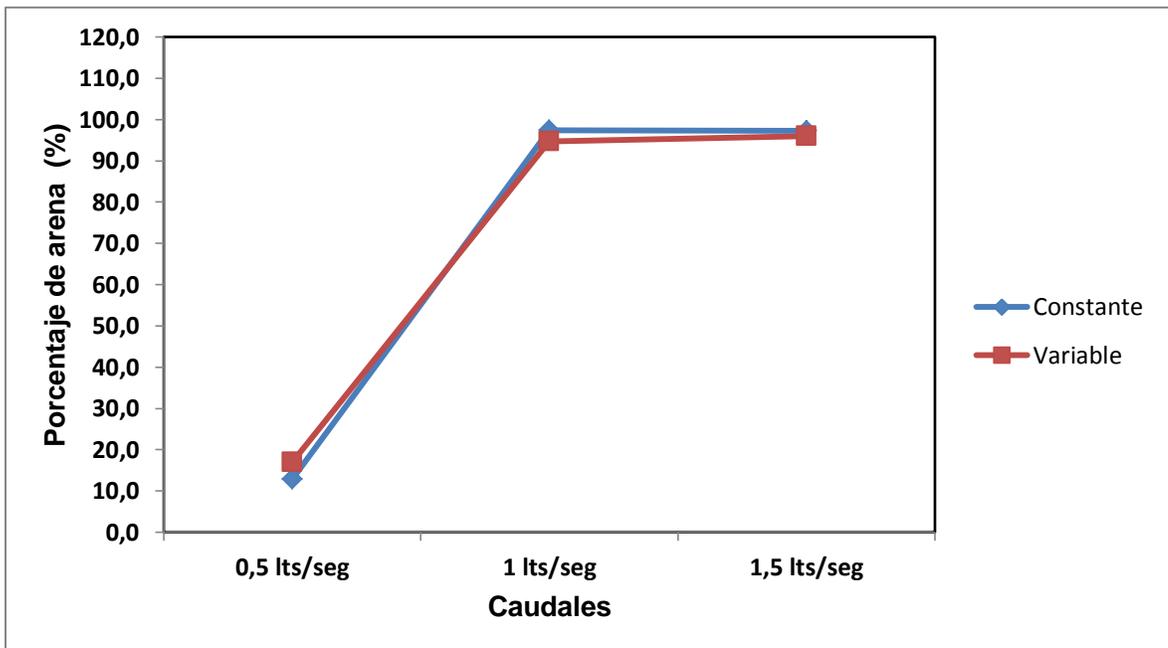


FIGURA 25. Interacción entre Conducto – Caudales en la obtención de los porcentajes conseguidos en las tolvas con respecto a la concentración inicial.



5. SÍNTESIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA INVESTIGACIÓN.

Concluidas las diferentes fases propuestas en la presente investigación, a continuación se plasma un resumen de los resultados obtenidos mediante el análisis estadístico efectuado lo largo de este proceso.

En la **Tabla 27**, se evidencian los estados a los que fueron sometidos los tipos de conductos, con sus respectivas etapas, métodos utilizados y los caudales evaluados; con el análisis estadístico se logró identificar los valores más bajos de la desviación estándar, lo cual, representaba el mejor comportamiento de la uniformidad en la distribución de caudales, consiguiendo estos resultados con el conducto de sección variable en todos los casos.

TABLA 27. Resumen de los valores de Desviación Estándar en los análisis estadísticos.

ESTADO DEL CONDUCTO	ETAPA		CAUDAL	SECCIÓN DEL CONDUCTO	
				CONSTANTE	VARIABLE
Libre	Escurrimiento libre		0,5 lps	0,004	0,002 *
			1,00 lps	0,006	0,004 *
			1,5 lps	0,005	0,004 *
	Presión		5 lps	0,006	0,004 *
			6,8 lps	0,011	0,007 *
Sumergido	Método colorimétrico	Tanque con placas	0,5 lps	10,28	7,81 *
			1,00 lps	6,36	5,74 *
			1,5 lps	7,41	3,93 *
		Tanque sin placas	0,5 lps	13,43	10,72 *
			1,00 lps	9,11	7,02 *
			1,5 lps	9,18	5,63 *
	Método Gravimétrico		0,5 lps	25,00	19,04 *
			1,00 lps	205,110	188,85 *
			1,5 lps	230,886	67,73 *

(*) Valores más bajos obtenidos de la Desviación estándar.

6. CONCLUSIONES

Con base a los resultados de los análisis realizados en las diferentes condiciones, se logró confirmar la hipótesis de investigación y demostrar que un conducto rectangular de sección variable y diámetro de laterales constante distribuye mejor el flujo a lo largo de un sedimentador de placas inclinadas, que un conducto rectangular de sección y diámetro de laterales constante.

Para el caso de los conductos trabajando sin estar sumergidos y en condiciones de escurrimiento libre, con los tres tipos de caudales evaluados (0,5 lps, 1 lps y 1,5 lps), los conductos presentaron resalto hidráulico en la parte final, lo que ocasionaba una ascensión del fluido y por lo tanto el aumento de la cantidad de agua que salía por los orificios de esta zona en comparación con el resto del conducto, sin embargo con la sección variable se consiguió la mejor distribución del flujo con los tres caudales evaluados, ya que con esta sección se presentaron los valores más bajos de las medias de la desviación estándar, lográndose el mejor resultado con el caudal de 0,5 lps con una media igual a 0,002, mientras que para el conducto de sección constante, con este mismo caudal obtuvo un valor igual a 0,004

En condiciones de presión, los dos tipos de conductos con los caudales de 5 lps, y 6,8 lps, presentaron una mejor distribución del flujo, ya que no se originó el resalto hidráulico en la parte final, no obstante los valores más bajos de la desviación estándar se consiguieron con el conducto de sección variable con los dos caudales, logrando el mejor resultado con el caudal de 5 lps con una media igual a 0,004, mientras que para el conducto de sección constante, con este mismo caudal obtuvo un valor igual a 0,006..

