

UCUENCA

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

“EVALUACIÓN HIDRÁULICA DE UN FLOCULADOR CONVENCIONAL EN LA PLANTA POTABILIZADORA DE LA JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS-AZOGUES”

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

Autores:

Carla Soledad Enderica Ortega

CI: 0104835269

Correo: carla18102016@icloud.com

José Luis Delgado Guamán

CI: 1400626659

Correo: josedelgadog44@gmail.com

Director:

Ing. Esteban Remigio Sánchez Cordero.

CI:0103665634

Cuenca, Ecuador

10-agosto-2022

Resumen:

La floculación es uno de los procesos prioritarios para la potabilización del agua; el mismo que siendo ineficaz da como resultado agua potable de menor calidad para los procesos de tratamiento aguas abajo, poniendo en peligro la calidad del agua tratada y aumentando los costos operativos. El objetivo de este estudio fue evaluar la eficiencia hidráulica de un floculador de pantallas de flujo horizontal en la planta potabilizadora de la Junta Administradora de Agua Potable Regional Bayas-Azogues. Para ello, primero se midieron las características geométricas de las tres zonas del floculador. Posterior, se realizó la prueba de trazadores con sal para los tres caudales de estudio (6.78, 7.84 y 8.59 l/s). Para predecir de manera sistemática el comportamiento real del floculador se utilizaron los modelos matemáticos Hec-RAS (unidimensional) e IBER (bidimensional). Los principales resultados se dividen en una primera fase del estudio que consistió en la obtención y comparación de los factores hidrodinámicos experimentales y analíticos que determinan el funcionamiento de este reactor. La segunda fase consistió en el estudio y comparación de los resultados hidráulicos obtenidos de los modelos (Hec-RAS e IBER). Como conclusiones, el floculador funciona predominantemente en flujo pistón, con presencia de zonas muertas en mayor porcentaje en la zona 3 del mismo. De los resultados del modelo IBER (bidimensional) se determinó que, en las esquinas del floculador, es decir donde se producen los cambios de dirección, existen zonas de estancamiento debido a las velocidades muy bajas que se alcanzan en esas secciones. estudios en los que sea necesario analizar con mayor detalle el comportamiento hidráulico debe realizarse la modelación con IBER (bidimensional), puesto que Hec-RAS (unidimensional) no ofrece resultados al respecto.

Palabras clave :Eficiencia hidráulica. Floculador. Modelo matemático.

Abstract:

Flocculation is one of the priority processes for the purification of water; which, being ineffective, results in lower quality drinking water for downstream treatment processes, decreasing the quality of the treated water and increasing operating costs. The objective of this study was to evaluate the hydraulic efficiency of a horizontal flow screen flocculator in the water treatment plant of the “Bayas-Azogues”. To do this, first the geometric characteristics of the three zones of the flocculator were measured. Subsequently, the salt tracer test was performed for the three study flows (6.78, 7.84 and 8.59 l/s). To systematically predict the real behavior of the flocculator, the Hec-RAS (one-dimensional) and IBER (two-dimensional) mathematical models were used. The main results are divided into a first phase of the study that consisted in obtaining and comparing the experimental and analytical hydrodynamic factors that determine the operation of this reactor. The second phase consisted of the study and comparison of the hydraulic results obtained from the models (Hec-RAS and IBER). As conclusions, the flocculator works predominantly in piston flow, with the presence of dead zones in a higher percentage in zone 3 of it. From the results of the IBER model (two-dimensional), it was determined that, in the corners of the flocculator, that is, where changes in direction occur, there are areas of stagnation due to the very low speeds reached in those sections.

Keywords: Hydraulic efficiency. Flocculator. Mathematical model.

Índice de contenido

AGRADECIMIENTO	7
DEDICATORIA.....	12
OBJETIVOS	15
CAPÍTULO 1- MARCO TEÓRICO	16
CAPÍTULO 2- PROCESO DE TRATAMIENTO DE POTABILIZACIÓN DE LA JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS-AZOGUES	22
CAPÍTULO 3- METODOLOGÍA	26
CAPITULO 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	35
CAPITULO 5. CONCLUSIONES.....	58
CAPITULO 6. RECOMENDACIONES.....	60
REFERENCIAS	61
ANEXOS	64

Índice de Tablas

Tabla 1. Relación viscosidad-temperatura.....	20
Tabla 2. Propiedades geométricas del floculador.....	24
Tabla 3. Resultados de la medición de caudales para cada prueba	35
Tabla 4. Volumen del floculador obtenido en cada prueba.....	35
Tabla 5. Datos de los tiempos y concentración obtenidos del ensayo de trazadores para los tres caudales en cada zona del floculador.....	37
Tabla 6. Resultados obtenidos mediante la aplicación de indicadores de patrones hidrodinámicos	39
Tabla 7. Resultados promedio del modelo Wolf-Resnick en cada zona del floculador.	41
Tabla 8. Velocidades del flujo en cada zona del floculador	42
Tabla 9. Pérdidas en el floculador correspondiente a todos los caudales estudiados	42
Tabla 10. Gradiente del floculador para los tres caudales.	42
Tabla 11. Porcentaje de error obtenido con los modelos Hec-RAS e IBER en relación al valor del calado de agua medido en campo para los tres caudales.....	48
Tabla 12. Porcentaje de error obtenido con los modelos IBER y Hec-RAS en relación al valor del calado de agua medido en campo para las 6 secciones	50
Tabla 13. Porcentaje de error obtenido con los modelos IBER y Hec-RAS de las velocidades para las 6 secciones.....	53

Índice de Figuras

Figura 1. Floculador hidráulico a) flujo horizontal b) flujo vertical	17
Figura 2. Floculador Mecánico.....	17
Figura 3. Ubicación de la Junta Administradora de Agua Potable Regional “Bayas”, respecto del centro de la ciudad de Azogues.....	22
Figura 4. Floculador de la PTAP Bayas	24
Figura 5. Esquema conceptual de los tiempos de retención.	27
Figura 6. Aplicación del método Wolf-Resnick.....	28
Figura 7. Editor de los datos de las secciones transversales del canal	31
Figura 8. Representación de los tramos discretizados en la zona 1	32
Figura 9. Modelo del floculador importado desde archivo dxf.	33
Figura 10. Representación del mallado del modelo	34
Figura 11. Curvas C(t) de la zona 1: a) ensayo 1, b) ensayo 2	36
Figura 12. Contrastación de los tiempos de retención teóricos vs experimentales	38
Figura 13. Curva 1 – F(t) usada para el modelo Wolf – Resnick de la zona 1, ensayo 140	
Figura 14. Curva 1 – F(t) usada para el modelo Wolf – Resnick de la zona 1, ensayo 240	
Figura 15. Curva altura vs distancia longitudinal del floculador usando Q1 (6.78 l/s) del modelo HEC-RAS	44
Figura 16. Contrastación de los calados de agua obtenidas del modelo IBER para los diferentes tamaños de malla	45
Figura 17. Contrastación de los calados de agua obtenidas del modelo IBER para los diferentes tamaños de malla	45
Figura 18. Contrastación de calados obtenidas del modelo HEC RAS vs IBER para Q1= 6.78 l/s	46
Figura 19. Contrastación de calados obtenidas del modelo HEC RAS vs IBER para Q2= 7.84 l/s	47
Figura 20. Contrastación de calados obtenidas del modelo HEC RAS vs IBER para Q3= 8.59 l/s	47
Figura 21. Ubicación de las seis secciones establecidas para el análisis de calado y velocidad en la zona donde hay cambio de dirección	49
Figura 22. Contrastación de resultados de calado de los modelos IBER vs Hec-RAS correspondiente a Q1= 6.78 l/s para los perfiles de las 6 secciones.....	50
Figura 23. Mapa de áreas coloreadas de los valores de velocidad para Q1= 6.78 L/s ...	51

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Carla Soledad Enderica Ortega en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "EVALUACIÓN HIDRÁULICA DE UN FLOCULADOR CONVENCIONAL EN LA PLANTA POTABILIZADORA DE LA JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS-AZOGUES", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 10/08/2022



Carla Soledad Enderica Ortega

C.I: 0104835269

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

José Luis Delgado Guamán en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "EVALUACIÓN HIDRÁULICA DE UN FLOCULADOR CONVENCIONAL EN LA PLANTA POTABILIZADORA DE LA JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS-AZOGUES", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 10/08/2022



José Luis Delgado Guamán

C.I: 1400626659

Cláusula de Propiedad Intelectual

Carla Soledad Enderica Ortega, autor/a del trabajo de titulación "EVALUACIÓN HIDRÁULICA DE UN FLOCULADOR CONVENCIONAL EN LA PLANTA POTABILIZADORA DE LA JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS-AZOGUES", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 10/08/2022



Carla Soledad Enderica Ortega

C.I: 0104835269

Cláusula de Propiedad Intelectual

José Luis Delgado Guamán, autor/a del trabajo de titulación "EVALUACIÓN HIDRÁULICA DE UN FLOCULADOR CONVENCIONAL EN LA PLANTA POTABILIZADORA DE LA JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS-AZOGUES", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 10/08/2020



José Luis Delgado Guamán

C.I: 1400626659

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios que nos ha concedido la vida y día a día nos fortalece y bendice permitiéndonos escalar un peldaño en nuestra vida profesional.

A nuestro director. Ing. Esteban Sánchez y codirector. Ing. Fernando García por su gran aporte de conocimiento, tiempo y dedicación se convirtieron en el pedestal de este trabajo de titulación que nos permite obtener nuestro título universitario, de igual manera a nuestros revisores Ing. Esteban Pacheco e Ing. Felipe Cisneros por su predisposición, apoyo y disponibilidad.

Un grupo de profesionales que junto a los demás docentes de la prestigiosa Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca nos han regalado sus mejores cátedras. Y a través de su experiencia han forjado a dos jóvenes capaces de desarrollarse en el campo de la Ingeniería Civil.

Carla S. Enderica Ortega.

José L. Delgado Guamán

DEDICATORIA

A mis padres Soledad y Hernán por su gran amor, por todo su esfuerzo y por dejarme la mejor herencia que es la educación. A mi esposo Franco y mis hijos Isaac y Martina por su comprensión y apoyo por ser mi motivación para perseverar y cumplir mis objetivos.

Carla S. Enderica Ortega.

A mis padres Nohemí y Fernando, a mis abuelos Luis y Aida que con sus enseñanzas y apoyo constante me dieron la fuerza y el valor para cumplir este anhelado objetivo.

José L. Delgado Guamán

INTRODUCCION

Actualmente la humanidad atraviesa la crisis mundial del agua, ya que gran parte de los recursos hídricos del planeta se encuentran sometidos a altos niveles de contaminación (Echeverría & Anaya, 2018). El derecho humano al agua potable es un tema fundamental al tener una estrecha relación con los estándares de una vida digna (Valdés De Hoyos & Uribe Arzate, 2016); por lo tanto, el agua cruda debe tratarse adecuadamente antes de distribuirse a los consumidores. Los procesos de tratamiento convencionales para potabilizar el agua cruda son la coagulación, la floculación, la clarificación (sedimentación), la filtración y la desinfección (Jama, 2013). La floculación es uno de los procesos prioritarios para la potabilización del agua, se lleva a cabo después de la coagulación y consiste en la agitación lenta del volumen de agua para lograr la aglomeración de las partículas en suspensión en unas de mayor tamaño llamadas flóculos (Zapata Rivera & Manjarres, 2020). La coagulación y floculación ineficaces dan como resultado agua potable de menor calidad para los procesos de tratamiento aguas abajo, lo que potencialmente pone en peligro la calidad del agua tratada y aumenta los costos operativos (Bridgeman et al., 2010).

Jama (2013) sostiene que la comprensión de los procesos fisicoquímicos de la escala de flóculos junto con la hidrodinámica en una unidad de floculación es de gran importancia, y que esta se puede modelar numéricamente para optimizar el paso del tratamiento de floculación, así pues, en su estudio modeló numéricamente una unidad de floculación en Överby, obteniendo una buena correlación entre la velocidad del modelo numérico y las velocidades medidas experimentales en la unidad de floculación. De manera similar, Bridgeman et al. (2010) demostró la variedad de escalas y aplicaciones a las que se puede aplicar con éxito el CFD (Computational fluid dynamics) a los procesos de floculación utilizados para el tratamiento del agua.

Asimismo, Shi et al. (2019) en su estudio simulaban el proceso de floculación y sedimentación con base en modelos de balance poblacional (PBM) y dinámica de fluidos computacional (CFD); demostrando que la floculación es un proceso dinámico y no lineal que contiene agregación, rotura, reagregación y ruptura entre partículas, microflocs y macroflocs. Además, el proceso visual de floculación y sedimentación, creado directamente por los resultados de la simulación, estuvo de acuerdo con los resultados de los experimentos anteriores. De igual manera, Gonzalías (2019) evaluó el floculador de manera experimental mediante un ensayo de trazadores y la simulación CFD en tres dimensiones (3D), permitiendo así establecer que el floculador dos opera en condiciones que afectan su desempeño desde el punto de vista hidrodinámico, al funcionar como un reactor no ideal

presentando un flujo mezclado con tendencia a flujo pistón, además de evidenciar la existencia de cortos circuitos y zonas muertas.

En este contexto, surge la importancia de evaluar la eficiencia que tienen las unidades de floculación que se encuentran en una planta potabilizadora, y emitir recomendaciones que aporten a garantizar su eficacia y buen funcionamiento, basándose en que éstas deben estar diseñadas de manera correcta (Aguirre Martínez, 2015), para así garantizar que la población tenga acceso al agua sin obtener riesgos en la salud.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia hidráulica de un floculador de pantallas de flujo horizontal en la planta potabilizadora de la Junta Administradora de Agua Potable Regional Bayas-Azogues

OBJETIVO ESPECÍFICOS

O.E.1. Evaluar el funcionamiento del floculador mediante la recopilación de datos en esta unidad de tratamiento y mediante los parámetros de funcionamiento como lo son: el tipo de flujo, gradiente de velocidad, tiempo de retención, velocidad flujo y el caudal.

O.E.2. Realizar un análisis unidimensional y bidimensional en softwares de modelamiento hidráulico.

O.E.3. Identificar los problemas de funcionamiento hidráulico del floculador.

CAPÍTULO 1- MARCO TEÓRICO

1.1. Proceso de floculación

La floculación es uno de los procesos prioritarios, se lleva a cabo después de la coagulación y consiste en la agitación lenta del volumen de agua para lograr la aglomeración de las partículas en suspensión en unas de mayor tamaño llamadas floculos (Zapata Rivera & Manjarres, 2020). La coagulación y floculación ineficaces dan como resultado agua potable de menor calidad para los procesos de tratamiento aguas abajo, lo que potencialmente pone en peligro la calidad del agua tratada y aumenta los costos operativos (Bridgeman et al., 2010).

1.2. Floculadores

Las unidades donde se lleva a cabo la floculación son conocidas como floculadores y se clasifican según la potencia utilizada para producir la agitación en hidráulicos, mecánicos o neumáticos (Zapata Rivera & Manjarres, 2020).

1.2.1. Tipos Hidráulicos

Los floculadores hidráulicos provistos de pantallas consisten en tanques entre los cuales el agua circula con una velocidad fija, produciendo cierta turbulencia en cada cambio de dirección del flujo (Aldapa, 2001). La ventaja de un floculador hidráulico es la inexistencia de equipo mecánico y mínimo mantenimiento y la desventaja es la alta pérdida de carga y poca flexibilidad de control en el grado de mezcla (Rivera, 2017).

Existen de flujo horizontal y de flujo vertical; en los primeros, el flujo circula alrededor de los tabiques, haciendo un giro de 180°, al final de cada uno. En los segundos, el flujo sube y baja, en condiciones similares (Aldapa, 2001). En la Figura 1 se presenta un esquema de estos floculadores.

Los floculadores hidráulicos de flujo horizontal son estructuras usadas dentro del proceso de potabilización, diseñadas por compartimientos para asegurar una disipación de energía que permite cambiar de manera controlada, el régimen de flujo de turbulento, proveniente de la mezcla rápida, a laminar para la descarga en el sedimentador (Vargas et al., 2019).

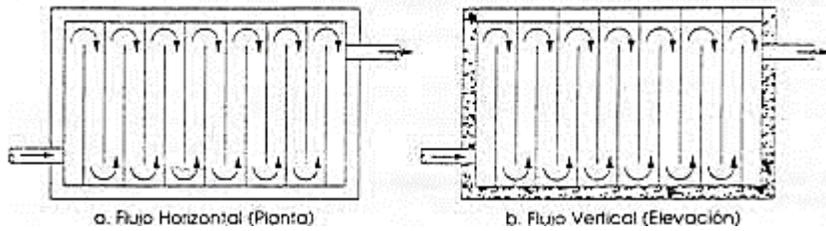


Figura 1. Floculador hidráulico a) flujo horizontal b) flujo vertical

Mecánicos

Los floculadores mecánicos están compuestos por paletas o rastrillos y son agitados por un motor para lograr el movimiento del agua, como se observa en la Figura 2. La ventaja de los floculadores mecánicos es la alta flexibilidad de control en el grado de mezcla y su desventaja es la existencia de equipo mecánico y mantenimiento (Rivera, 2017).

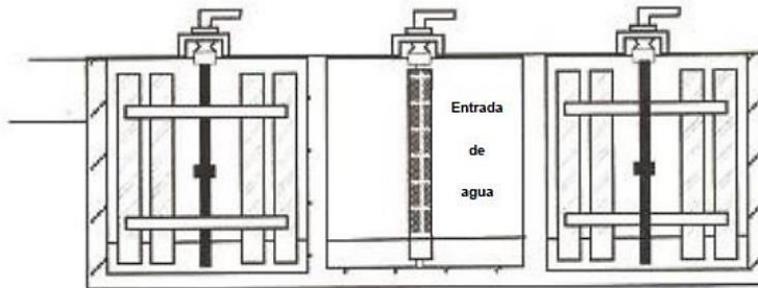


Figura 2. Floculador Mecánico

1.3. Tipo de flujo

Dentro de cada unidad, el flujo puede ser: flujo continuo o flujo discontinuo (intermitente).

1.3.1. Flujo continuo

Se subdivide en: flujo pistón, mezclado y no ideal.

- Flujo pistón: es aquel en el que las partículas del fluido que entran a la unidad permanecen en ella el mismo tiempo, así pues, todos los elementos del fluido que pasan a través del sistema y son descargados en la misma secuencia en que fueron introducidos y no hay ningún tipo de mezcla entre el fluido que ingresa y el fluido que está en la unidad (Vargas & Pérez, 2010).

- Flujo mezclado: un reactor con flujo mezclado se caracteriza por ser en el que todo elemento que ingresa se dispersa de manera inmediata dentro de él (Vargas & Pérez, 2010).
- Flujo no ideal: corresponde a cualquier grado intermedio entre flujo pistón y mezcla completa con otras posibles alteraciones como la presencia de zonas muertas, cortocircuitos hidráulicos y recirculaciones (Vargas & Pérez, 2010).

1.3.2. Flujo discontinuo

Consiste en llenar la unidad y dejar durante un tiempo el líquido, posteriormente vaciar la unidad y reanudar el ciclo. Este tipo de flujo, en muchos casos, no es muy práctico y por ello es el menos habitual (Aguirre Martínez, 2015).

1.4. Factores hidrodinámicos

La hidrodinámica de los floculadores es un aspecto importante ya que esta puede alterar su desempeño. De igual manera, la hidrodinámica se puede ver afectada por patrones de recirculación del fluido, zonas muertas y cortos circuitos. Por ello, el diseño y la operación de un floculador exigen un detallado conocimiento de estos fenómenos (Gonzalías, 2019).

Para el análisis hidrodinámico del floculador se emplearon las ecuaciones 1 al 7 que se detallan a continuación:

1.4.1. Velocidad de flujo

Se describe matemáticamente el movimiento de un medio continuo.

$$v = \frac{L}{t_o} \quad (1)$$

v= velocidad de flujo

L= longitud de canal recorrida

t_o = tiempo de retención

1.4.2. Tiempo de retención (enfocándose en los floculadores de flujo horizontal)

Tiempo en el que se almacena un volumen de agua residual en este caso en el reactor.

$$t_o = \frac{V}{Q} \quad (2)$$

t_o = tiempo de retención
 V = Volumen de la unidad
 Q = caudal

1.4.3. Pérdidas (H)

1.4.3.1. Pérdida de carga debida a las vueltas

Pérdida de presión que se produce en el fluido debido a las vueltas.

$$h_1 = \frac{k * v^2 * (N - 1)}{2g} \quad (3)$$

h_1 = pérdida de carga debida a las vueltas
 v = velocidad del flujo
 k = coeficiente de pérdida de carga en las vueltas
 N = número de canales

1.4.3.2. Radio hidráulico para canal rectangular

Parámetro importante en el diseño del canal, se lo puede calcular a través de la forma geométrica de la sección transversal del canal. $R = A/P$ (A = área, P = perímetro).

$$R = \frac{a * b}{2a + b} \quad (4)$$

R = Radio hidráulico para canal rectangular
 a = altura del canal mojado
 b = ancho del canal

1.4.3.3. Pérdida de carga en los canales

$$h_2 = \frac{(n * v)^2 * L}{R^{4/3}} \quad (5)$$

h_2 = pérdida de carga en los canales
 R = radio hidráulico
 L = longitud del canal

v= velocidad del flujo

n= coeficiente de rugosidad (0.012 hormigón)

1.4.3.4. Pérdida de carga total en el floculador

$$H = h_1 + h_2 + h_3 \quad (6)$$

h₃= desnivel del fondo del tanque

1.4.4. Gradiente de velocidad (G)

Es el índice de cambio de velocidad con la distancia de las placas.

$$G = \sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} * \sqrt{\frac{H}{t}} \quad (7)$$

G= gradiente de velocidad

$\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}}$ = relación viscosidad

H = pérdida de carga en el floculador

t = tiempo de retención

La relación de viscosidad ($\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}}$) varía según la temperatura:

Tabla 1. Relación viscosidad-temperatura

Temperatura [°C]	$\sqrt{\frac{Y}{\mu}}$
0	2337
4	2502
10	2737
15	2920
17	2998
20	3115
25	3267

Fuente: Moral y Sagal (2019)

CAPÍTULO 2- PROCESO DE TRATAMIENTO DE POTABILIZACIÓN DE LA JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS-AZOGUES

2.1. Agua potable regional Bayas-Azogues

La Junta Administradora de Agua Potable Regional Bayas brinda sus servicios a las comunidades de: Leg Abuga, Leg tabacay, Señor de las Flores, Corazón de María, General Veintimilla, Oriente Alto, Oriente Bajo, Zhirincay y Juguil-Abuga, jurisdicción de la parroquia Bayas, cantón Azogues, provincia del Cañar (Calderón, 2018).

La planta de potabilización de agua de la Junta Parroquial de Bayas está ubicada en sector Mahuarcay, parroquia “Aurelio Bayas Martínez” (Figura 3), cantón Azogues, provincia del Cañar. De acuerdo a Gutiérrez Sarmiento (2017), en 1998 se construyó la planta de potabilización y trabajaba únicamente con el proceso de filtración lenta. En el año 2011 se rediseñó la misma y se construyeron unidades de floculación, coagulación y una batería de filtros rápidos, desde ese entonces la planta trabaja con los procesos generales que involucra una planta de potabilización; con dos floculadores hidráulicos de flujo vertical, con un tiempo de retención de 21 minutos aproximadamente, con pantallas de asbesto-cemento.

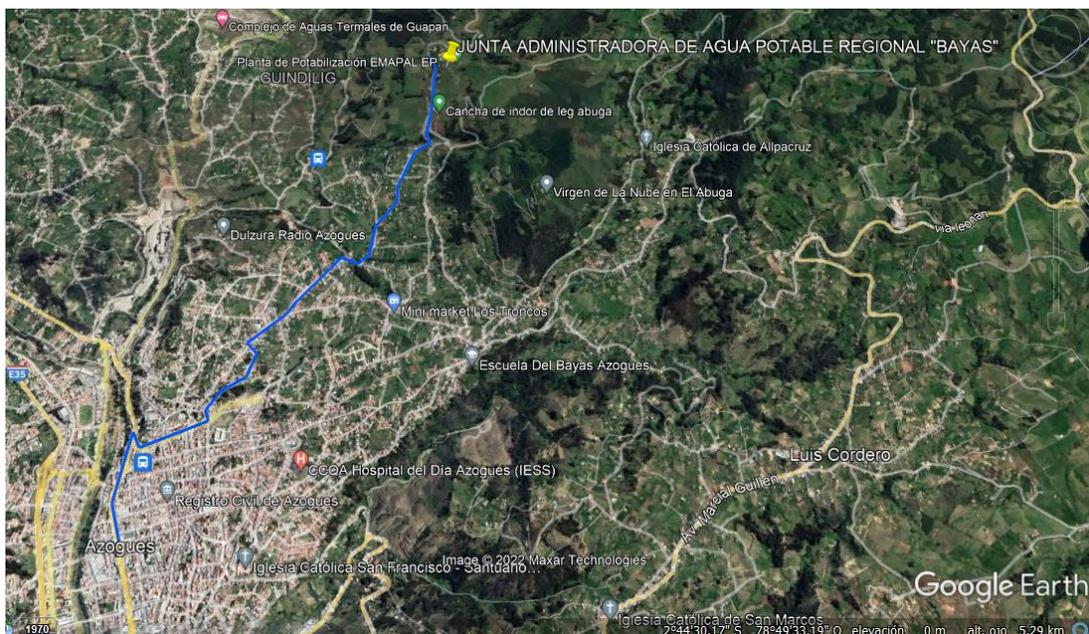


Figura 3. Ubicación de la Junta Administradora de Agua Potable Regional “Bayas”, respecto del centro de la ciudad de Azogues.

En junio del 2018 la planta construyó un floculador hidráulico de flujo horizontal, así como también las unidades de sedimentación y filtración para mejorar el proceso de potabilización del agua (Moral & Sagal, 2019). Así pues, la planta para el 2017 contaba con 1198 usuarios (Gutiérrez Sarmiento, 2017), actualmente ofrece sus servicios de agua potable a diez sectores pertenecientes a la parroquia abasteciendo a 1420 usuarios, aproximadamente 6000 personas (Moral & Sagal, 2019).

2.2. Captaciones de la planta

El abastecimiento de la planta de tratamiento de Bayas proviene de 4 diferentes captaciones siendo estos: captación de Pillzho el cual se encuentra a 7 km de distancia de la planta, la quebrada de Chagrarchazca ubicada a 5 km, la quebrada de Mahuarca con 400 m de distancia, y finalmente la captación de Santa Ana, el mismo se encuentra a 7 km de la planta. El transporte del agua desde el punto de captación a la planta se realiza a través de tuberías subterráneas de PVC, conduciéndola por gravedad (Moral & Sagal, 2019).

2.3. Floculación

Hasta junio del 2018, la planta trabajaba con dos floculadores hidráulicos de flujo vertical. El tiempo de retención era de 21 minutos aproximadamente; las pantallas eran de asbesto-cemento de 0,7 m x 1,8 m (Gutiérrez Sarmiento, 2017). Los gradientes de velocidad se encontraban alrededor de 37 s^{-1} (Calle & Zambrano, 2015).

La nueva unidad construida en la planta es un floculador hidráulico de pantalla de flujo horizontal con paredes construidas de concreto, formado por cámaras de tabiques convenientemente ubicados para permitir el paso del agua a una velocidad apropiada, con la finalidad de asegurar la mezcla adecuada. Los valores de gradientes de trabajo están entre: 70 y 20 s^{-1} (Moral & Sagal, 2019). La unidad de floculación se encuentra dividida en tres zonas dispuestas como se observa en la Figura 4.

Los datos de la unidad de floculación se detallan en la Tabla 2, los mismos que fueron medidos en campo por los autores



Figura 4. Floculador de la PTAP Bayas

Tabla 2. Propiedades geométricas del floculador

		FLOCULADOR		
Propiedad	Unidad	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3
Longitud tabique	[m]	1.85	2.72	1.74
Espesor tabique	[m]	0.03	0.03	0.03
Ancho del tanque	[m]	2.1	3.01	2.09
Número de canales	N	19	15	24
Largo del tanque	[m]	3.45	3.93	6.39
Número de tabiques	N	19	15	24
Área	[m ²]	5.54	9.13	11.93

2.4. Sedimentación

Después de la floculación las partículas sólidas el agua es conducida al proceso de sedimentación, proceso que se realiza en los decantadores laminares de flujo ascendente de alta tasa ubicados en cada módulo. Estos decantadores están formados por 85 láminas de asbesto cemento de 8mm inclinadas a 60° y dispuestas paralelamente. La salida de agua decantada se la realiza por tubos perforados ubicados en la parte superior del sedimentador (Calle & Zambrano, 2015).

2.5. Filtración

Consiste en hacer pasar el agua que todavía contiene materias en suspensión a través de un medio filtrante que retiene estas partículas sólidas. El medio filtrante que más se utiliza es la arena y otra capa de grava (Calderón, 2018).

Antes de que el agua pase por los filtros rápidos, pasa por pre-filtros de grava de flujo horizontal. La planta consta de dos pre-filtros, uno en cada módulo, en un pre-filtro está constituido de grava gruesa y el otro pre-filtro de grava fina. La función de estos pre-filtros es disminuir la carga de material en suspensión antes de ingresar a los filtros rápidos (Gutiérrez Sarmiento, 2017).

Para la filtración rápida, la planta dispone de una batería con un número de 4 filtros rápidos de tasa declinante, auto lavables y de lecho simple compuesto por arena. Las medidas de cada filtro son: ancho 1.20 m, longitud 1.60 m, profundidad 4.00 m (Gutiérrez Sarmiento, 2017).

2.6. Desinfección

El agua es llevada a la cámara de cloración; donde se agrega hipoclorito de calcio en un porcentaje de cloro disponible de 70%, la dosificación se realiza por goteo de manera directa.

La planta dispone de un dosificador provisional de plástico que ayuda a disminuir los problemas de obstrucción en las mangueras. El volumen de cloro a aplicar está en función del caudal de agua tratada, cuya concentración de cloro residual oscila entre 0.5 - 1 mg/l, que sería la concentración de cloro residual óptima. La eficiencia de este tipo de cloración es aceptable (Gutiérrez Sarmiento, 2017).

CAPÍTULO 3- METODOLOGÍA

3.1. ENSAYO DE TRAZADORES Y MÉTODO DE WOLF RESNICK

Como primer paso se midieron las características geométricas de las tres zonas del floculador, detalladas previamente en la tabla 1. Posterior, se realizaron tres pruebas en cada zona, en cada prueba se midió el caudal de ingreso, el calado de agua, la temperatura y se realizó la prueba de trazadores.

3.1.1. Ensayo de trazadores

Los ensayos de trazadores se han utilizado para validar los modelos CFD en los que se representa el comportamiento cinético e hidrodinámico del fluido en unidades de tratamiento de agua (Zapata Rivera & Manjarres, 2020). Este ensayo consiste en agregar la sustancia trazadora a la entrada de la unidad que se quiere analizar, con una concentración conocida y finalmente determinar cómo dicha concentración se distribuye a través del tiempo (Aguirre Martinez, 2015).

Mediante la ecuación 8 se determinó la cantidad de sustancia trazadora utilizada en los ensayos.

$$P = \frac{\alpha * K * Co}{i * 10^3} \quad (8)$$

P= peso del trazador [kg]

α = volumen floculador [m³]

K= constante de correlación (K=1.65)

Co= concentración [g/m³] (Co=45)

i= grado de pureza (98%)

Con los datos obtenidos, se calcula y dibuja las curvas de distribución de los flujos y sus respectivos tiempos de retención como se muestra en la figura 5.

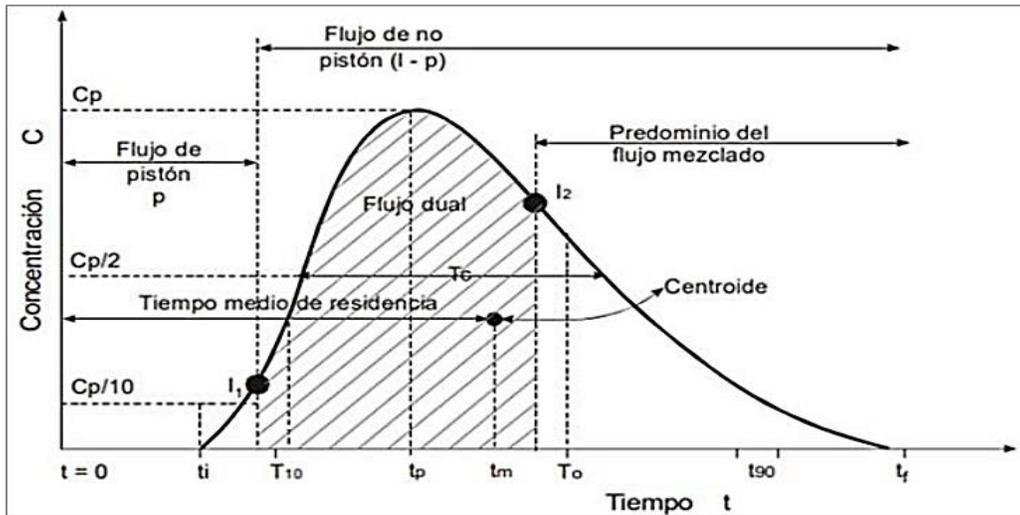


Figura 5. Esquema conceptual de los tiempos de retención.

Fuente: (Sánchez & Gallo, 2009)

Donde:

t_i : Tiempo inicial desde que se aplica el trazador hasta que este aparece en el efluente

t_{10} : Tiempo correspondiente al paso del 10% de la cantidad total del trazador

t_p : Tiempo modal, corresponde al tiempo para el cual se presenta la máxima concentración en el reactor

t_m : Tiempo mediano, corresponde al paso del 50% del trazador

t_0 : Tiempo teórico de retención

t_{90} : Tiempo correspondiente al paso del 90% del trazador

t_f : Tiempo que transcurre hasta que atraviesa la totalidad del trazador

t_c : Tiempo para el cual la concentración es mayor que $C_p/2$

C_i : Concentración inicial

C_p : Concentración máxima

El parámetro t_m se encuentra mediante la ecuación 9

$$t_m = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} \quad (9)$$

3.1.2. Modelo matemático de Wolf y Resnick

Por medio del modelo se puede cuantificar el porcentaje de flujo Pistón (P), mezcla completa (M) y zonas muertas (m), que se presentan en un reactor durante una operación normal (Sánchez & Gallo, 2009). Este modelo se representa por la ecuación 10:

$$F(t) = 1 - \exp \left(- \frac{1}{(1-p)(1-m)} \left[\frac{t}{t_0} - p(1-m) \right] \right) \quad (10)$$

Para encontrar los parámetros de la ecuación 10 se debe construir la gráfica de 1-F en escala semilogarítmica y en función del tiempo adimensional (t/t_0), como se representa en la Figura 6.

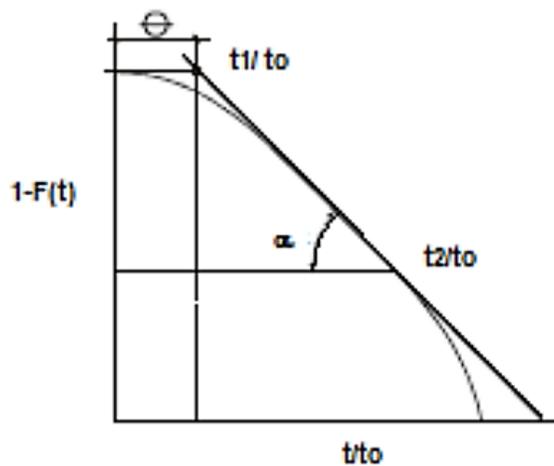


Figura 6. Aplicación del método Wolf-Resnick

Fuente: (Patiño et al., 2012)

Luego se traza una recta tangente en el punto donde la línea comienza a volverse vertical. El ángulo comprendido entre la recta tangente y la horizontal es α , y Θ al intercepto de la recta con el eje de las abscisas, obteniéndose las siguientes ecuaciones:

Porcentaje de flujo pistón:

$$p = \frac{\theta \tan \alpha}{0.435 + \theta \tan \alpha} \quad (11)$$

Volumen de espacios muertos:

$$m = 1 - \frac{\theta}{p} \quad (12)$$

Porcentaje de flujo mezclado:

$$M = 100 - p \quad (13)$$

Los valores de θ y α se obtienen de la curva de Log 1-F(t), resultando:

$$\theta = \frac{t_1}{t_0} \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{1}{\frac{t_2}{t_0} - \frac{t_1}{t_0}} \quad (15)$$

3.1.3. Zonas muertas y cortocircuitos hidráulicos

La existencia de zonas muertas y corto circuitos en las unidades de tratamiento pueden afectar considerablemente la operación y la eficiencia de los mismos.

Las zonas muertas son un factor macroscópico que incide en el tiempo de residencia de la sustancia trazadora. Hay dos tipos de zonas muertas dentro de un sistema: las ocasionadas por cortos circuitos hidráulicos y las provocadas por fluido “estancado” (Vargas & Pérez, 2010).