La distribución de caudales de manera ascensional a través de los conductos en estado sumergido se pudo llevar acabo con el método colorimétrico, mediante el análisis de la cantidad de color distribuida en el tanque, bajo dos condiciones: Con la presencia de placas y sin ellas, y con tres tipos de caudales: 0,5 lps, 1,00 lps y 1,5 lps,

En cuanto a la condición del tanque decantador, sin presencia de las placas, la mejor distribución de color se consiguió con el conducto de sección variable y los tres tipos de caudales, en donde el valor más bajo de desviación se presentó con el de 1,5 lps con un valor igual a 5,63, mientras que con el conducto de sección constante se obtuvo un valor de 9,18.

Para la condición del tanque decantador, con presencia de las placas, la mejor distribución de color, también se consiguió con el conducto de sección variable y los tres tipos de caudales, en donde el valor más bajo de desviación se presentó con el de 1,5 lps con un valor igual a 3,93, frente a un valor de 7,41 obtenido con el conducto de sección constante.

Teniendo en cuenta la condición del tanque decantador, la mejor uniformidad en la distribución de caudales se consiguió con el tanque decantador en presencia de las placas con el conducto de sección variable, bajo los tres tipos de caudales.

La mejor distribución del flujo a través de los conductos, en estado sumergido, se consiguió con los caudales más altos, mientras que en condiciones de escurrimiento libre y presión los mejores resultados se obtuvieron con los caudales más bajos.

Con el método gravimétrico se logró analizar la influencia del tipo de conducto, en la distribución de las partículas de arena al tanque decantador de placas inclinadas, bajo tres tipos de caudales: 0,5 lps, 1,00 lps y 1,5 lps, con el caudal más bajo, se presentó un gran porcentaje de arena sedimentada en el fondo de los conductos, presentándose la mayor cantidad en el conducto de sección constante con un valor de 77% mientras que en el de sección variable se presentó un 73%, esto debido a que la velocidad de arrastre fue baja, sin embargo la distribución que se presentó en las tolvas fue mejor con el conducto de sección variable con un valor de desviación estándar de 19 frente a un 25 obtenido con el conducto de sección constante.

Al aumentar el caudal, no se presentó decantación de sólidos en el fondo de los conductos, y se consiguieron mejores distribuciones de lodos en las tolvas, sobre todo con el conducto de sección variable, que con el caudal de 1,5 lps, obtuvo la distribución más eficiente con un valor de la desviación estándar igual a 67,73 y un porcentaje de sedimentación igual al 97%, mientras que con el conducto de sección constante para este mismo caudal obtuvo una desviación estándar igual a 231 y un porcentaje de sedimentación igual al 96%, por lo que se concluye que la mejor distribución de arena a lo largo de las tolvas se consigue con el conducto de sección variable.

7. RECOMENDACIONES

Trabajar la estructura de entrada con amplias secciones, dispuestas de orificios con un área considerable, lo que permitirá obtener en el cálculo, bajos gradientes de velocidad; contribuyendo a que la uniformidad en la distribución del flujo no se vea afectada.

Construir una transición para hacer la instalación de la estructura de entrada, antes de acoplarla a la tubería de alimentación, para evitar cambios bruscos de sección y alteraciones en los orificios ubicados al principio de la estructura, afectando la uniformidad de la distribución del flujo.

Trabajar con caudales que permitan obtener una velocidad de arrastre, suficiente para que las partículas no sedimenten dentro de la estructura de entrada y por el contrario puedan ser transportadas a través de esta, saliendo por los orificios laterales, y posteriormente ser decantadas hacia el fondo del tanque decantador.

BIBLIOGRAFÍA

- Arboleda, J. (2000). "Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua". Tomo 1. McGraw- Hill Interamericana, S.A. de C.V., 3° Edición, Colombia. Pág. 23-40.
- "Manual de suministros de agua comunitaria quinta edición". American.
- Camp, T.R. (1946). "Sedimentation and the Design of Settling Tanks" Trans. ASCE Vol. III pág. 895.
- Castilla, A. R. (1985). Diseño de múltiples. En: Curso de abasto de agua para poblaciones. 2 ed. Santiago De Cali: Oficina de publicaciones – Facultad de Ingeniería – Universidad del Valle. p. 1- 26.
- Comisión Nacional del Agua, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Edición 2007, pág. 112- 114.
- Hazen A. (1904) "On Sedimentation" Trans. ASCE Vol.53 pág. 45.
- Hudson, H.E., UMLER, R. and BAILEY, 12. Dividing flow manifold with square edged laterals. J. EED, ASCE, AUGUST 1979: pág. 745.
- Pérez, A. J., (consultor en tratamiento de agua) (2007) Centro panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Sedimentadores Laminares. Pág. 37-40.
- Hudson, H., Uhler R. y Bailey R. "*Proceedings of the American Society of Civil Engineers*".
- Pérez, L. (agosto, 2005) Instituto de ingeniería sanitaria y ambiental. Área de hidráulica. Cátedra de hidráulica aplicada a la ingeniería sanitaria. Teoría de la sedimentación. Pág. 21-23.
- Maldonado, Y. (2008) Teoría de la Sedimentación, capítulo 7, conceptos generales. Pág. 15-16.
- Ingersoll A., McKee, J., Brooks, N.Y., (Jan 1955) "Fundamental concepts of rectangular settling tanks" Proc. ASCE, Vol. 81, p. 590-1 pág. 83-89.
- Azevedo, N. (profesor titular Universidad de Sao Paulo, Sao Paulo, Brasil). Experiencia Brasileña en el diseño de sedimentadores (2007), pág. 58-61.

- Salazar, R. C. (profesor titular Universidad de Nariño, Pasto, Colombia), (2006) Acueductos segunda edición pág. 78-80.
“Estudio de desarenadores convencionales y de placas inclinadas, teoría de sedimentación “.

ANEXOS

ANEXO A. COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING.

Valores del coeficiente de rugosidad según Manning.

n	Superficie
0,010	Muy lisa, vidrio, plástico, cobre
0,011	Concreto muy liso
0,013	Madera suave, metal, concreto
0,017	Canales de tierra, buenas condiciones
0,020	Canales de tierra, libres de vegetación
0,025	Canales naturales con alguna vegetación y piedras en el fondo
0,035	Canales naturales con abundante vegetación
0,040	Arroyos de montaña con muchas piedras

ANEXO B. VALORES DE $\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}}$

Valores de $\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}}$ según la temperatura.

Temperatura (°C)	$\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}}$
0	2.336.94
4	2.501.56
10	2.736.53
15	2.920.01
20	3.114.64
25	3.266.96

ANEXO C. CÁLCULO DEL CONDUCTO DE SECCIÓN VARIABLE.

V orificio (m/s)	G (Seg -1) orificio	Q orificio (m ³ /s)	# orificios	Q total (m ³ /s)	V canal (m/s)	G (Seg -1) Canal
0,15	80,05	1,90015E-05	20	0,00013	0,051	14,448
0,14	72,18	1,77348E-05	22	0,00014	0,039	9,646
0,13	64,58	1,6468E-05	24	0,00015	0,042	10,991
0,12	57,28	1,52012E-05	26	0,00016	0,046	12,393
0,11	50,27	1,39345E-05	28	0,00018	0,049	13,850
0,1	43,57	1,26677E-05	30	0,00019	0,053	15,360
0,09	37,20	1,14009E-05	32	0,00020	0,056	16,921
0,08	31,18	1,01341E-05	34	0,00022	0,060	18,532
0,07	25,52	8,86738E-06	36	0,00023	0,063	20,191
0,06	20,25	7,60061E-06	38	0,00024	0,067	21,897
0,05	15,41	6,33384E-06	40	0,00025	0,070	23,648
0,04	11,02	5,06707E-06	42	0,00027	0,074	25,444
0,03	7,16	3,80031E-06	44	0,00028	0,077	27,283
0,02	3,90	2,53354E-06	46	0,00029	0,081	29,164
0,01	1,38	1,26677E-06	48	0,00030	0,084	31,086
			50	0,00032	0,088	33,049
			52	0,00033	0,091	35,052
			54	0,00034	0,095	37,094
			56	0,00035	0,099	39,173
			58	0,00037	0,102	41,291
			60	0,00038	0,106	43,445

Cálculo de la distribución de los orificios laterales.

Longitud total del canal	1	m	100	Cm
Diametro orificio (1/2")	0,0127	m	1,27	Cm
separacion (t)	0,029	m	2,9	Cm
Distancia entre la pared y el primer orificio	0,021	m	2,1	Cm
Separacion centro a centro entre orificios	0,042	m	4,2	Cm
Chequeo	1	m	100	Cm

ANEXO D. CÁLCULO DEL CONDUCTO DE SECCIÓN CONSTANTE.

Q total (m ³ /s)	V canal (m/s)	Area (m ²)	L (m)	L (Cm)	V orificios (m/s)	Area orificios(m ²)	Area orificios por lado(m ²)	G (Seg -1) orificio	G (Seg -1) Canal
0,00030	0,079	0,00384841	0,062035564	6,20	0,05	0,00608049	0,003040245	15,40533144	31,60377577

ANEXO E. DATOS OBTENIDOS EN CONDICIONES DE ESCURRIMIENTO LIBRE

Datos obtenidos con el conducto de sección constante.



Nº ORIFICIO	Q= 0,5 l/seg		Q= 1,00 l/seg		Q= 1,5 l/seg	
	VOLUMEN AFORADO (mL)	TIEMPO (Seg)	VOLUMEN AFORADO (mL)	TIEMPO (Seg)	VOLUMEN AFORADO (mL)	TIEMPO (Seg)
1	90	2,49	112	2,1	106	1,65
	108	2,94	130	2,35	140	2,05
	86	2,4	118	2,07	112	1,69
2	64	2,47	80	1,99	96	1,86
	94	3,63	62	1,43	88	1,75
	92	3,63	88	2,27	98	1,92
3	56	2,85	48	1,48	86	1,83
	76	4,19	108	3,23	94	1,97
	78	4,21	96	3,01	92	1,88
4	68	3,79	52	2,02	86	1,9
	66	3,7	68	2,78	80	2,04
	94	5,27	66	2,58	68	1,65
5	68	4,73	48	1,81	70	1,96
	78	5,47	94	3,79	78	2,16
	78	5,59	66	2,67	70	1,99
6	56	4,23	76	3,18	76	2,26
	60	5,16	100	4,27	70	2,07
	80	6,35	82	3,48	70	2,13
7	40	5,76	48	2,17	86	2,7
	46	7,04	76	3,73	64	2,06
	60	5,85	66	3,09	78	2,46
8	46	5,36	46	2,38	62	2,19
	42	4,72	34	1,73	78	2,73
	50	7,05	60	3,23	84	2,89
9	36	5,18	42	2,45	54	2,04
	40	5,67	34	1,91	60	2,32
	38	5,38	80	4,82	68	2,53
10	34	3,62	42	2,59	52	2,05
	44	4,82	40	2,42	54	2,15
	48	5,6	68	4,34	52	2,15
11	40	4,52	46	2,81	52	2,05
	48	5,2	50	3,15	42	1,63
	46	5,02	56	3,77	50	1,98
12	30	4,59	44	2,94	52	2,16
	42	5,83	58	3,73	46	1,96
	34	4,92	44	2,91	52	2,11
13	28	3,95	40	2,39	48	2,12
	74	5,57	38	2,3	50	2,19
	34	5,6	60	3,89	48	2,07