Se define cortocircuito hidráulico como aquella parte del flujo que tiene una velocidad infinita y un tiempo de retención cero. Parte del volumen que entra atraviesa el sistema con tanta rapidez que sale instantáneamente, sin permanecer almacenado en él. Se presenta debido a defectos en el diseño de la estructura de entrada y salida que permiten el paso directo entre unas y otras, por corrientes de densidad de origen térmico o por variación de concentración, así como por efecto de la rotación de paletas en agitadores que impulsan parte de la masa líquida para que salga tan pronto como entra (Vargas & Pérez, 2010).

3.2. MODELIZACIÓN HIDRÁULICA

3.2.1. Hec Ras

HEC-RAS es un software de uso libre, cuyo proceso evolutivo ha venido desarrollando nuevas herramientas de trabajo para el análisis de flujo en diferentes condiciones. Esta evolución va desde la versión 2.2, la cual analiza el flujo de forma unidimensional en condiciones permanentes, hasta la actual versión 6.1.0, que permite la modelización en una y dos dimensiones para condiciones permanentes y no permanentes (Lluen, 2015).

3.2.1.1. Generación de la geometría

Para introducir los datos geométricos lo primero es realizar un esquema del sistema fluvial. Una vez concluido el dibujo esquemático, se introduce los datos respecto a las secciones transversales y estructura hidráulica, ver Figura 7.

Los tramos del floculador fueron establecidos según se indica en la Figura 8, con el objetivo de analizar el comportamiento del floculador en las zonas de quiebre. La Figura 8 ilustra de manera general los criterios de modelización y corresponde a la zona 1. En los Anexos 1 y 2 se indican los tramos de las zonas 2 y 3 respectivamente. En total se definieron 333 tramos: 109 de la zona 1, 85 de la zona 2 y 139 de la zona 3.

El material para la modelización del canal es de hormigón, por lo tanto, se asumió un coeficiente de rugosidad de Manning (n) de 0.012

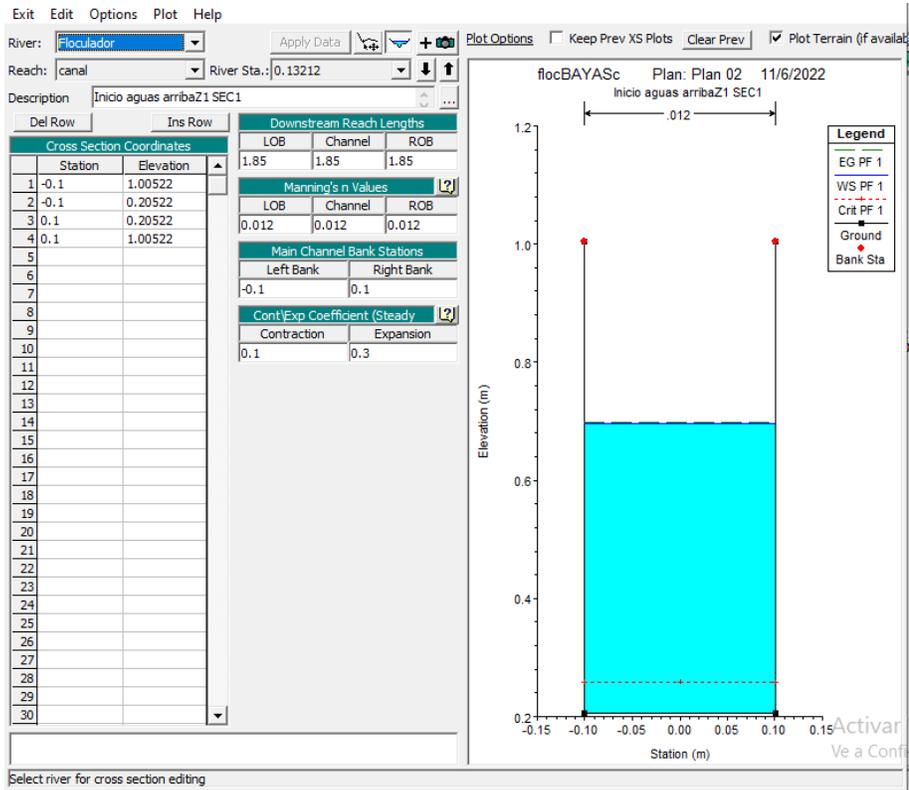


Figura 7. Editor de los datos de las secciones transversales del canal

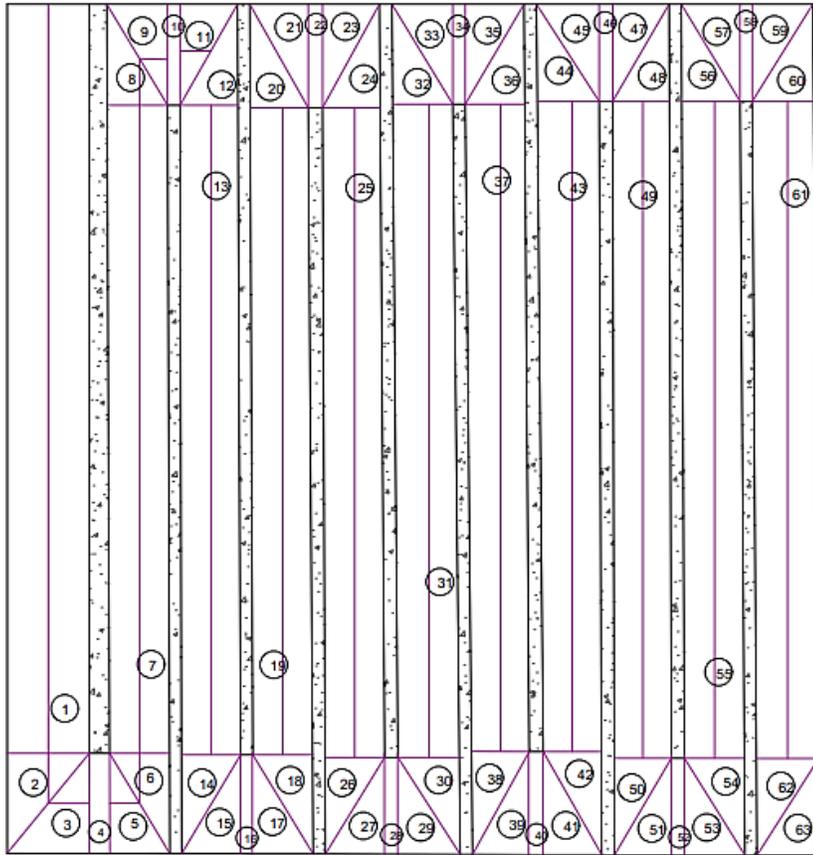


Figura 8. Representación de los tramos discretizados en la zona 1

3.2.1.2. Introducción para datos de flujo

Las condiciones de contorno empleadas por el modelo son: Flow Hydrograph, Stage Hydrograph, Normal Depth y Rating Curve. Para el presente estudio las condiciones de borde fueron el caudal y el calado de agua.

3.2.2. IBER

IBER es un modelo matemático bidimensional (2D) para la simulación del flujo a superficie libre, morfodinámica, procesos de transporte y hábitat en ríos y estuarios (Aragón-Hernández et al., 2022). Iber, tiene 3 módulos de cálculo principales: Módulo Hidrodinámico, Módulo de Turbulencia y Módulo de Transporte de Sedimentos. La base de Iber está constituida por el Módulo Hidrodinámico que resuelve las ecuaciones de aguas someras bidimensionales utilizando las ecuaciones de Saint Venant 2D. Todos los módulos trabajan sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos formada por elementos triangulares y cuadriláteros (Llueu, 2015).

En el preproceso de datos, mediante la interfaz de GiD se elabora la geometría de la zona de estudio, y se imponen las condiciones hidráulicas, condiciones iniciales

y de contorno; posteriormente se define el tipo, tamaño y número de elementos (malla de cálculo) y por último se determinan los datos de cálculo (Aragón-Hernández et al., 2022).

3.2.2.1. Generación de la geometría

IBER permite importar la geometría, en este estudio se importó la geometría del floculador desde un archivo dxf, el cual se visualiza en la Figura 9.

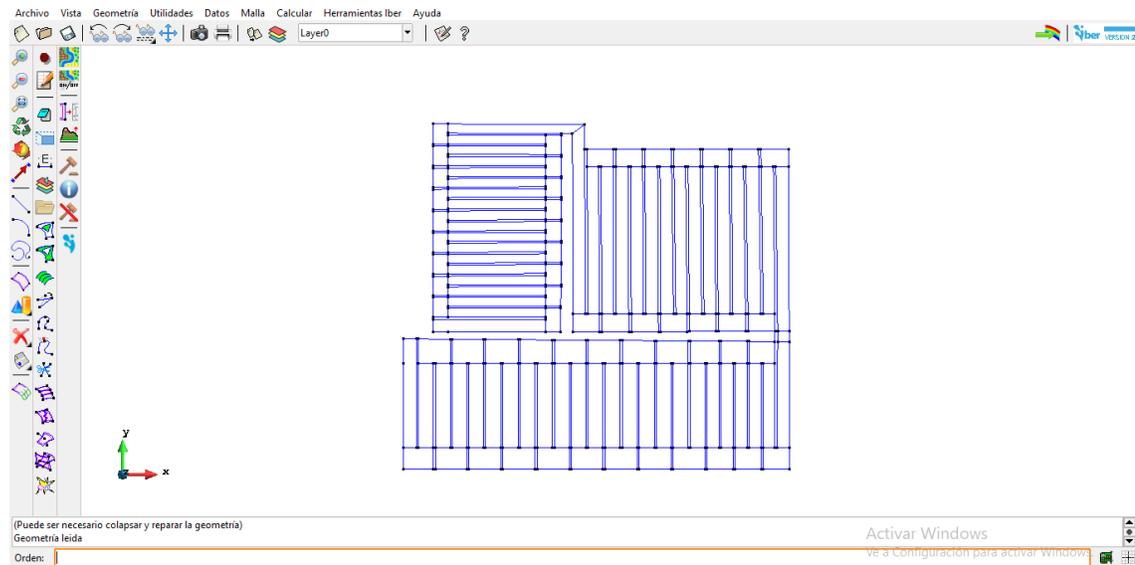


Figura 9. Modelo del floculador importado desde archivo dxf.

Posterior se crean las superficies (delimitadas por 4 líneas), esta es la manera como se discretiza el floculador. A continuación, se define la rugosidad, para nuestro estudio se usó el valor n de Manning igual al modelo unidimensional.

3.2.2.2. Introducción de condiciones de contorno

En la condición de entrada se define la sección de ingreso del caudal y su valor; en la condición de salida se define la sección de salida del caudal, y como dato conocido el nivel de agua medido en campo, los cuales varían para cada caudal.

3.2.2.3. Creación de malla

La malla permite extraer la información en un punto determinado del modelo. Para ello se selecciona la opción generar malla estructurada y se le asigna el tamaño más conveniente. Es importante mencionar que mientras más fino sea el mallado mayor

será el tiempo de análisis. En la Figura 10 se presenta un mallado cuadrangular de 5 cm.

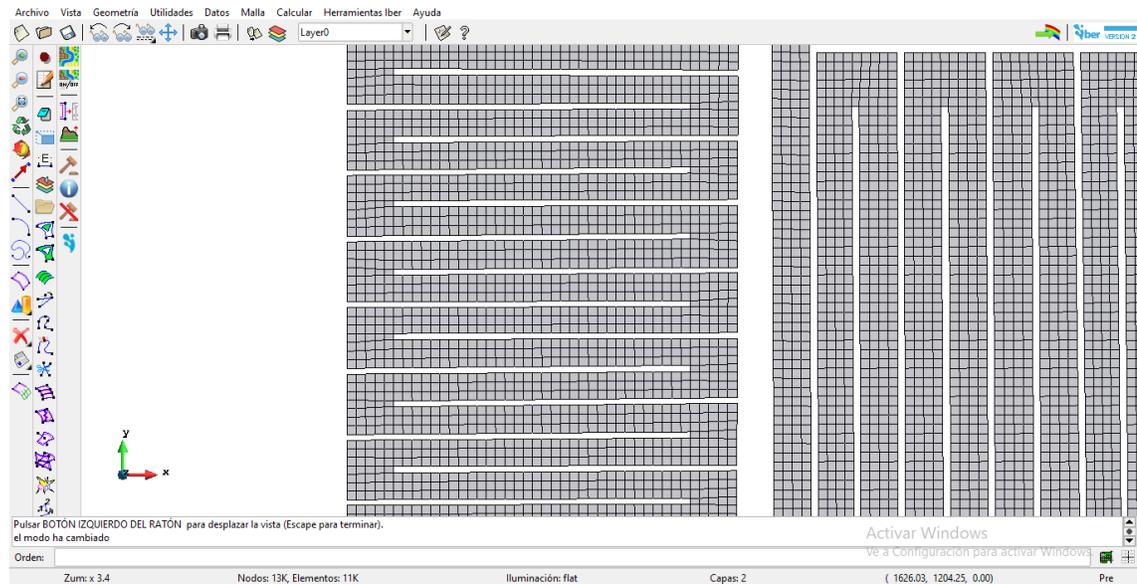


Figura 10. Representación del mallado del modelo

3.2.2.4. Ejecución del modelo y postproceso

Para ejecutar el modelo se selecciona la opción “Calcular” de la barra de menú principal. El programa muestra la información de proceso durante el tiempo de cálculo. En la etapa de postproceso es posible visualizar los resultados según la selección del esquema de colores.

CAPITULO 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. VOLÚMEN Y CAUDAL MEDIDOS EN CAMPO

Para la recolección de datos se realizaron tres pruebas en cada zona del floculador. Cada prueba corresponde a un caudal diferente (Q1, Q2 y Q3). Los datos de los volúmenes y caudales medidos se presentan en la Tabla 3 y los valores de los calados de agua medidos en cada zona se detallan en la Tabla 4.

Tabla 3. Resultados de la medición de caudales para cada prueba

	Caudal 1 - Q1			Caudal 2 - Q2			Caudal 3 - Q3		
	Tiempo [s]	Volumen [l]	Caudal [l/s]	Tiempo [s]	Volumen [l]	Caudal [l/s]	Tiempo [s]	Volumen [l]	Caudal [l/s]
t1	55.07	5.8	0.105	23.61	5.5	0.233	19.7	6	0.305
t2	14	4.9	0.350	9.71	4.2	0.433	13.37	6.3	0.471
t3	48.19	10.2	0.212	15.01	4.5	0.300	10.62	4.2	0.395
t4	12.2	6.9	0.566	9.41	7.1	0.755	10.71	11	1.027
t5	12.41	4.7	0.379	13.35	7	0.524	11.13	7.4	0.665
t6	8.98	8.1	0.902	8.81	8.8	0.999	6.58	7.5	1.140
t7	8.56	8.9	1.040	7.4	7	0.946	6.01	6.5	1.082
t8	6.07	11.2	1.845	5.1	11.5	2.255	3.6	8	2.222
te	5.13	7.1	1.384	5.72	8	1.399	4.9	6.3	1.286
	TOTAL		6.782	TOTAL		7.842	TOTAL		8.592

Tabla 4. Volumen del floculador obtenido en cada prueba

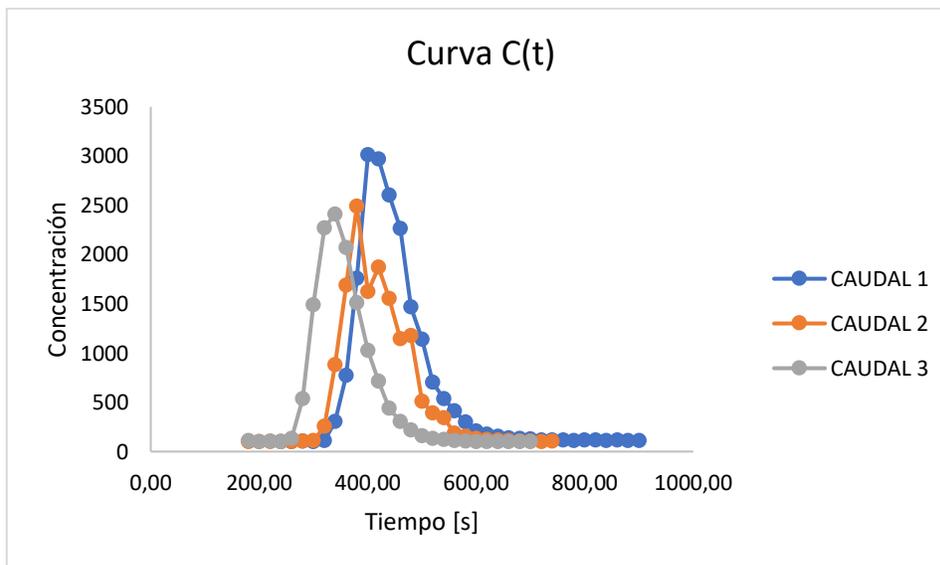
	Área [m ²]	Q1= 6.78 l/s		Q2=7.84 l/s		Q3=8.59 l/s	
		Profundidad [m]	Volumen [m ³]	Profundidad [m]	Volumen [m ³]	Profundidad [m]	Volumen [m ³]
		ZONA 1	5.54	0.56	3.10	0.563	3.12
ZONA 2	9.13	0.595	5.43	0.602	5.50	0.605	5.52
ZONA 3	11.93	0.675	8.05	0.694	8.28	0.7	8.35
	TOTAL		16.59		16.89		17.00

4.2. ESTUDIO DE TRAZADORES Y CAMPO HIDRODINÁMICO

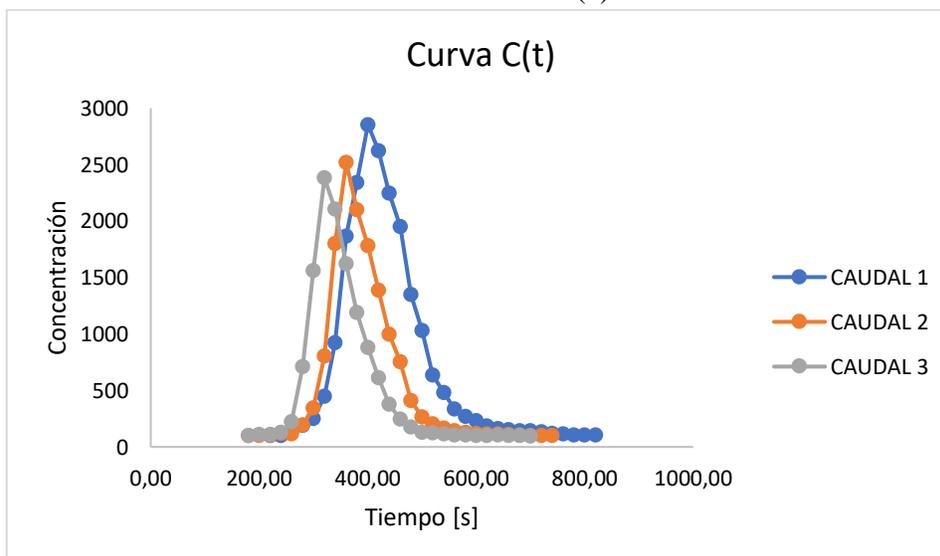
4.1.1. Curvas de distribución de flujo y de tiempo de retención

Como se mencionó previamente, en cada zona del floculador se realizaron tres pruebas con caudales diferentes ($Q_1=6.78$ l/s, $Q_2=7.84$ l/s y $Q_3=8.59$ l/s), y para la prueba de trazadores se realizaron dos ensayos para cada caudal, denominados como Ensayo 1 y Ensayo 2. Las curvas correspondientes a la prueba de trazadores serán nombradas como curvas $C(t)$, y son curvas de concentración de trazador en el floculador contra el tiempo de retención (t_0); y pertenecen a las curvas presentadas en la Figura 11.