ANEXO E. (Continuación)

Nº ORIFICIO	Q= 0,5 l/seg		Q= 1,00 l/seg		Q= 1,5 l/seg	
	VOLUMEN AFORADO (mL)	TIEMPO (Seg)	VOLUMEN AFORADO (mL)	TIEMPO (Seg)	VOLUMEN AFORADO (mL)	TIEMPO (Seg)
14	28	3,88	32	2,77	42	1,98
	30	4,2	46	4,02	52	2,37
	36	6,39	46	4,09	40	1,88
15	28	4,16	36	3,41	48	2,17
	30	4,08	38	3,7	34	1,52
	32	5,51	46	4,66	40	1,79
16	24	4,72	32	2,91	34	1,45
	32	4,78	40	3,78	40	1,7
	34	4,78	38	3,55	36	1,56
17	30	3,34	30	2,97	38	1,76
	44	5,28	40	4,16	38	1,82
	42	4,72	34	3,44	40	1,91
18	24	5,35	50	5,41	34	1,66
	28	6,01	52	5,52	34	1,61
	34	6,65	60	6,92	34	1,67
19	36	4,66	34	5,03	24	1,21
	42	6,03	66	7,18	42	2,33
	38	5,68	70	7,77	38	2,12
20	32	5,7	32	3,63	42	2,6
	36	5,83	36	4,4	48	3,02
	32	5,81	42	4,76	48	3,06
21	28	5,03	36	4,05	28	1,96
	34	5,55	38	4,36	32	2,34
	42	6,13	40	4,72	36	2,53
22	28	3,59	38	1,84	60	1,63
	40	4,76	40	2,2	84	2,4
	50	5,91	54	2,7	82	2,21
23	60	4,68	88	1,92	100	3,11
	64	4,84	96	2,05	76	1,73
	78	5,94	100	2,41	86	1,81
24	78	3,43	102	1,97	90	1,56
	88	4,09	130	2,47	132	2,36
	108	5,66	126	2,38	100	1,78

ANEXO E. DATOS OBTENIDOS CON EL CONDUCTO DE SECCIÓN VARIABLE



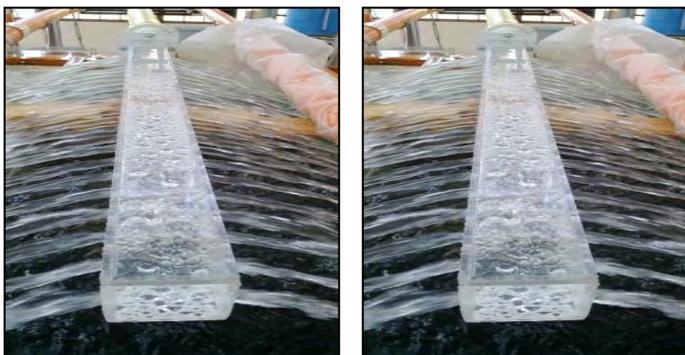
Nº ORIFICIO	Q= 0,5 l/seg		Q= 1,00 l/seg		Q= 1,5 l/seg	
	VOLUMEN AFORADO (mL)	TIEMPO (Seg)	VOLUMEN AFORADO (mL)	TIEMPO (Seg)	VOLUMEN AFORADO (mL)	TIEMPO (Seg)
1	50	2,94	62	1,83	78	1,76
	72	4,64	84	2,38	106	2,34
	80	4,95	54	1,6	132	3,13
2	52	3,66	122	3,55	100	2,41
	60	4,58	74	2,23	120	2,95
	76	5,3	98	2,95	128	3,13
3	58	3,96	80	2,31	102	2,35
	60	4,55	98	3	128	2,83
	80	5,5	116	3,41	140	3,24
4	58	3,98	78	2,62	92	2,38
	88	6,19	106	3,53	110	2,85
	68	4,71	118	4,02	126	3,28
5	52	4,98	90	2,82	98	2,46
	60	5,36	118	3,64	136	3,39
	60	5,79	98	3,16	144	3,68
6	36	3,47	80	3,29	100	3,16
	48	4,97	88	3,67	108	3,39
	56	5,53	102	4,2	104	3,34
7	40	3,6	72	2,59	72	1,95
	44	4,88	68	2,37	100	2,86
	62	5,71	130	4,7	126	3,66
8	46	3,98	78	3,27	82	2,51
	42	4,47	94	3,98	108	3,45
	36	4,17	104	4,43	116	3,73
9	46	4,27	98	3,63	84	2,6
	50	5,19	88	3,23	104	3,24
	56	5,46	114	4,3	128	3,88
10	38	3,71	76	3,23	84	2,61
	48	4,42	100	4,16	102	3,12
	54	5,29	122	5,16	116	3,68
11	50	4,5	72	3,17	72	2,33
	54	5,25	92	4,07	114	3,75
	68	6,8	110	4,88	120	3,91
12	44	4,37	68	3,38	68	2,5
	52	4,82	82	4,15	94	3,44
	54	5,22	96	4,95	94	3,47
13	38	4,23	60	3,3	70	2,82
	48	5,21	88	4,66	84	3,51
	52	5,6	82	4,48	98	4,14

ANEXO E. (Continuación)

Nº ORIFICIO	Q= 0,5 l/seg		Q= 1,00 l/seg		Q= 1,5 l/seg	
	VOLUMEN AFORADO (mL)	TIEMPO (Seg)	VOLUMEN AFORADO (mL)	TIEMPO (Seg)	VOLUMEN AFORADO (mL)	TIEMPO (Seg)
14	36	4,16	60	3,1	68	2,78
	32	3,86	82	4,14	74	3,1
	54	5,09	94	4,86	110	4,51
15	36	4,09	62	3,59	78	3,27
	38	4,13	82	4,77	108	4,55
	44	5,36	84	4,82	110	4,71
16	40	3,97	60	4,02	58	2,52
	44	4,83	60	3,92	78	3,59
	50	5,24	72	4,97	88	4,12
17	48	4,32	56	3,83	56	2,66
	52	4,99	56	3,69	92	4,45
	54	5,42	86	5,84	100	4,91
18	46	4,4	78	4,84	48	2,22
	44	4,38	60	4,04	72	3,3
	54	5,26	72	4,42	72	3,38
19	38	4,65	60	4,32	54	2,41
	56	5,08	66	5,03	76	3,61
	60	6,16	74	5,45	80	3,8
20	44	4,43	40	3,91	40	2,02
	54	5,35	46	4,36	56	2,92
	60	5,5	56	5,02	80	4,35
21	36	3,77	60	4,28	42	2,36
	50	4,66	52	3,7	54	3,09
	52	5,15	66	4,65	70	3,96
22	44	4,55	44	3,13	40	2,08
	48	5,72	56	4,27	48	2,35
	44	4,36	70	5,52	76	3,89
23	52	2,82	88	2,98	82	1,87
	46	2,7	126	3,94	110	2,64
	68	3,83	142	4,63	128	3,16
24	58	2,64	120	3,3	118	2,33
	78	3,92	132	3,38	170	3,09
	98	4,22	140	3,29	154	3,02

ANEXO F. DATOS OBTENIDOS EN CONDICIONES DE PRESIÓN

Datos obtenidos con el conducto de sección constante.



Nº ORIFICIO	Q= 5 l/seg		Q= 6,8 l/seg	
	VOLUMEN AFORADO (mL)	TIEMPO (Seg)	VOLUMEN AFORADO (mL)	TIEMPO (Seg)
1	116	1,64	94	1,12
	160	2,29	134	1,38
	252	3,45	174	2,19
2	98	1,56	90	1,12
	156	2,43	106	1,62
	202	3,34	248	2,11
3	110	1,79	120	1,11
	146	2,32	160	1,72
	216	3,4	174	2,18
4	110	1,55	132	1,02
	158	2,27	166	1,6
	244	3,4	188	2,15
5	134	1,71	144	1
	262	2,21	168	1,5
	220	3,04	246	2,15
6	122	1,66	140	1,12
	176	2,33	186	1,38
	258	3,28	246	2,19
7	98	1,15	148	1,12
	204	2,37	166	1,62
	282	3,22	290	2,11
8	148	1,59	144	1,11
	244	2,83	214	1,72
	328	3,58	304	2,18
9	142	1,56	144	1,02
	212	2,3	258	1,6
	318	3,55	294	2,15
10	116	1,2	146	1
	230	2,26	226	1,5
	328	3,4	350	2,15

ANEXO F. (continuación)

Nº ORIFICIO	Q= 5 l/seg		Q= 6,8 l/seg	
	VOLUMEN AFORADO (mL)	TIEMPO (Seg)	VOLUMEN AFORADO (mL)	TIEMPO (Seg)
11	126	1,27	162	1,12
	256	2,52	202	1,38
	350	3,45	328	2,19
12	148	1,49	172	1,12
	216	2,08	262	1,62
	310	3,03	350	2,11
13	116	1,05	172	1,11
	204	1,99	260	1,72
	326	3,05	306	2,18
14	130	1,13	170	1,02
	222	2,07	234	1,6
	368	3,41	304	2,15
15	144	1,42	166	1
	240	2,36	254	1,5
	326	3,11	324	2,15
16	138	1,31	204	1,05
	216	2	226	1,35
	354	3,39	302	1,99
17	140	1,4	192	1,19
	208	2,09	282	1,62
	392	3,79	408	2,27
18	128	1,34	174	1,05
	200	2,08	304	1,73
	314	3,16	338	1,9
19	110	1,21	166	1,05
	188	2,03	238	1,37
	290	3,14	376	2,19
20	118	1,29	180	1,03
	188	2,12	242	1,37
	282	3,03	394	2,13
21	142	1,47	206	1,15
	230	2,36	266	1,53
	322	3,28	302	1,79
22	134	1,21	208	1,12
	246	2,3	316	1,67
	338	3,03	364	1,94
23	148	1,15	194	1,04
	278	2,22	256	1,31
	390	3,18	366	1,95
24	192	1,5	178	1,01
	300	2,39	296	1,48
	374	3,04	352	2,12

ANEXO F. DATOS OBTENIDOS CONEL CONDUCTO DE SECCIÓN VARIABLE.



Nº ORIFICIO	Q= 5 l/seg		Q= 6,8 l/seg	
	VOLUMEN AFORADO	TIEMPO (Seg)	VOLUMEN AFORADO	TIEMPO (Seg)
1	204	2,36	202	1,33
	164	1,83	280	1,96
	290	3,2	296	2,09
2	174	2,01	182	1,34
	160	1,84	200	1,55
	312	3,59	302	2,25
3	136	1,56	188	1,38
	178	1,98	212	1,52
	296	3,31	324	2,26
4	148	1,66	154	1,11
	220	2,46	250	1,95
	294	3,38	310	2,37
5	170	1,85	176	1,33
	228	2,59	246	1,85
	322	3,51	290	2,04
6	144	1,8	178	1,53
	174	2,19	236	2
	292	3,11	282	2,42
7	150	1,73	214	1,61
	198	2,32	282	2,08
	278	3,17	246	2,04
8	324	3,91	172	1,35
	182	2,16	230	1,8
	294	3,45	296	2,33
9	142	1,56	180	1,33
	196	2,13	268	1,9
	300	3,26	236	1,79
10	154	1,72	178	1,26
	224	2,54	196	1,39
	314	3,4	244	1,78