Debido a que las curvas $C(t)$ de la Zona 2 y Zona 3 presentan un comportamiento similar, estas se muestran en los Anexos 3 y 4 respectivamente.



(a)



(b)

Figura 11. Curvas $C(t)$ de la zona 1: a) ensayo 1, b) ensayo 2

En las gráficas C(t) se puede observar que a partir del momento en que aparece el trazador en el efluente (t_i), la concentración va aumentando progresivamente como es característico de un reactor real que presenta una combinación de flujo pistón y mezcla completa (Vargas & Pérez, 2010).

De estas gráficas C(t), y de acuerdo con los parámetros establecidos en el esquema conceptual de los tiempos de retención indicados en la Figura 3, se obtuvieron los datos de los tiempos y conductividad para los tres caudales (6.78, 7.84 y 8.59 l/s) para cada Ensayo y de cada Zona respectivamente. Los valores obtenidos para cada ensayo se presentan en los Anexos 5-10.

Estos resultados reflejaron que existe gran similitud entre los datos obtenidos de los Ensayos 1 y 2 para cada caso; por lo tanto, y para el presente estudio, se consideró el promedio de los datos de cada ensayo correspondiente a cada zona. Por consiguiente, en la Tabla 5 se presentan los valores promedio de los tiempos y concentración obtenidos del ensayo de trazadores para los tres caudales en cada zona del floculador.

El tiempo de retención teórico que se indica en la tabla es el valor obtenido mediante la ecuación 2.

Tabla 5. Datos de los tiempos y concentración obtenidos del ensayo de trazadores para los tres caudales en cada zona del floculador

Parámetro	Zona 1			Zona 2			Zona 3		
	Caudal [l/s]			Caudal [l/s]			Caudal [l/s]		
	6.78	7.84	8.59	6.78	7.84	8.59	6.78	7.84	8.59
t_i , tiempo hasta la aparición del trazador [min]	3.83	3.00	3.00	4.17	6.67	6.17	10.83	7.33	9.00
t_p , tiempo de máxima concentración [min]	6.67	6.17	5.33	11.67	10.50	8.67	15.83	14.50	13.83
t_m , tiempo modal hasta aparición del 50% del trazador [min]	7.55	6.89	6.13	11.86	10.89	9.57	17.27	15.05	14.46
t_o , tiempo teórico de retención [min]	7.62	6.62	6.07	13.35	11.68	10.72	19.79	17.60	16.20
t_f , tiempo final [min]	14.33	12.33	11.67	19.00	17.00	15.50	27.67	23.67	22.33
C_o , concentración inicial	100	99	97	100	97	96	98.5	98.5	96
C_p , concentración máxima	2932.5	2505	2397	837	1723	1703	1399.5	1109	993.5

A continuación, se presenta una comparativa entre los tiempos de retención experimental, que corresponde al tiempo de retención obtenido del ensayo de trazadores (t_p), versus el tiempo de retención teórico (t_o), en la Figura 11 se contrastan gráficamente estos valores.

Los valores específicos de los datos graficados en la Figura 12 se indican en los Anexos 11 y 12.

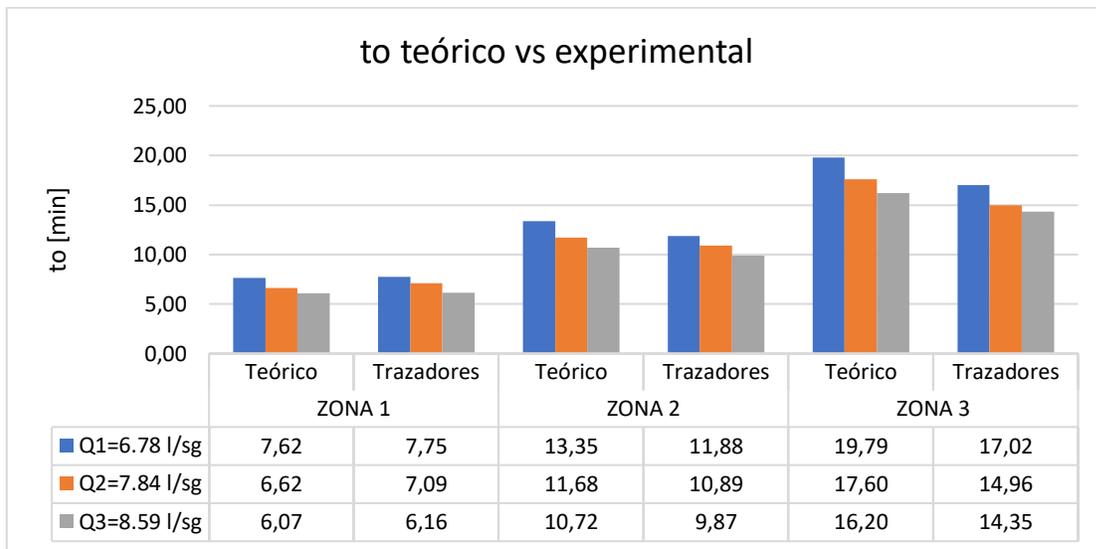


Figura 12. Contrastación de los tiempos de retención teóricos vs experimentales

Se puede evidenciar que existe diferencia entre los tiempos de retención obtenidos del ensayo de trazadores con los teóricos, siendo estos últimos ligeramente mayores para las tres zonas del floculador. En la zona 1 los tiempos de retención, tanto teórico como experimental fueron entre 6 y 7 min; en la zona 2 entre 10 y 13 min; y en la zona 3 entre 14 y 19 min. Los mismos que disminuían a medida que el caudal aumentaba.

Estos resultados se asemejan a los obtenidos por Moral & Sagal (2019), quienes realizaron estudios los procesos de coagulación, floculación y cloración en la Junta Administradora de Agua Potable Regional Bayas.

Aldapa (2001) señala que, en determinadas condiciones, existe un tiempo óptimo para la floculación, normalmente entre 20 y 40 minutos. La permanencia del agua en el floculador, durante un tiempo inferior o superior al óptimo, produce resultados inferiores; tanto más acentuados cuanto más se aleje éste del tiempo óptimo de floculación.

Autores como Uvidia (2013) y Danageuzian (2019) señalan que es conocido que, al variarse el caudal de operación de la planta, se modifican los tiempos de retención y gradientes de velocidad en los reactores, y que el floculador hidráulico es algo flexible a estas variaciones. Lo cual concuerda con los resultados obtenidos para el floculador en estudio.

4.1.2. Patrones hidrodinámicos

De igual manera, para los resultados obtenidos mediante la aplicación de indicadores de patrones hidrodinámicos (Patiño et al., 2012), se calcularon los valores promedios de los ensayos 1 y 2 para cada zona, los mismos que se presentan en la Tabla 6. En los Anexos 13-18 se presenta los resultados de cada ensayo.

Tabla 6. Resultados obtenidos mediante la aplicación de indicadores de patrones hidrodinámicos

Criterio	Descripción	Zona 1			Zona 2			Zona 3		
		Caudal [l/s]			Caudal [l/s]			Caudal [l/s]		
		6.78	7.84	8.59	6.78	7.84	8.59	6.78	7.84	8.59
t_i/t_0	Mide cortos circuitos. Un valor de 1 indica flujo pistón, mientras un valor de 0 indica flujo de mezcla y si es mayor a 0,3 corto circuito	0.50	0.45	0.49	0.31	0.57	0.58	0.55	0.42	0.56
t_m/t_0	Indica cortos circuitos cuando su valor es menor a 1 y zonas muertas cuando su valor es mayor a 1	0.99	1.04	1.01	0.89	0.93	0.89	0.87	0.86	0.89
t_p/t_0	Indica la relación entre flujo pistón y flujo de mezcla del floculador	0.88	0.93	0.88	0.87	0.90	0.81	0.80	0.82	0.85

En base a los resultados presentados en la Tabla 6, los valores de t_i/t_0 menores a 1 indican flujo de pistón y mezclado en los tres caudales con la presencia de corto circuito. En cuanto a la relación t_m/t_0 , en la zona 1, se observa que estos valores son mayores a uno, lo que indica la presencia de zonas muertas, es decir zonas donde el fluido se queda estancado, para luego, salir lentamente (Sánchez Molina & Gallo Cardona, 2009). Mientras que, para la zona 2 y 3 se ratifica la presencia de corto circuitos. De acuerdo con (Zapata Rivera & Manjarres, 2020) estas fallas hidráulicas indudablemente afectan la eficiencia del proceso de floculación, disminuyen la calidad del tratamiento y desmejoran las condiciones de operación de la planta.

En cuanto a la relación de flujo de pistón y flujo completamente mezclado, dado por la relación t_p/t_0 , se observa que estos valores se aproximan a 1, se puede concluir que existe predominio de flujo en pistón (Sánchez Molina & Gallo Cardona, 2009), lo cual se analiza con más detalle a continuación.

4.1.3. Método de Wolf Resnick

Referente al análisis del método de Wolf Resnick, en las Figuras 13 y 14 se presentan las curvas 1-F(t) versus t/t_0 , denominadas para el presente estudio como Curvas 1-F(t). A partir de estas curvas se determinaron los parámetros como $\Theta=t_1/t_0$ y t_2/t_0 . Las curvas 1-F(t) de las Zonas 2 y 3 se muestran en los Anexos 19 al 22.

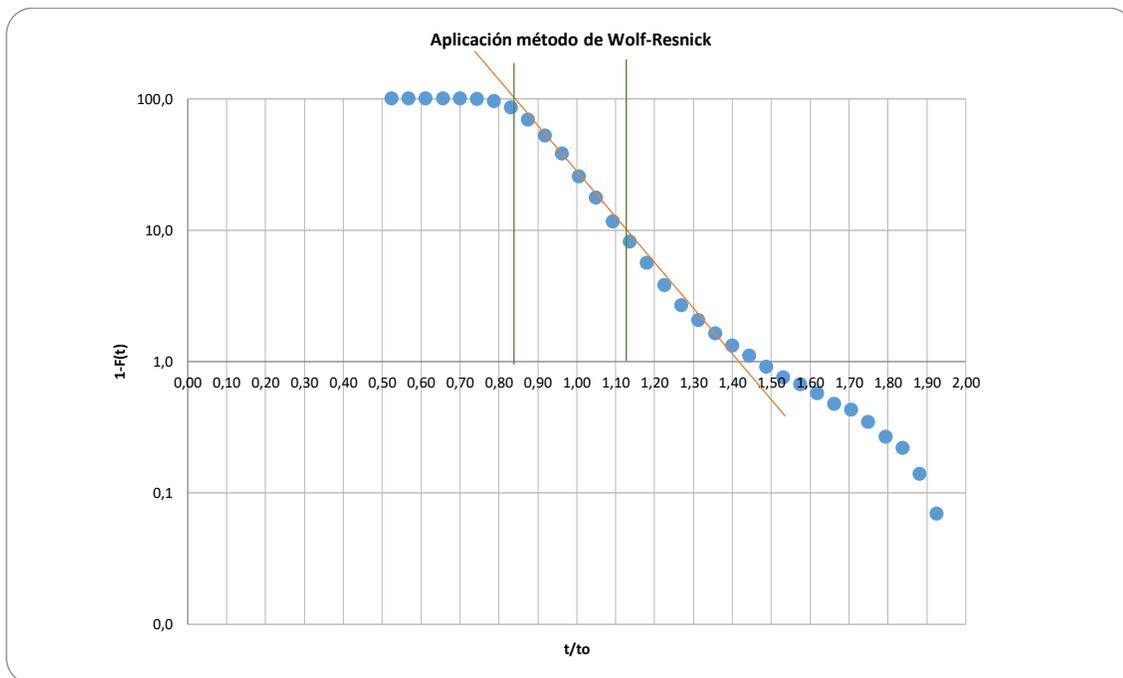


Figura 13. Curva 1 – F(t) usada para el modelo Wolf – Resnick de la zona 1, ensayo 1

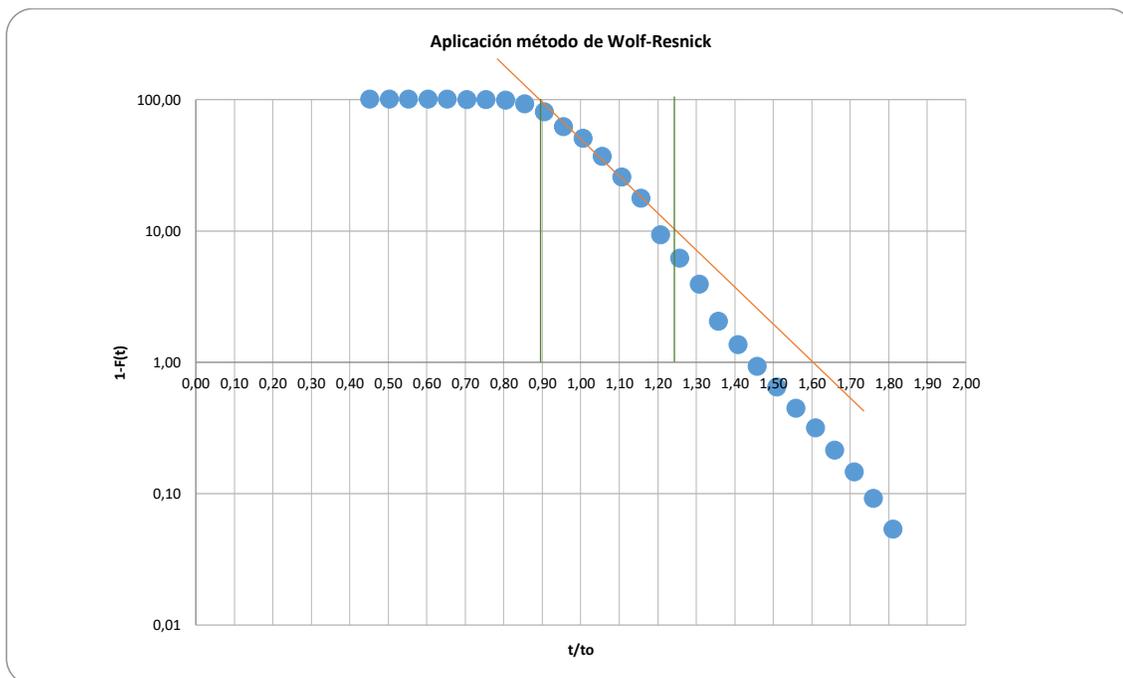


Figura 14. Curva 1 – F(t) usada para el modelo Wolf – Resnick de la zona 1, ensayo 2

Con estos datos y aplicando las ecuaciones 11-13 y 15 se obtuvo el porcentaje de flujo y porcentaje de zonas muertas presentes en el floculador. En la Tabla 7 se detallan estos valores para cada zona, resaltando que estos valores corresponden a los datos promedios de los dos

ensayos realizados en cada zona. En los Anexos 23 y 24 se indican los resultados para los ensayos 1 y 2 respectivamente.

Tabla 7. Resultados promedio del modelo Wolf-Resnick en cada zona del floculador

PROMEDIO							
		$\Theta=t1/to$	$t2/to$	$tg \alpha$	Flujo pistón P [%]	Flujo mezclado M [%]	Zonas muertas m [%]
ZONA 1	Q1=6.78 l/s	0.83	1.12	3.49	86.93	13.07	4.24
	Q2=7.84 l/s	0.88	1.19	3.30	86.81	13.19	0.00
	Q3=8.59 l/s	0.83	1.12	3.48	86.90	13.10	4.49
ZONA 2	Q1=6.78 l/s	0.81	1.07	3.81	87.61	12.39	7.83
	Q2=7.84 l/s	0.84	1.06	4.58	89.71	10.29	6.93
	Q3=8.59 l/s	0.75	0.98	4.36	88.20	11.80	12.00
ZONA 3	Q1=6.78 l/s	0.75	1.01	3.85	86.82	13.18	14.19
	Q2=7.84 l/s	0.78	1.00	4.55	89.01	10.99	12.93
	Q3=8.59 l/s	0.78	1.03	4.08	87.98	12.02	11.34

Al analizar los resultados de la Tabla 7, se evidencia que el floculador se encuentra trabajando con un porcentaje de flujo pistón del 86% en la zona 1; y del 88% en la zona 2 y zona 3. El porcentaje de flujo mezclado es del 13 % en la zona 1; y del 11 % en la zona 2 y zona 3. Estos resultados implican que hay predominio en forma notoria del flujo pistón, lo cual se corrobora con los resultados de los indicadores de patrones hidrodinámicos presentados en la Tabla 6, ya que la relación tp/to , que indica la relación entre flujo pistón y flujo mezclado es mayor a 0.8 para las tres zonas.

En base a los patrones hidrodinámicos presentados en la Tabla 6, se determina que, con una relación $ti/t0$ mayor a 0.3, existen zonas muertas en todas la zonas para los tres caudales; y, mediante el método de Wolf Resnick se determinaron porcentajes de zonas muertas del 4% en la zona 1; entre 6% y 12% en la zona 2; y entre 11% y 14% en la zona 3. Estos resultados sugieren que, para el caso donde hay mayor porcentaje de zonas muertas, como es en la zona 3, es posible que los vértices o esquinas del floculador presenten ángulos muy pequeños, lo cual puede crear estas zonas.

En la literatura se plantea que la presencia de zonas muertas en este tipo de sistemas generan problemas operativos relacionados con su rendimiento hidrodinámico (Patiño et al., 2012). Para Vargas & Pérez (2010) esto puede generar lodos depositados, los mismos que pueden producir interferencias. Según Vargas & Pérez (2010), las zonas muertas estancadas se encuentran en los huecos de material poroso, en esquinas de tanques y/o en intersticios donde las corrientes del fluido no pueden penetrar.