ANEXO F. (continuación)

Nº ORIFICIO	Q= 5 l/seg		Q= 6,8 l/seg	
	VOLUMEN AFORADO (mL)	TIEMPO (Seg)	VOLUMEN AFORADO (mL)	TIEMPO (Seg)
11	166	1,9	186	1,35
	204	2,16	210	1,41
	280	2,96	202	1,52
12	162	1,82	162	1,26
	214	2,4	184	1,42
	322	3,52	216	1,55
13	156	1,66	180	1,26
	198	2,16	198	1,46
	290	3,04	254	1,88
14	148	1,61	148	1,09
	236	2,57	176	1,27
	318	3,41	228	1,66
15	138	1,49	156	1,19
	194	2,09	186	1,38
	288	3,03	226	1,63
16	196	1,99	190	1,36
	206	2,15	182	1,31
	322	3,2	198	1,45
17	200	2,16	162	1,18
	162	1,66	188	1,41
	310	3,15	214	1,45
18	164	1,59	182	1,24
	246	2,5	220	1,53
	296	2,95	210	1,34
19	174	1,71	188	1,2
	226	2,16	276	1,68
	288	2,78	194	1,34
20	144	1,48	196	1,12
	238	2,36	212	1,35
	310	3,05	230	1,49
21	166	1,67	182	1,13
	212	2,03	214	1,36
	334	3,36	216	1,41
22	172	1,88	200	1,12
	208	2,3	250	1,45
	332	3,57	178	1,09
23	176	1,92	190	1,11
	216	2,34	236	1,45
	326	3,47	270	1,51
24	196	1,77	190	1,14
	282	2,63	244	1,33
	318	2,99	250	1,42

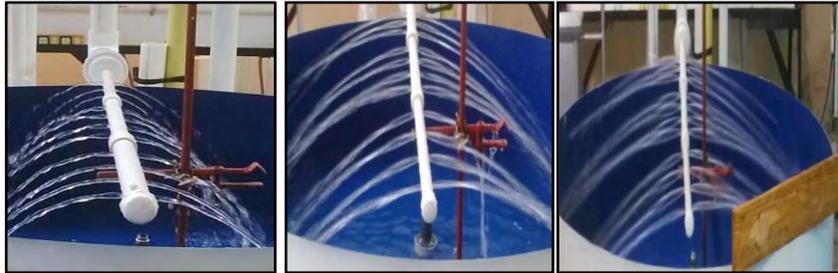
ANEXO G. DATOS OBTENIDOS CON TUBERÍA

Tubería de sección constante.



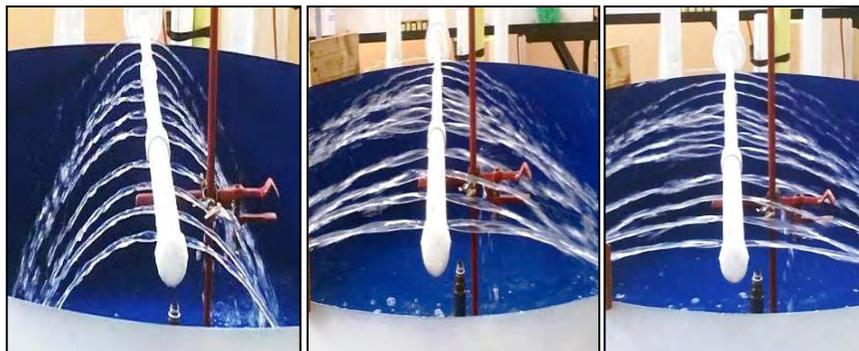
Nº ORIFICIO	Q= 0,5 lts/seg		Q= 1,00 lts/seg		Q= 1,5 lts/seg	
	VOLUMEN AFORADO (mL)	TIEMPO (Seg)	VOLUMEN AFORADO (mL)	TIEMPO (Seg)	VOLUMEN AFORADO (mL)	TIEMPO (Seg)
1	50	2,82	70	2,1	114	2,24
	58	3,34	96	2,77	94	1,8
	76	4,41	140	4,17	124	2,46
2	54	3,02	66	1,91	68	1,41
	62	4,06	92	2,6	82	1,73
	76	4,3	118	3,45	92	2,04
3	46	2,66	84	2,5	82	1,57
	70	3,59	104	3,23	112	2,35
	62	4,44	120	3,6	130	2,67
4	58	2,89	92	2,27	80	1,65
	78	3,82	112	2,83	94	1,71
	86	4,3	126	3,23	120	2,22
5	64	3,02	94	2,3	68	1,27
	84	4,02	114	2,72	102	1,88
	102	4,99	144	3,58	118	2,2
6	56	2,36	102	2,23	86	1,38
	84	3,59	132	2,98	92	1,52
	106	4,48	158	3,44	136	2,31
7	62	2,48	108	2,25	108	1,7
	82	3,28	142	2,86	152	2,33
	114	4,49	172	3,5	174	2,59
8	64	2,31	116	2,27	120	1,7
	90	3,45	162	3,13	154	2,23
	116	4,32	180	3,58	170	2,48
9	74	2,55	124	2,21	120	1,66
	98	3,41	162	2,97	152	2,01
	118	3,93	206	3,71	202	2,54
10	62	2,4	102	1,8	110	1,26
	112	3,81	132	2,38	138	1,65
	114	3,82	182	3,27	214	2,58
11	70	2,3	112	1,95	132	1,45
	98	3,16	144	2,63	150	1,74
	126	4,2	210	3,7	176	1,96

ANEXO G. TUBERÍA DE SECCIÓN VARIABLE DE MAYOR A MENOR.



		Q= 0,5 lts/seg		Q= 1,00 lts/seg		Q= 1,5 lts/seg	
DIAMETRO TUBERIA (Pulg)	Nº ORIFICIO	VOLUMEN AFORADO (mL)	TIEMPO (Seg)	VOLUMEN AFORADO (mL)	TIEMPO (Seg)	VOLUMEN AFORADO (mL)	TIEMPO (Seg)
1"	1	86,0	3,48	142	2,98	210,0	3,05
		106	4,18	122	2,59	250	3,61
		134	5,76	108	2,23	320	4,71
	2	64	3,02	108	2,38	228	3,4
		104	4,84	110	2,44	282	4,11
		110	5,1	154	3,38	284	4,17
	3	100	3,58	122	2,24	208	2,6
		126	4,43	162	3	220	2,85
		158	5,78	154	2,89	274	3,48
3/4"	4	68	3,32	136	3,35	160	2,74
		84	4,19	164	4,01	232	3,93
		100	4,92	198	5,06	220	3,73
	5	64	2,9	120	2,8	174	2,89
		80	3,49	184	4,41	230	3,76
		88	3,98	224	5,31	240	3,96
	6	64	2,73	122	2,8	284	4,04
		92	3,54	160	3,47	262	3,77
		110	4,32	150	3,17	300	4,54
	7	80	2,98	132	2,63	258	3,35
		90	3,31	156	2,99	284	3,91
		112	4,18	188	3,66	364	4,35
1/2"	8	54	2,85	134	3,61	168	3,01
		62	3,48	136	3,56	234	4,08
		78	4,19	180	4,91	298	5,29
	9	46	2,46	132	3,47	178	2,98
		64	3,45	162	3,98	234	3,88
		82	4,46	194	4,76	268	4,33
	10	66	2,92	150	3,13	212	3,17
		86	3,95	190	4,08	288	4,28
		100	4,55	202	4,34	326	4,81
	11	74	2,98	126	2,48	174	2,54
		80	3,38	100	2,05	280	4,16
		106	4,5	158	3,27	350	5,05

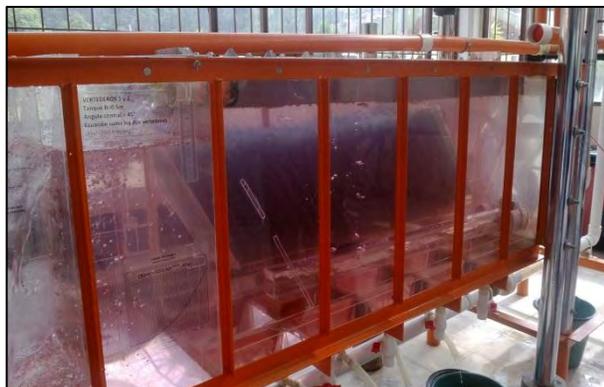
ANEXO G. Tubería de sección variable de menor a mayor.



DIAMETRO TUBERIA (Pulg)	Nº ORIFICIO	Q= 0,5 lts/seg		Q= 1,00 lts/seg		Q= 1,5 lts/seg	
		VOLUMEN AFORADO (mL)	TIEMPO (Seg)	VOLUMEN AFORADO (mL)	TIEMPO (Seg)	VOLUMEN AFORADO (mL)	TIEMPO (Seg)
1/2"	1	44	3,72	38	1,91	46	2,37
		54	4,8	66	3,34	76	3,85
		62	5,43	84	4,39	98	4,86
	2	34	3,12	38	2,64	50	3,03
		44	4,23	64	4,38	76	4,87
		52	4,91	74	5,22	82	5,38
	3	32	3,09	34	2,41	56	3,73
		44	4,43	50	3,61	70	4,79
		48	4,88	60	4,45	82	5,53
3/4"	4	38	2,96	124	2,75	126	2,63
		46	3,88	134	3,02	160	3,22
		62	5,08	194	4,32	222	4,54
	5	64	2,83	68	1,48	128	2,48
		60	3,73	112	2,3	154	3
		82	4,27	146	3,09	230	4,45
	6	54	2,07	74	1,57	98	1,63
		84	5,5	102	2,13	110	2,05
		90	3,75	160	3,29	196	3,7
	7	58	2,38	102	1,88	110	1,81
		88	3,55	134	2,55	140	2,33
		116	4,64	198	3,71	202	3,48
1"	8	66	2,45	102	1,98	140	2,07
		96	3,66	164	2,67	194	2,9
		120	4,32	234	3,88	236	3,5
	9	66	2,39	102	1,59	140	1,96
		96	3,32	176	2,88	178	2,55
		126	4,35	244	3,82	238	3,49
	10	76	2,53	114	1,84	134	2
		100	3,35	190	2,96	238	3,4
		124	4,36	240	3,74	246	3,55
	11	82	2,73	106	1,57	140	1,95
		78	2,61	122	1,79	194	2,7
		136	4,55	204	3,01	232	3,35

ANEXO H. DATOS OBTENIDOS EN EL METODO COLORIMETRICO

Tanque decantador sin placas



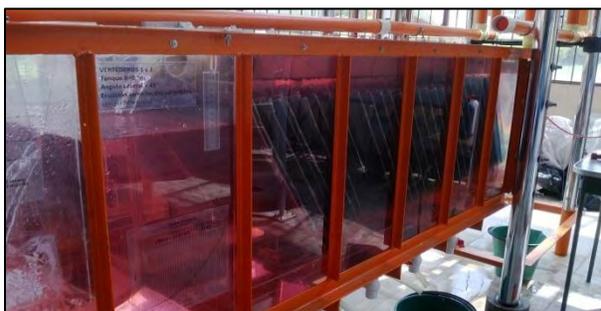
DATOS OBTENIDOS CON EL CONDUCTO DE SECCIÓN CONSTANTE, EN LA CONDICIÓN SIN PLACAS.