4.3. VELOCIDAD, PÉRDIDAS Y GRADIENTE DE VELOCIDAD

La velocidad de flujo se calculó mediante la ecuación 1 para cada zona. Se aplicó la ecuación de velocidad para el tiempo de retención experimental, es decir el obtenido de la prueba de trazadores. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Velocidades del flujo en cada zona del floculador

	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3
	v [m/s]	v [m/s]	v [m/s]
Q1=6.78 l/s	0.086	0.063	0.049
Q2=7.84 l/s	0.094	0.069	0.056
Q3=8.59 l/s	0.108	0.076	0.058

Para determinar las pérdidas se utilizaron las ecuaciones 3-6, y los valores obtenidos se detallan en la Tabla 9 para cada caudal. El valor correspondiente al desnivel del fondo de tanque (h3) es igual a 0.1m en la zona 1 y 0.05 en la zona 2.

Tabla 9. Pérdidas en el floculador correspondiente a todos los caudales estudiados

	Velocidad del flujo	Longitud del canal	Número de canales	Ancho del canal	Altura del canal mojado	Pérdidas por vueltas	Radio hidráulico	Pérdida de carga en los canales	Pérdida de carga en el floculador
	v [m/s]	[m]	N	b	a	h1 [m]	R [m]	h2 [m]	H [m]
Q1=6.78 l/s									
ZONA 1	0.086	39.90	19	0.15	0.56	0.0135	0.066	0.001582	0.1651
ZONA 2	0.106	45.15	15	0.195	0.595	0.0161	0.084	0.001998	0.0681
ZONA 3	0.136	50.16	24	0.2	0.675	0.0432	0.087	0.003446	0.0466
Q2=7.84 l/s									
ZONA 1	0.056	39.90	19	0.15	0.563	0.0057	0.066	0.00067	0.1564
ZONA 2	0.069	45.15	15	0.195	0.602	0.0068	0.084	0.00085	0.0577
ZONA 3	0.085	50.16	24	0.2	0.694	0.0168	0.087	0.00134	0.0182
Q3=8.59 l/s									
ZONA 1	0.039	39.90	19	0.15	0.565	0.0028	0.066	0.000327	0.1531
ZONA 2	0.050	45.15	15	0.195	0.605	0.0036	0.084	0.000447	0.0541
ZONA 3	0.058	50.16	24	0.2	0.7	0.0080	0.088	0.000631	0.0086

El gradiente se calculó mediante la ecuación 7, y los resultados se muestran en la Tabla 10 para cada caudal.

Tabla 10. Gradiente del floculador para los tres caudales.

	Relación viscosidad	Pérdida de carga en el floculador	Tiempo de retención	Gradiente
		H [m]	to [s]	G [s ⁻¹]
Q1=6.78 l/s (T=21°C)				
ZONA 1	3150	0.1651	465	59.35
ZONA 2		0.0681	712.8	28.03
ZONA 3		0.0466	1021.2	7.70
Q2=7.84 l/s (T=20.7°C)				
ZONA 1	3120	0.1564	425.4	62.01
ZONA 2		0.0577	653.4	29.31
ZONA 3		0.0182	897.6	9.26
Q3=8.59 l/s (T=18.5°C)				
ZONA 1	3050	0.15313	369.6	66.16
ZONA 2		0.05406	592.2	30.53
ZONA 3		0.00859	861	9.63

Aldapa (2001) indica que uno de los criterios básicos de los floculadores horizontales es que las velocidades en los canales de los tramos deben estar ordenadas en forma decreciente, para acompañar la formación del flóculo. En este contexto, y en base a las velocidades que se indican en la Tabla 8, se establece que el floculador en estudio satisface dicho criterio.

En el presente estudio los gradientes de velocidad obtenidos fueron para la zona 1 en un rango de 59 a 7 s⁻¹; para la zona 2 de 62 a 9 s⁻¹; y para la zona 3 de 66 a 9 s⁻¹. Varios autores (Romero, 2006; Danageuzian, 2019) sugieren que los valores de G comúnmente se la encuentra en un rango entre 20 s⁻¹ y 90 s⁻¹. Sin embargo, para Uvidia (2013) y Palermo (2018) el rango óptimo de gradientes de velocidad para floculación varía entre 20 s⁻¹ y 75 s⁻¹.

Se observa que los gradientes de velocidad que se encuentran fuera de los rangos establecidos como óptimos se dan en la zona 3 para los tres caudales. En base a estos resultados, es importante mencionar que previamente se determinó la presencia de zonas muertas en el floculador, con mayor porcentaje en la zona 3. Por lo tanto, para predecir de manera más

sistemática el comportamiento real del floculador se utilizaron los modelos matemáticos Hec-RAS (unidimensional) e IBER (bidimensional), los cuales son de gran ayuda al simplificar los cálculos de evaluación y en la interpretación de resultados.

En este contexto, se presentan a continuación los resultados y discusión de los modelos implementados sobre la evaluación hidráulica del floculador. Además, se presenta un análisis comparativo de ambos programas con el objetivo de establecer su adecuación en este tipo de problemas.

4.4. MODELOS UNIDIMENSIONAL (Hec-RAS) Y BIDIMENSIONAL (IBER)

4.4.1. Modelo unidimensional (Hec-RAS)

A continuación, en la Figura 15 se presenta la gráfica de la altura de agua versus la distancia longitudinal del floculador para el $Q_1 = 6.78$ l/s. Las gráficas correspondientes a los caudales $Q_2 = 7.84$ l/s y $Q_3 = 8.59$ l/s se indican en los Anexos 25 y 26 respectivamente. En la Figura 15, la longitud recorrida dispuesta en las coordenadas horizontales, la distancia 120 corresponde aguas arriba, es decir donde inicia el recorrido del flujo de agua, y la longitud 0 es donde termina el recorrido del flujo.

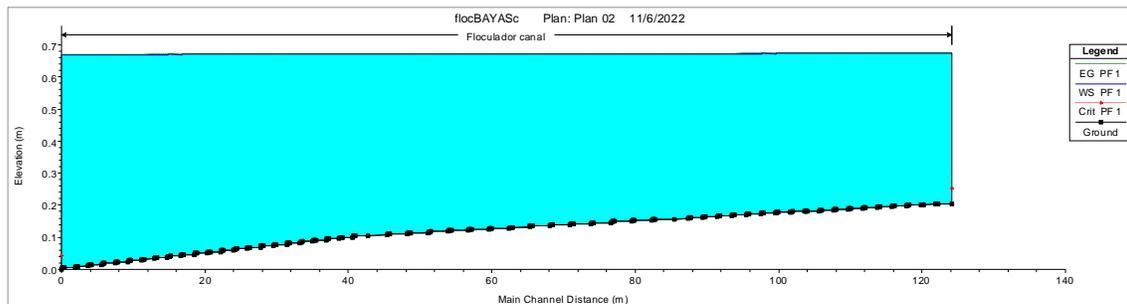


Figura 15. Curva altura vs distancia longitudinal del floculador usando Q_1 (6.78 l/s) del modelo HEC-RAS

4.4.2. Modelo bidimensional (IBER)

Con la finalidad de establecer un tamaño de malla adecuado, en términos de precisión de resultados y tiempos de ejecución, se realizó un análisis paramétrico variando el tamaño del mallado, del tipo cuadrático, desde 0.02 a 0.1 cm. Este análisis se realizó para el $Q_1 = 6.78$ l/s. Para ello, se establecieron 25 puntos de control en el floculador los cuales se representan en la Figura 16.

En la Figura 17 se contrastan los resultados obtenidos de calado para cada tamaño de malla, junto con los valores experimentales o de campo.

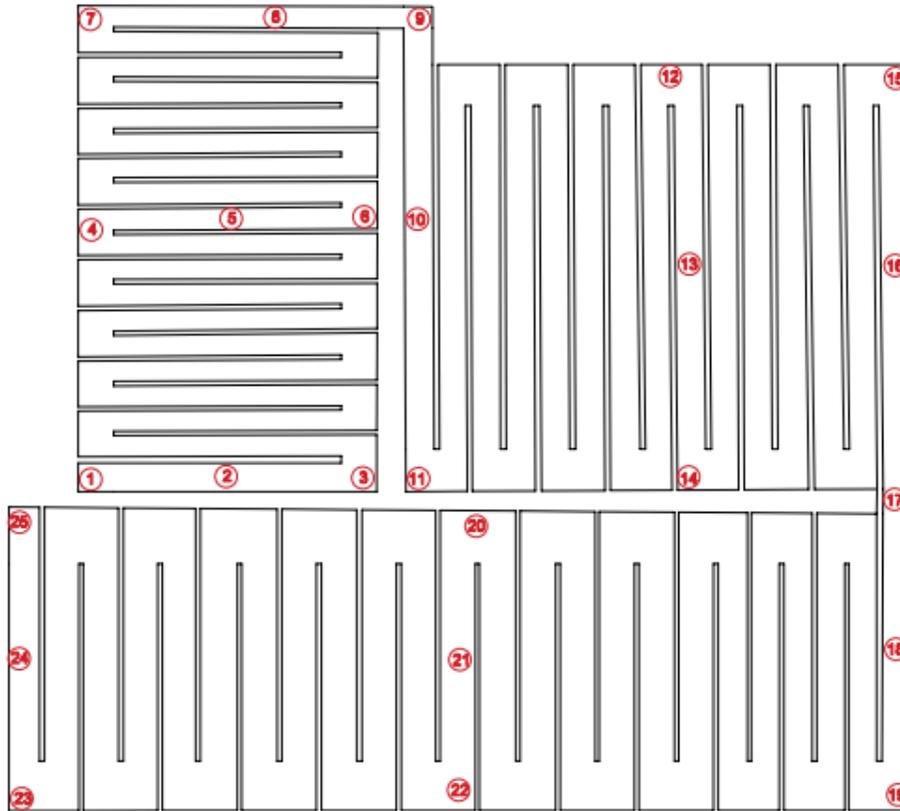


Figura 16. Contrastación de los calados de agua obtenidas del modelo IBER para los diferentes tamaños de malla

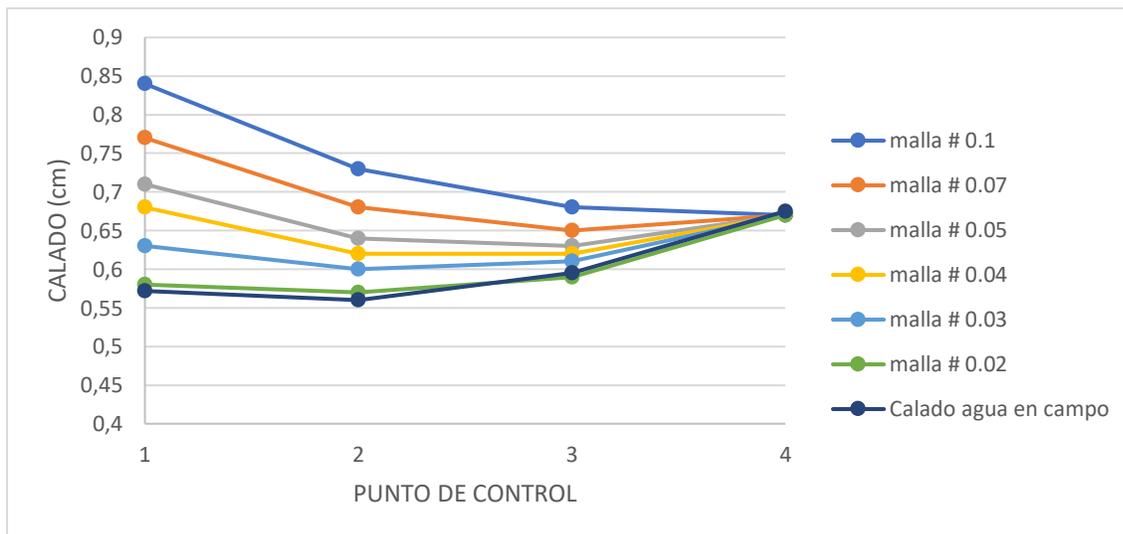


Figura 17. Contrastación de los calados de agua obtenidas del modelo IBER para los diferentes tamaños de malla

El criterio para la selección del mallado adecuado se basó en la proximidad de los calados de agua numéricos a los valores experimentales. De esta manera, se determinó que el tamaño adecuado es de 0.02 cm. Por lo tanto, para el análisis con los caudales $Q_2=7.84$ l/s y $Q_3=8.59$ l/s se utilizó ese tamaño de malla.

4.4.3. Contrastación de modelos unidimensional (Hec-RAS) vs modelo bidimensional (IBER)

En esta sección se presentan la contrastación de resultados obtenidos mediante los dos modelos de análisis: Hec-RAS e IBER. Se realizaron tres corridas en Hec-RAS y tres corridas en IBER con la variación del caudal y de la condición de borde aguas abajo. Para ambos modelos se evidenció una tendencia casi similar de resultados, con mejor aproximación de resultados en los tramos aguas abajo del floculador.

4.4.3.1. Perfil de calado de agua

En las Figuras 18, 19 y 20 se indican los calados de agua, además se indica el calado medido en campo en cuatro puntos de control.

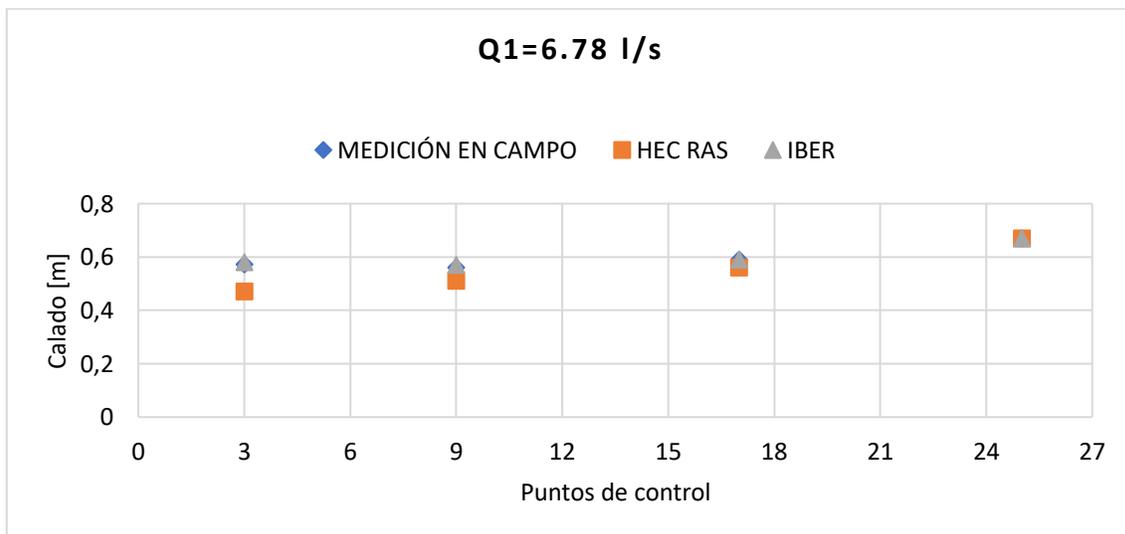


Figura 18. Contrastación de calados obtenidas del modelo HEC RAS vs IBER para $Q_1=6.78$ l/s

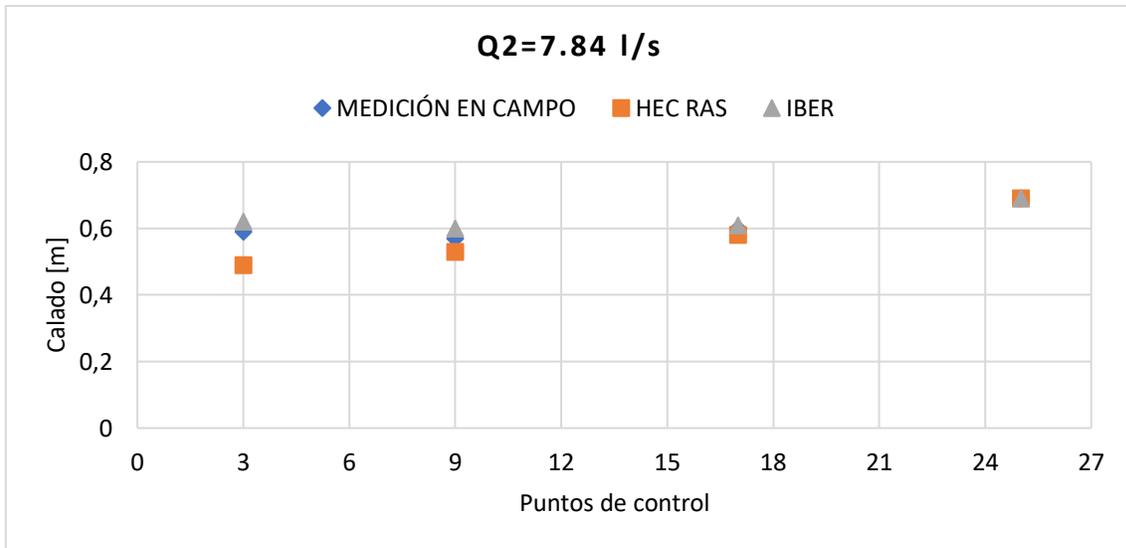


Figura 19. Contrastación de calados obtenidas del modelo HEC RAS vs IBER para $Q_2=7.84$ l/s

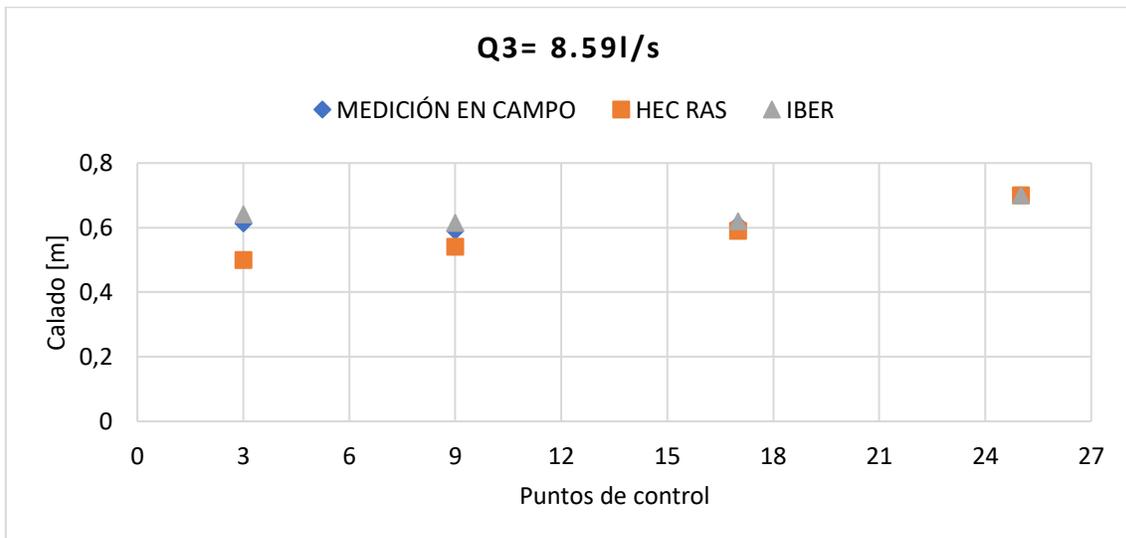


Figura 20. Contrastación de calados obtenidas del modelo HEC RAS vs IBER para $Q_3=8.59$ l/s

Respecto al calado de agua, aguas hay una separación de los perfiles obtenidos hasta el segundo punto de control medido en campo. En este sentido, el modelo unidimensional como Hec-RAS se separa más del punto medido en campo, mientras que el modelo bidimensional IBER representa con mayor exactitud el perfil hidráulico para cada zona del floculador.

En la Tabla 11, se presentan los valores de los calados graficados en la Figuras 18, 19 y 20. El porcentaje de error calculado en las tablas corresponde al error entre los dos modelos de análisis con relación al valor medido en campo.

Tabla 11. Porcentaje de error obtenido con los modelos Hec-RAS e IBER en relación al valor del calado de agua medido en campo para los tres caudales

Punto de control	Q1= 6.78 l/s					Q2= 7.84 l/s					Q3= 8.59 l/s				
	IBER [m]	Hec-RAS [m]	Campo [m]	error IBER [%]	error Hec-RAS [%]	IBER [m]	Hec-RAS [m]	Campo [m]	error IBER [%]	error Hec-RAS [%]	IBER [m]	Hec-RAS [m]	Campo [m]	error IBER [%]	error Hec-RAS [%]
3	0.58	0.47	0.57	1%	10%	0.62	0.49	0.59	3%	10%	0.64	0.5	0.61	3%	11%
9	0.57	0.51	0.56	1%	5%	0.6	0.53	0.57	3%	4%	0.62	0.54	0.59	3%	5%
17	0.59	0.56	0.59	0%	3%	0.61	0.58	0.6	1%	2%	0.62	0.59	0.61	1%	2%
25	0.67	0.67	0.67	0%	0%	0.69	0.69	0.69	0%	0%	0.7	0.7	0.7	0%	0%

Se observa que, el modelo IBER presenta los errores más bajos de error en comparación con el modelo Hec-RAS. Además, para ambos modelos no hay error en el punto final, debido que, ése dato fue considerado como condición de contorno.

A continuación, y con la finalidad de realizar una comparación más detallada entre los resultados de calado y velocidad de los modelos 1D y 2D, se eligió una zona del floculador para este análisis. La zona elegida corresponde al tramo donde se da un cambio de dirección de los canales rectangulares, ubicada específicamente en la Zona 1 del floculador. Para este análisis se definieron 6 secciones, como se indican en la Figura 21.

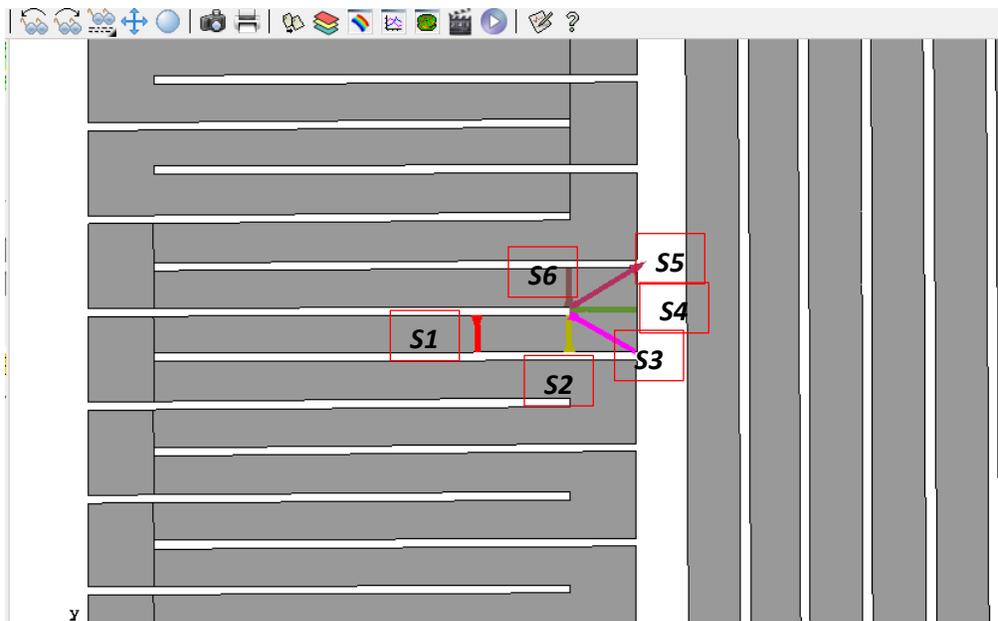
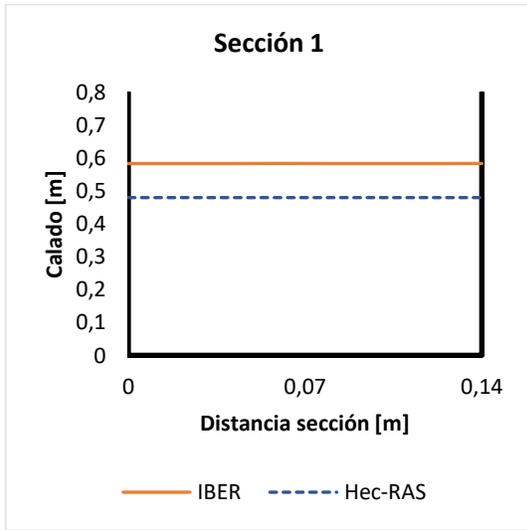
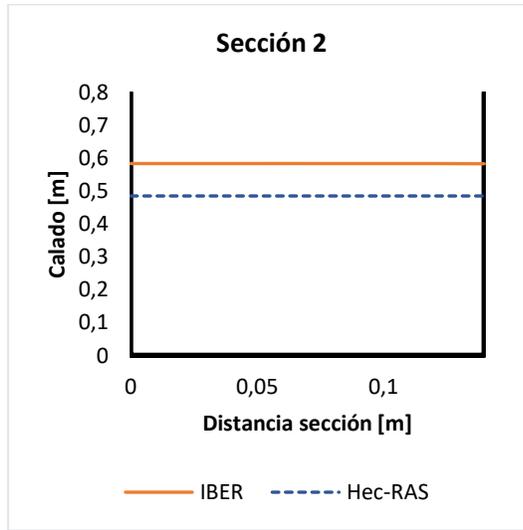


Figura 21. Ubicación de las seis secciones establecidas para el análisis de calado y velocidad en la zona donde hay cambio de dirección

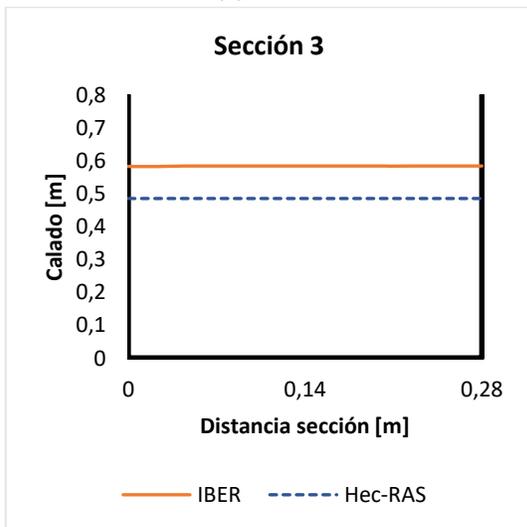
Referente al calado de agua, se consideraron las mismas secciones de la Figura 21. Este análisis se lo realizó con los resultados obtenidos al ejecutar el programa con un caudal de 6.78 l/s. Posterior, en la Figura 22 se presentan los perfiles de las 6 secciones de análisis en las cuales se contrastan los resultados de los calados obtenidos del modelo IBER y Hec-RAS.



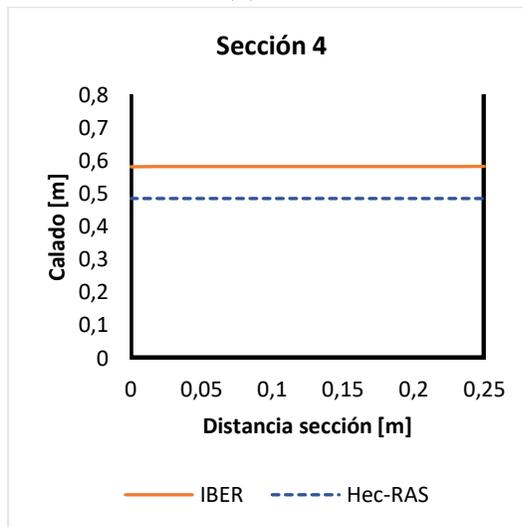
(a)



(b)



(c)



(d)

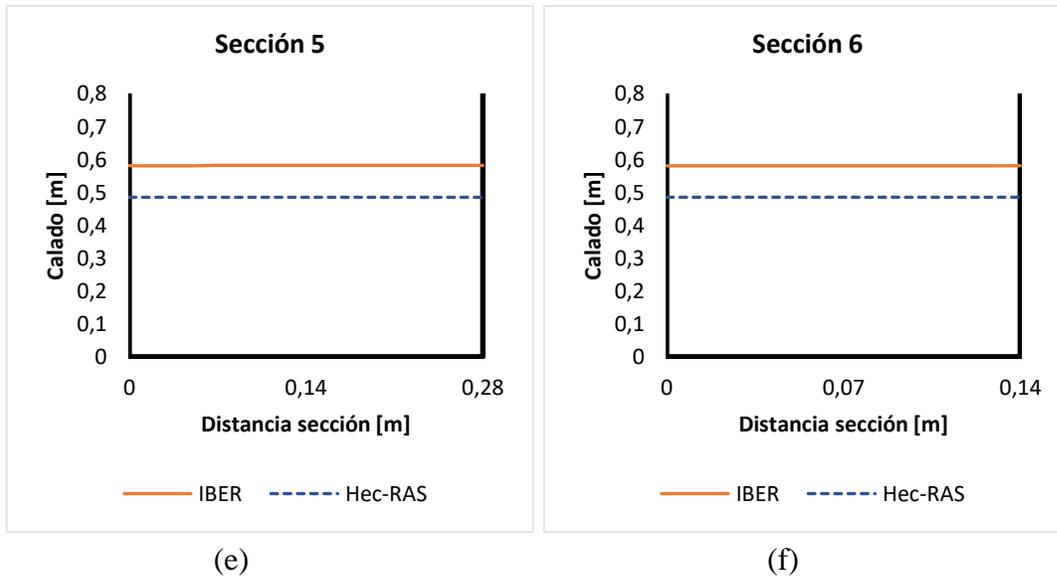


Figura 22. Contratación de resultados de calado de los modelos IBER vs Hec-RAS correspondiente a $Q_1 = 6.78$ l/s para los perfiles de las 6 secciones.

Tabla 12. Porcentaje de error obtenido con los modelos IBER y Hec-RAS en relación al valor del calado de agua medido en campo para las 6 secciones

	IBER (2D)	Hec-RAS (1D)		
Sección	Calado [m]	Calado [m]	Diferencia [m]	error [%]
1	0.584	0.48	0.1	22%
2	0.584	0.485	0.1	20%
3	0.583	0.485	0.1	20%
4	0.582	0.485	0.1	20%
5	0.582	0.485	0.1	20%
6	0.581	0.485	0.1	20%

Se observa que existe una diferencia similar de 10 cm entre los modelos Hec-RAS e IBER en las 6 secciones. Es importante mencionar que el tramo considerado en este análisis pertenece a la Zona 1 del floculador, por lo tanto, se esperaba una diferencia significativa entre los calados de agua, ya que hubo mayor aproximación de resultados en las Zonas 2 y 3 del floculador. En ambos perfiles de los modelos se observa que el flujo de agua se distribuye de manera uniforme a lo largo del canal.

Es importante mencionar que mientras más alto era el caudal, el tiempo de retención disminuía y los gradientes de velocidad aumentaban, afectando así la formación del flóculo. Por lo tanto, es primordial mantener el caudal de diseño para que los parámetros de diseño no se alteren.

4.4.3.2. Velocidad de flujo

En cuanto a la velocidad, es importante mencionar que Hec-RAS al ser un modelo unidimensional, estos resultados corresponden a la velocidad media del flujo en cada tramo o sección establecidos del floculador; mientras que IBER al ser un modelo bidimensional muestra la velocidad puntual en los lugares establecidos como puntos de control.

En primera instancia, se presentan los mapas de las áreas coloreadas de los valores obtenidas del modelo IBER una vez finalizado el análisis, es decir en el último paso (Figura 23). Seguido, en la Figura 24, se muestran los perfiles de las 6 secciones de análisis, en las mismas que se contrastan los resultados de los modelos Hec-RAS e IBER. Debido a que en el modelo IBER es posible determinar la velocidad puntual, se calculó la media de velocidades entre el punto máximo y mínimo en cada sección. Este valor promedio se contrastó con los resultados obtenidos del modelo Hec-RAS, y los resultados se presentan en la Tabla 15.

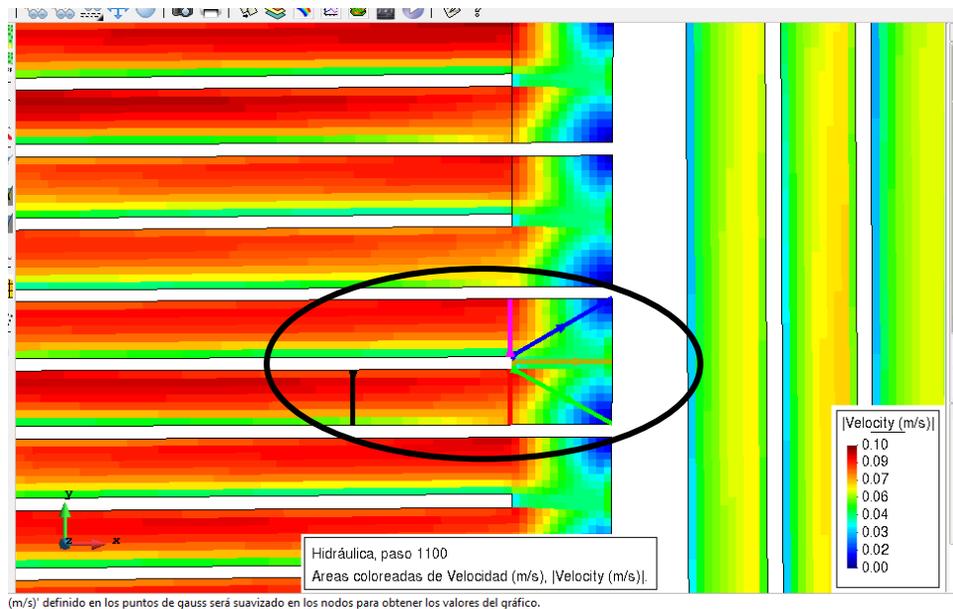


Figura 23. Mapa de áreas coloreadas de los valores de velocidad para $Q_1 = 6.78 \text{ L/s}$

Tabla 13. Porcentaje de error obtenido con los modelos IBER y Hec-RAS de las velocidades para las 6 secciones

Sección	IBER (2D)			Hec-RAS (1D)	Diferencia [m/s]	error [%]
	Máx [m/s]	Mín [m/s]	Promedio [m/s]	Media [m/s]		
1	0.092	0.067	0.08	0.1	0.02	21%
2	0.088	0.074	0.08	0.05	0.03	62%
3	0.083	0.009	0.05	0.06	0.01	23%
4	0.048	0.040	0.04	0.06	0.02	27%
5	0.065	0.018	0.04	0.05	0.01	18%
6	0.089	0.047	0.07	0.09	0.02	24%

De acuerdo con los resultados presentados en la Figura 24, se observa que en la sección 1 y 6, que corresponden a un tramo recto, específicamente antes y después del cambio de dirección del canal rectangular, se reportan los picos más altos de velocidad. Mientras que, en las secciones 2, 3, 4 y 5 se reportan velocidades más bajas; las mismas que son más apreciables en las curvas de velocidad del modelo IBER. Según los resultados del modelo IBER las velocidades mínimas se registran en las esquinas del floculador, donde las velocidades alcanzan valores muy cercanos a 0, esto gracias al tamaño fino de malla usado en este estudio.

El mayor porcentaje de error (62%) corresponde a la sección 2, con una diferencia entre medias de 0.03 m/s. Estos resultados sugieren que el modelo de Hec-RAS, en las zonas en las que inicia el cambio de dirección del canal, subestima las velocidades.

Finalmente, con el objetivo de analizar si el comportamiento previamente descrito es semejante en las zonas con características geométricas similares del floculador, como por ejemplo en los tramos rectos y en las esquinas, se realizaron los cortes de perfil de las secciones presentadas en la Figura 25. Este análisis se realizó únicamente para el $Q_1= 6.78$ l/s debido a que no existe una diferencia notable con relación a los caudales $Q_2= 7.84$ l/s y $Q_3= 8.59$ l/s.

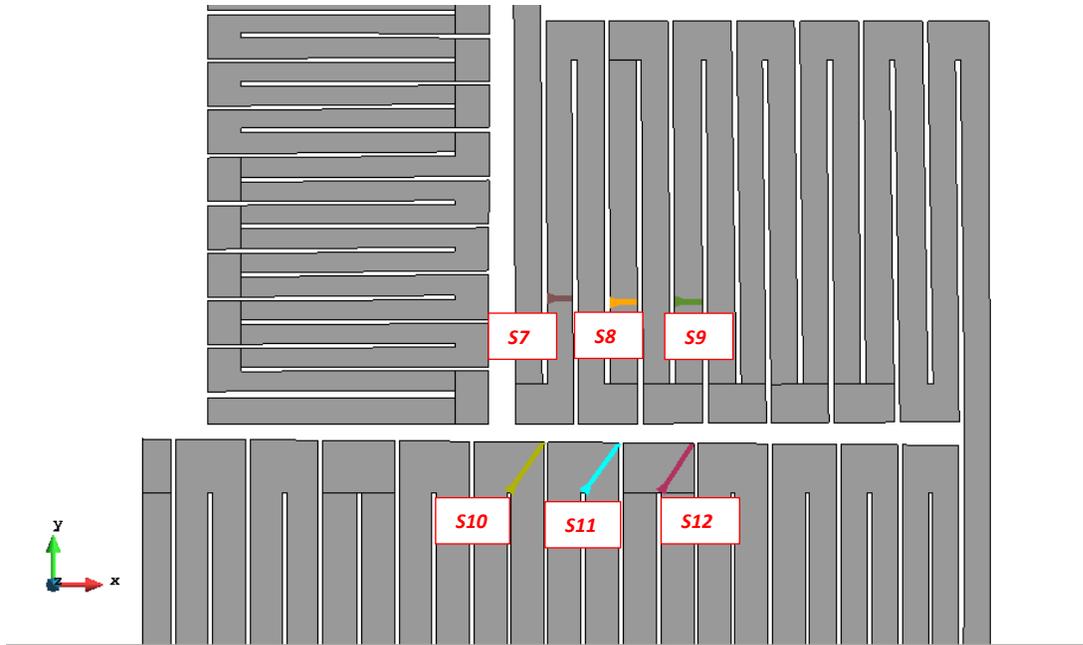


Figura 25. Ubicación de las secciones elegidas para el análisis del comportamiento hidráulico en secciones similares

Las secciones que se encuentran en los tramos rectos de la Zona 2 fueron numeradas del 7 al 9; y las secciones de las esquinas de la Zona 3 fueron numeradas del 10 al 12. En la Figura 26 se presenta el mapa de áreas coloreadas del calado de agua para el caudal $Q_1 = 6.78$ l/s, y los perfiles de las secciones se ilustran en las Figuras 27 y 28.