Q=0,5 lts/seg					Q=1,00 l/seg					Q=1,5 lts/seg				
TIEMPO (min)	LECTURA DEL COLORIMETRO (U.P.C)				TIEMPO (min)	LECTURA DEL COLORIMETRO (U.P.C)				TIEMPO (min)	LECTURA DEL COLORIMETRO (U.P.C)			
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4		Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4		Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
1	51	33	40	38	0,5	25	36	31	25	0,33	18	29	25	9
2	44	45	60	47	1	44	40	42	40	0,66	33	38	27	31
3	49	51	53	69	1,5	56	55	55	49	1	34	44	18	40
4	66	51	64	66	2	60	62	66	55	1,32	49	34	42	34
5	58	77	77	78	2,5	77	69	67	55	1,65	36	51	38	40
6	67	69	77	86	3	73	71	69	42	2	45	47	49	51
7	60	86	84	86	3,5	58	73	67	64	2,31	53	56	42	49
8	88	78	93	110	4	64	75	80	71	2,64	53	60	49	60
9	71	88	99	106	4,5	80	73	84	75	3	44	47	40	51

ANEXO H. DATOS OBTENIDOS CON EL CONDUCTO DE SECCIÓN VARIABLE, EN LA CONDICIÓN SIN PLACAS.

Q=0,5 lts/seg					Q=1,00 l/seg					Q=1,5 lts/seg				
TIEMPO (min)	LECTURA DEL COLORIMETRO (U.P.C)				TIEMPO (min)	LECTURA DEL COLORIMETRO (U.P.C)				TIEMPO (min)	LECTURA DEL COLORIMETRO (U.P.C)			
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4		Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4		Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
1	12	20	11	14	0,5	15	22	18	25	0,33	20	28	21	17
2	11	27	31	38	1	25	28	28	33	0,66	32	36	41	25
3	29	44	34	34	1,5	42	38	45	50	1	35	48	39	43
4	23	45	42	51	2	47	55	28	59	1,32	50	43	52	39
5	40	51	53	40	2,5	64	70	56	81	1,65	67	49	34	58
6	40	55	56	58	3	78	87	94	82	2	42	47	51	56
7	60	66	67	55	3,5	90	84	78	70	2,31	49	53	65	48
8	45	62	58	67	4	97	100	86	91	2,64	65	60	53	58
9	53	60	53	53	4,5	93	76	81	97	3	46	37	39	53

TANQUE DECANTADOR CON PLACAS



DATOS OBTENIDOS CON EL CONDUCTO DE SECCIÓN CONSTANTE, EN LA CONDICIÓN CON PLACAS.

Q=0,5 lts/seg					Q=1,00 l/seg					Q=1,5 lts/seg				
TIEMPO (min)	LECTURA DEL COLORIMETRO (U.P.C)				TIEMPO (min)	LECTURA DEL COLORIMETRO (U.P.C)				TIEMPO (min)	LECTURA DEL COLORIMETRO (U.P.C)			
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4		Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4		Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
1	18	20	20	27	0,5	27	34	36	31	0,33	31	31	22	29
2	22	44	34	40	1	34	34	44	33	0,66	38	40	31	33
3	23	40	44	56	1,5	42	53	60	62	1	34	40	49	44
4	44	69	51	58	2	62	66	62	60	1,32	38	44	45	58
5	51	51	75	75	2,5	56	56	71	69	1,65	49	45	60	51
6	71	60	69	71	3	53	69	71	73	2	55	45	51	56
7	66	60	84	89	3,5	69	71	77	69	2,31	55	56	49	56
8	82	73	86	89	4	60	73	82	77	2,64	58	55	44	53
9	62	73	95	95	4,5	78	80	82	67	3	64	64	58	64

ANEXO H. DATOS OBTENIDOS CON EL CONDUCTO DE SECCIÓN VARIABLE, EN LA CONDICIÓN CON PLACAS.

TIEMPO (min)	Q=0,5 lts/seg				TIEMPO (min)	Q=1,00 l/seg				TIEMPO (min)	Q=1,5 lts/seg			
	LECTURA DEL COLORIMETRO (U.P.C)					LECTURA DEL COLORIMETRO (U.P.C)					LECTURA DEL COLORIMETRO (U.P.C)			
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4		Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4		Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
1	7	20	20	23	0,5	27	29	25	27	0,33	33	29	40	42
2	20	33	31	38	1	25	34	25	29	0,66	42	49	51	38
3	20	40	42	44	1,5	44	38	36	42	1	44	51	58	55
4	42	49	49	51	2	38	55	44	45	1,32	55	66	64	55
5	51	58	66	67	2,5	55	55	56	55	1,65	44	40	67	64
6	47	69	71	78	3	58	71	55	60	2	56	56	64	55
7	71	73	82	84	3,5	64	67	73	73	2,31	77	44	69	56
8	67	82	88	86	4	80	84	75	77	2,64	80	64	69	56
9	86	89	97	99	4,5	91	86	88	89	3	66	56	66	56

ANEXO I. DATOS OBTENIDOS EN EL METODO GRAVIMETRICO.

Datos obtenidos con el conducto de sección constante.

ZONA	Q=0,5 lps	Q=1,00 lps	Q=1,5 lps
	PESO (gr)		
1	50,8	554,76	604,1
2	31,13	119,65	102,5
3	24,81	84,78	82,3
4	9,23	161,64	132,5
5	3,62	53,88	51,1
Retenido Tamiz #200	1,17	0,63	0
Retenido en el canal	760,84	0	0
TOTAL	881,6	975,34	972,5

Datos obtenidos con el conducto de sección variable.

ZONA	Q=0,5 lps	Q=1,00 lps	Q=1,5 lps
	PESO REAL (gr)		
1	73,48	227	264,82
2	38,13	45	126,81
3	26,16	75	115,31
4	20,94	525	219,41
5	9,49	75	238,59
Retenido Tamiz #200	1,04	0,58	1,77
Retenido en el canal	732	0	0
TOTAL	901,24	947,58	966,71