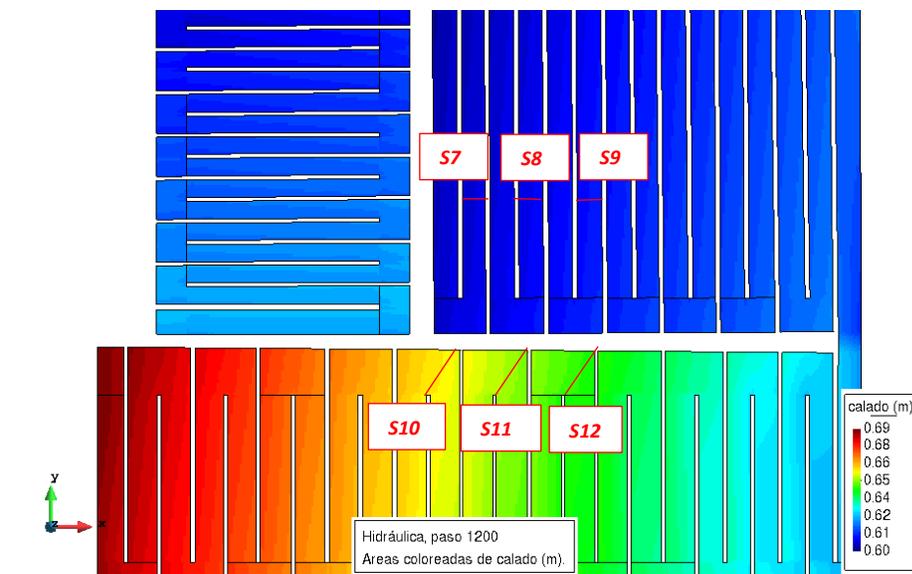


Figura 26. Mapa de áreas coloreadas del calado de agua del para $Q_1= 6.78$ l/s con las secciones 7-12.

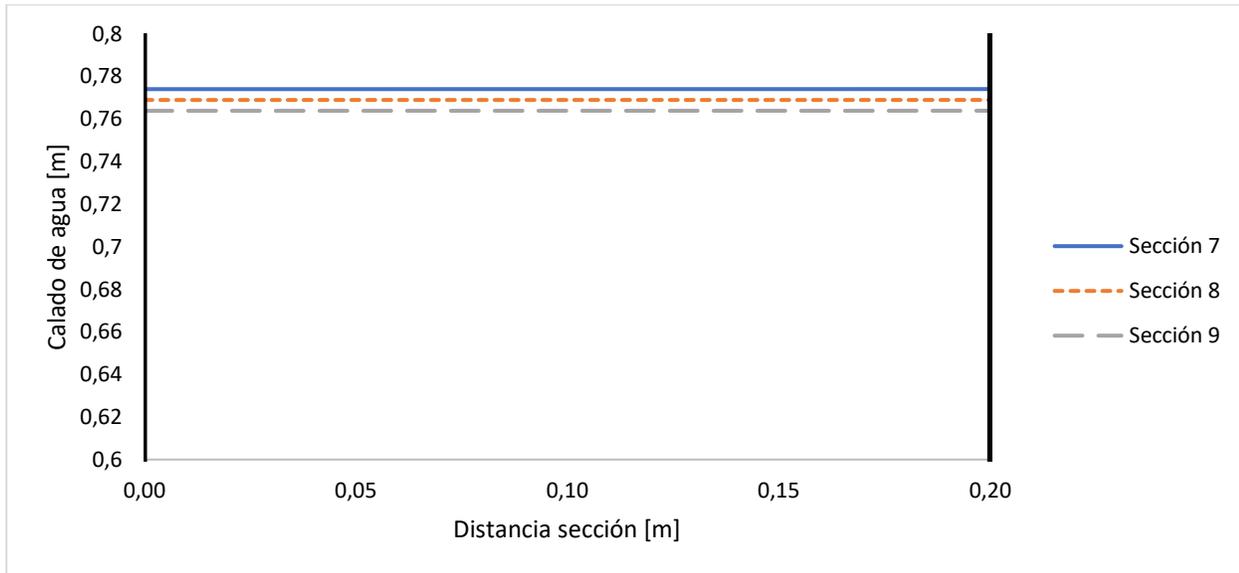


Figura 27. Perfil de agua medido en las secciones correspondientes a las secciones 7,8 y 9 ubicados en los tramos rectos de la Zona 2 del floculador para $Q_1= 6.78$ l/s

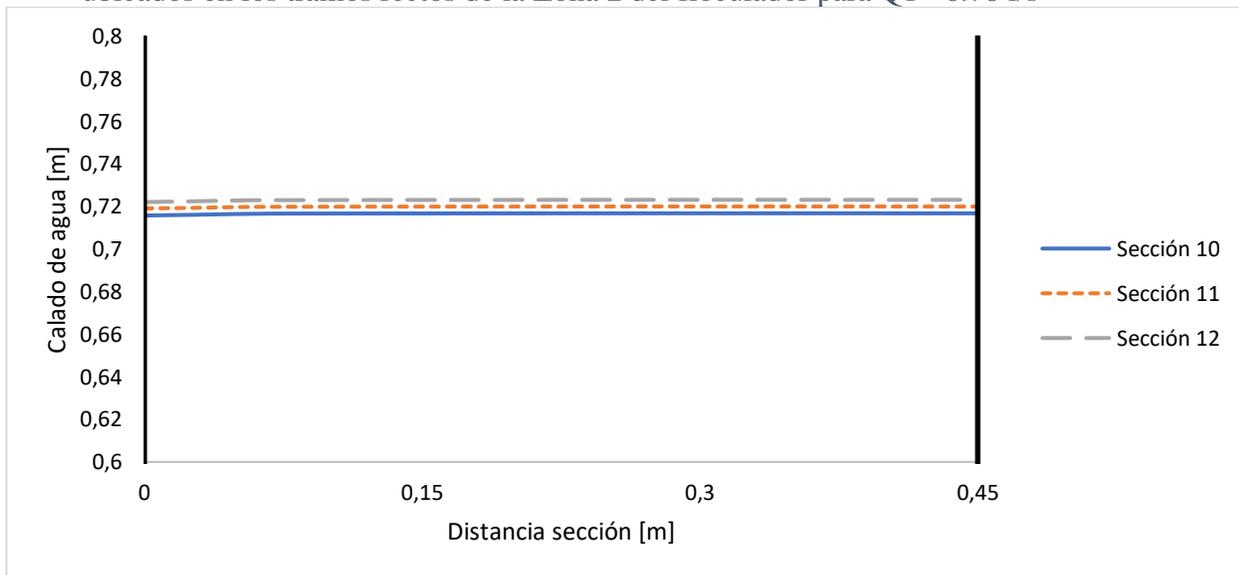


Figura 28. Perfil de agua medido en las secciones correspondientes a las secciones 10,11 y 12 ubicados en las esquinas de la Zona 3 del floculador para $Q_1= 6.78$ l/s

De igual manera, en la Figura 29 se presenta el mapa de áreas coloreadas de las velocidades del floculador para $Q_1= 6.78$ l/s; mientras que, en las Figuras 30 y 31 se indican los perfiles de velocidad de las secciones previamente indicadas.

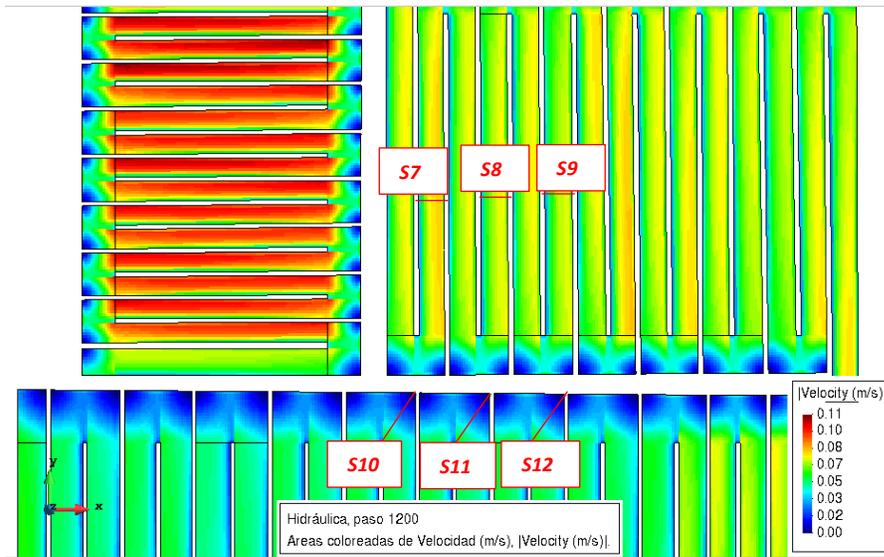


Figura 29. Mapa de áreas coloreadas de las velocidades para $Q_1 = 6.78$ l/s con la ubicación de las secciones 7-12.

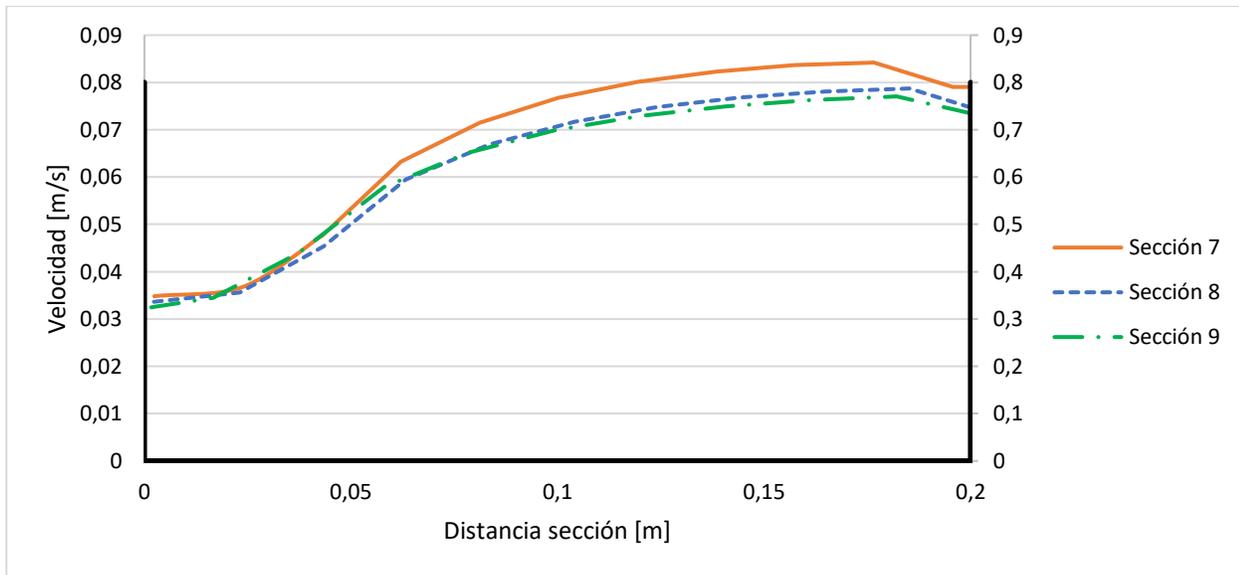


Figura 30. Perfil de velocidades correspondientes a las secciones 7,8 y 9 ubicados en los tramos rectos de la Zona 2 del floculador para $Q_1 = 6.78$ l/s

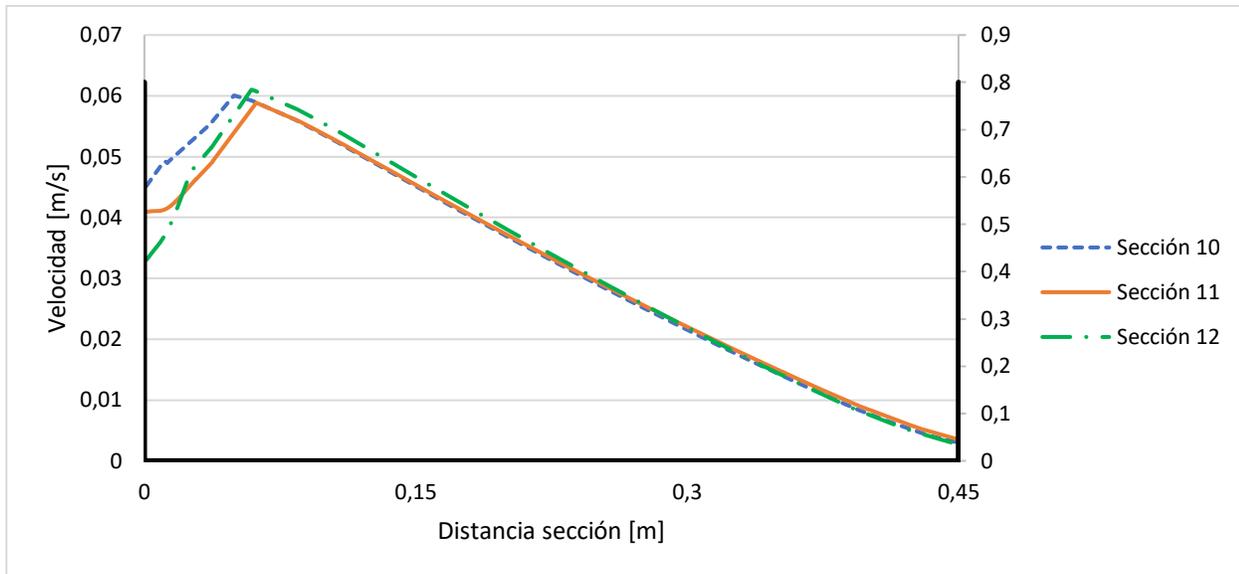


Figura 31. Perfil de velocidades correspondientes a las secciones 10,11 y 12 ubicados en las esquinas de la Zona 3 del floculador para $Q_1 = 6.78 \text{ l/s}$

De acuerdo con los resultados presentados, se observa que, en zonas con características geométricas similares, tanto el perfil del agua como las velocidades presentan patrones de comportamiento semejantes. Por ello, se puede deducir que los valores más bajos de velocidad se dan en todas las esquinas del floculador, y que a lo largo de todo el floculador el nivel de agua se distribuye de manera uniforme.

CAPITULO 5. CONCLUSIONES

- El floculador está compuesto por tres zonas. Con los datos obtenidos de la planimetría y altimetría se calcularon el área y los resultados para cada zona fueron 5.54 m^2 , 9.13 m^2 y 11.93 m^2 . Los caudales se midieron en tres horarios diferentes, siendo estos $Q1= 6.78 \text{ l/s}$, $Q2= 7.84 \text{ l/s}$ y $Q3=8.59 \text{ l/s}$.
- Mediante el ensayo de trazadores se determinaron los tiempos de retención para cada zona del floculador encontrándose estos en los rangos entre 6-7 min, 10-13 min y 14-19 min respectivamente; se evidenció que a medida que aumentó el caudal se redujo el tiempo de retención y la velocidad en el floculador. Los tiempos de retención teóricos fueron ligeramente mayores que los tiempos de retención obtenidos de las pruebas de trazadores.
- Mediante el método Wolf Resnick se identificó que el floculador funciona predominantemente en flujo pistón 86%, el porcentaje del flujo mezclado fue de aproximadamente 13% en las tres zonas; lo cual indica que tiene una eficiencia recomendada para este tipo de unidad de flujo horizontal. Respecto al porcentaje de zonas muertas, se identificó el mayor porcentaje de zonas muertas (14% aproximadamente) en la Zona 3 del floculador, en comparación con las Zonas 1 y 2. La Zona 3 es la última zona del recorrido del flujo, donde se reducen las velocidades para los caudales de estudio.
- Según el análisis basado en los dos sistemas de modelación matemática: Hec-RAS (unidimensional) e IBER (bidimensional), y de acuerdo a los resultados del modelo IBER se pudo observar que en todas las esquinas del floculador el flujo se reduce a velocidades muy cercanas a 0, lo que significaría un estancamiento de flujo en esas zonas.
- Estudios en los que se considere necesario analizar con mayor detalle el comportamiento hidráulico del flujo, especialmente las velocidades en zonas irregulares, debe realizarse la modelación bidimensional (IBER), puesto que Hec-RAS al ser un modelo unidimensional calcula la velocidad media del flujo en cada tramo establecido del floculador. Sin embargo, hay que tener en cuenta que los modelos bidimensionales (IBER) demandan mayor tiempo, específicamente en el proceso de análisis, en contraste con el modelo unidimensional (Hec-RAS).
- Debido a que el software IBER requiere de la creación del mallado, cuyo tamaño se define en función de la exactitud de resultados esperados, se realizó un análisis

paramétrico basando en el tamaño de la malla. Se determinó entonces que, para una malla cuadrada con tamaño 0.02cm se obtuvieron resultados más exactos cuando fueron comparados con los calados de agua medidos en campo. Sin embargo, el tiempo de análisis fue de 6 horas aproximadamente.

CAPITULO 6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar estudios paramétricos con variación de caudales mayores para determinar la influencia de la variación de caudal en la eficiencia del floculador, ya que los caudales considerados en este estudio difieren muy poco entre sí.
- Se recomienda realizar el análisis hidráulico del floculador modificando la geometría de las zonas donde se dan los cambios de dirección, es decir cambiar las esquinas rectangulares por zonas curvas, y analizar el comportamiento en esas zonas específicas. Esto como parte de un proceso de optimización del floculador.
- Para disminuir el tiempo de análisis en el modelo bidimensional IBER se recomienda usar un tamaño de malla más fino o discretizado en las esquinas donde hay cambio de dirección y menos discreto en los tramos rectos.
- Para el análisis bidimensional se recomienda crear la geometría del modelo en formato dxf, y posteriormente importarlo al programa de análisis, y así reducir el tiempo de análisis.

REFERENCIAS

- Aguirre Martínez, D. (2015). Evaluación del floculador en la planta de tratamiento de agua potable "La Esperanza" que abastece a los cantones Machala, Pasaje y El guabo, provincia de El Oro. [Universidad Técnica de Machala]. <http://weekly.cnbnews.com/news/article.html?no=124000>
- Aldapa, J. (2001). Mejoramiento De Eficiencia Del Floculador De Paletas De Eje Horizontal, Mediante Cambio a Un Sistema Hidráulico De Flujo Vertical, En La Potabilizadora Centro De La Ciudad De Nuevo Laredo, Tamaulipas. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Aragón-Hernández, J. L., Caballero-Coranguez, C. A., Jiménez-Castañeda, A. A., & Berezowsky-Verduzco, M. (2022). Experimental-numerical study of the velocity field in a rectangular channel with composite curvature and variable width in 2DH. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 13(1), 1–48. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2022-01-01>
- Bridgeman, J., Jefferson, B., & Parsons, S. A. (2010). The development and application of CFD models for water treatment flocculators. *Advances in Engineering Software*, 41(1), 99–109. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2008.12.007>
- Calderón, E. F. (2018). Identificación y evaluación de riesgos físicos, químicos, mecánicos y ergonómicos en la Junta de Agua Potable Regional Bayas (Azogues) [Universidad de Cuenca]. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.101.089902><http://dx.doi.org/10.1016/j.nantod.2015.04.009><http://dx.doi.org/10.1038/s41467-018-05514-9><http://dx.doi.org/10.1038/s41467-019-13856-1><http://dx.doi.org/10.1038/s41467-020-14365-2><http://dx.doi.org/10.1038/s41467-020-14365-2>
- Calle, L., & Zambrano, C. (2015). Optimización del proceso de floculación y coagulación de la planta potabilizadora de la junta de agua potable de Bayas [Universidad de Cuenca]. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/22162/1/tesis.pdf>
- Danageuzian, H. R. (2019). PIV and CFD Investigation of Flocculation Hydrodynamics. May, 145.
- Echeverría, J., & Anaya, S. (2018). El derecho humano al agua potable en Colombia: Decisiones del Estado y de los particulares. *Vniversitas*, 67(136), 1–14.
- Gonzalías, A. (2019). Modelo CFD para caracterizar la hidrodinámica de un floculador hidráulico tipo alabama en la PTAP “ El Arroyo ” localizada en Santander de Quilichao. Universidad del Valle.
- Gutiérrez Sarmiento, A. (2017). Evaluación de la calidad del agua en los diferentes procesos de tratamiento para su potabilización en la junta administradora de Agua Potable regional Bayas- Azogues. Universidad de Cuenca.
- Jama, M. I. (2013). Numerical modelling and experimental investigations of a flocculation

unit at Överby drinking water treatment plant. Chalmers University of Technology.

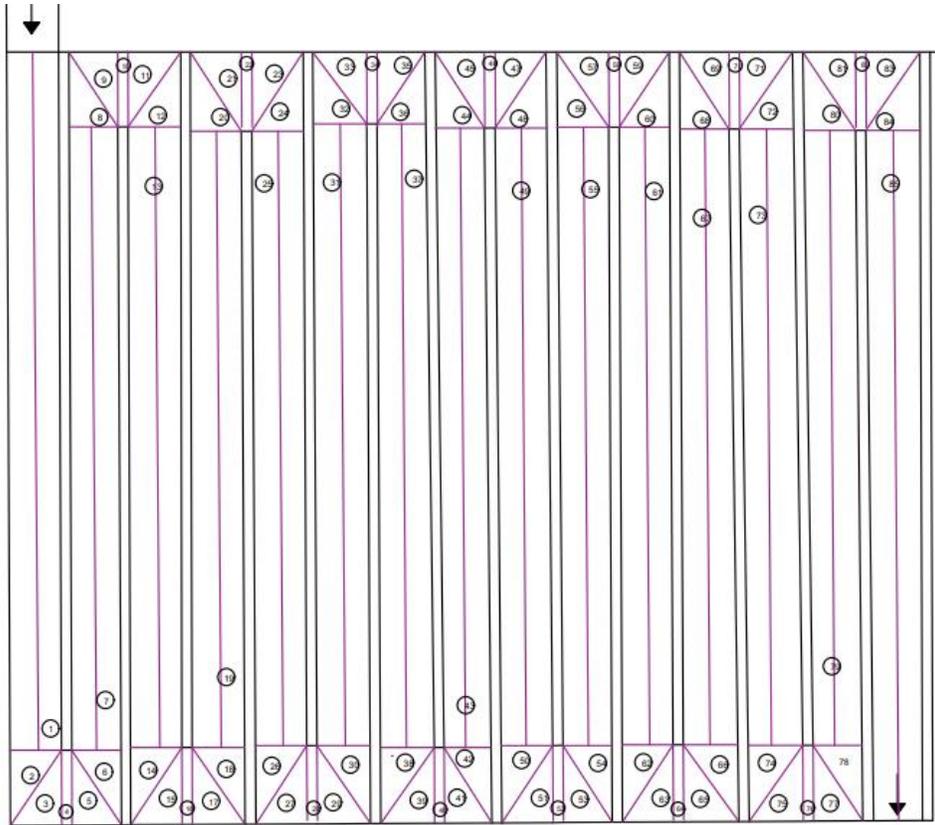
- Lluen, W. E. (2015). Aplicación de la nueva herramienta HEC-RAS 5.0 para cálculos bidimensionales del flujo de agua en ríos. Universidad Politécnica de Catalunya Barcelonatech, 74. <https://www.semanticscholar.org/paper/Aplicación-de-la-nueva-herramienta-HEC-RAS-5.0-para-Chero-Eduardo/493f4aee4b73f513ca77ff65ebd9b6fc496cf36e>
- Moral, M., & Sagal, M. (2019). Optimización de los procesos de coagulación, floculación y cloración en la Junta Administradora de Agua Potable Regional Bayas. Universidad de Cuenca.
- Palermo Rojas, I. R. (2018). Eficiencia De La Planta De Tratamiento De Agua Cruda Para La Ciudad De San Marcos, 2017. In Universidad de Cajamarca. Universidad Nacional de Cajamarca.
- Patiño, P., Cruz, C., Torres, P., & Laín, S. (2012). Hydrodynamic evaluation of a hydraulic clarifier through hydraulic behaviour indicators and simplified flow models. *Ingeniería e Investigación*, 32(1), 77–82.
- Rivera, J. M. C. (2017). Diseño Planta de Tratamiento Potable Convencional , Matacañas , Orocovis. Universidad Politécnica de Puerto Rico.
- Romero, J. (2006). Purificación del Agua (Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería (ed.)).
- Sánchez, J., & Gallo, S. (2009). Evaluación del comportamiento hidráulico de un reactor aerobio y un reactor anaerobio, en una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de pequeña escala. *Avances En Recursos Hidráulicos*, 20, 65–80.
- Shi, Z., Zhang, G., Zhang, Y., He, T., & Pei, G. (2019). Modeling of flocculation and sedimentation using population balance equation. *Journal of Chemistry*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/9187204>
- Uvidia F, J. E. (2013). Optimización de la planta de tratamiento de agua potable de ciudad de Chambo. Facultad de Ciencias, 179. <http://dspace.espace.edu.ec/bitstream/123456789/3203/1/96T00237.pdf>
- Valdés De Hoyos, E. I. P., & Uribe Arzate, E. (2016). The Human Right To Water. a Matter of Interpretation or Recognition. *Cuestiones Constitucionales*, 34(C), 3–25. <https://doi.org/10.1016/j.rmdc.2016.07.001>
- Vargas, A. N., López C, L., & Núñez-vallejos, D. (2019). Optimización Geométrica De Un Floculador Hidráulico Horizontal Para Potabilización De Aguas Veredales. 2 Congreso Lationamericano de Ingeniería ACOFI. <https://acofipapers.org/index.php/eiei2019/2019/paper/viewFile/3404/1158>

Vargas, R., & Pérez, G. (2010). Análisis De La Curva De Distribución Del Tiempo De Residencia En Un Sistema De Lixiviación. *Tecnología Química*, XXX(1), 61–68

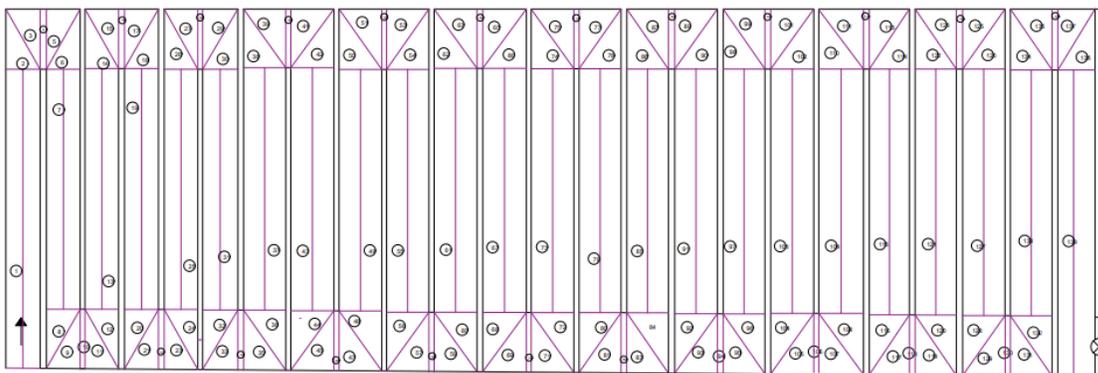
Zapata Rivera, A. M., & Manjarres, A. G. (2020). Caracterización cinética e hidrodinámica del fluido en un floculador hidráulico tipo Alabama localizado en la Ptap “El Arroyo” en Santander de Quilichao, Cauca. *Latin American Developments in Energy Engineering*, 1(1), 43–54. <https://doi.org/10.17981/ladee.01.01.2020.4>

ANEXOS

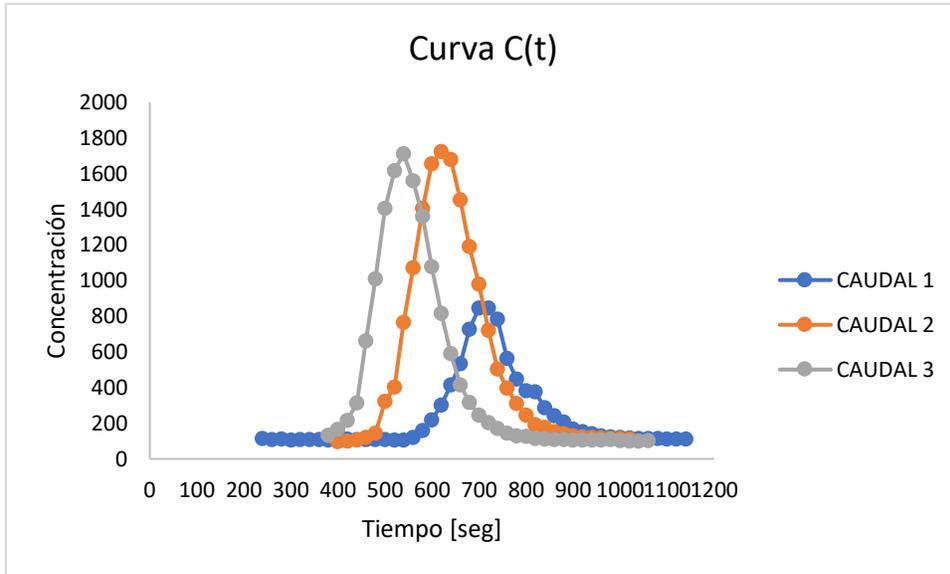
Anexo 1.



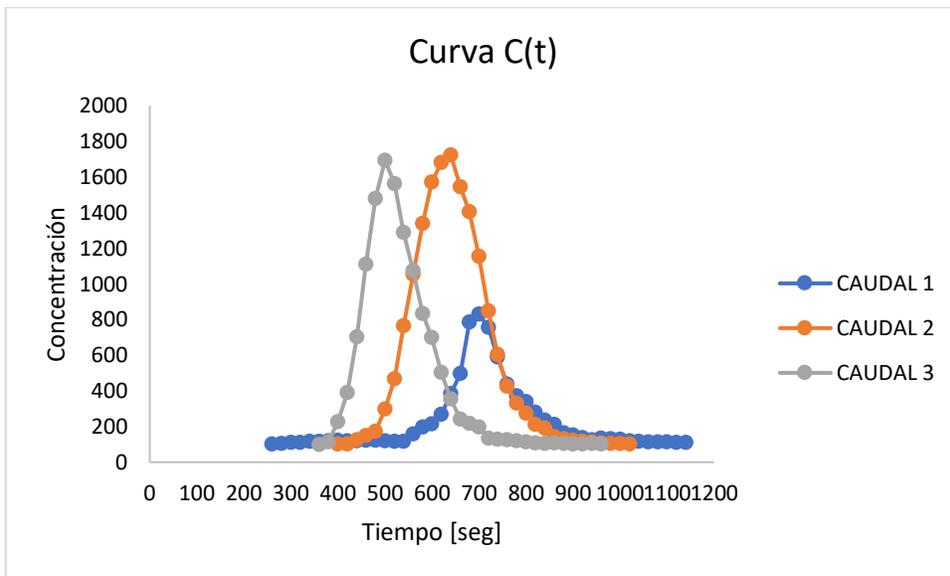
Anexo 2.



Anexo 3. Curvas $C(t)$ de la zona 2: a) ensayo 1, b) ensayo 2.

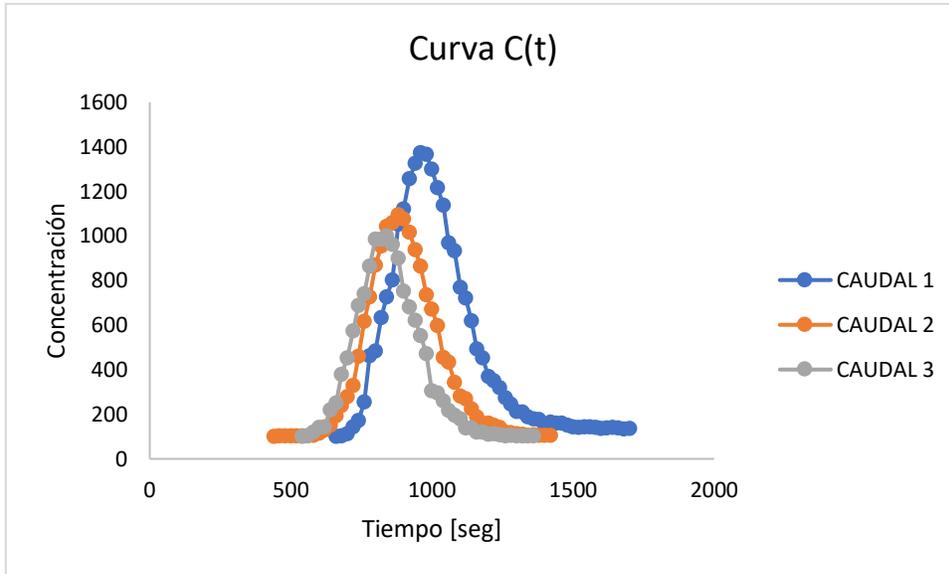


(a)

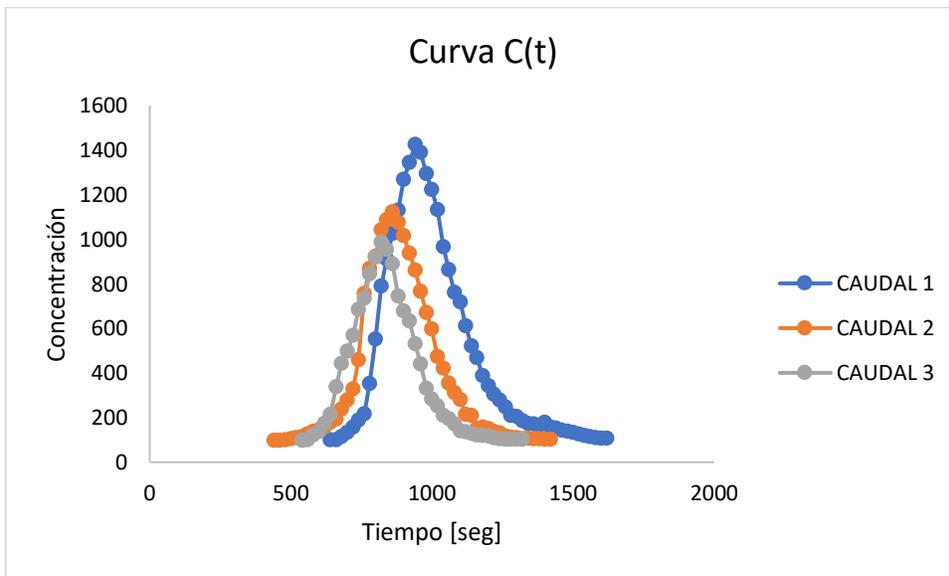


(b)

Anexo 4. Curvas C(t) de la zona 3: a) ensayo 1, b) ensayo 2.



(a)



(b)

Anexo 5.

Tabla . Z1 Ensayo 1

Parámetro	Caudal [L/s]		
	6.78	7.84	8.59
ti, tiempo hasta la aparición del trazador [min]	4.00	3.00	3.00

tp, tiempo de máxima concentración [min]	6.67	6.33	5.33
tm, tiempo modal hasta aparición del 50% del trazador [min]	7.75	7.09	6.16
to, tiempo teórico de retención [min]	7.62	6.62	6.07
tf, tiempo final [min]	15.00	12.33	11.67
Co, concentración inicial	100	97	97
Cp, concentración máxima	3010	2489	2412

Anexo 6.

Tabla . Z1 Ensayo 2

Parámetro	Caudal [L/s]		
	6.78	7.84	8.59
ti, tiempo hasta la aparición del trazador [min]	3.67	3.00	3.00
tp, tiempo de máxima concentración [min]	6.67	6.00	5.33
tm, tiempo modal hasta aparición del 50% del trazador [min]	7.35	6.70	6.11
to, tiempo teórico de retención [min]	7.62	6.62	6.07
tf, tiempo final [min]	13.67	12.33	11.67
Co, concentración inicial	100	100	97
Cp, concentración máxima	2855	2521	2381

Anexo 7.

Tabla . Z2 Ensayo 1

Parámetro	Caudal [L/s]		
	6.78	7.84	8.59
ti, tiempo hasta la aparición del trazador [min]	4.00	6.67	6.33
tp, tiempo de máxima concentración [min]	11.67	10.33	9.00
tm, tiempo modal hasta aparición del 50% del trazador [min]	11.88	10.89	9.87
to, tiempo teórico de retención [min]	13.35	11.68	10.72
tf, tiempo final [min]	19.00	17.00	15.00
Co, concentración inicial	100	97	95

Cp, concentración máxima	846	1723	1712
--------------------------	-----	------	------

Anexo 8.

Tabla . Z2 Ensayo 2

Parámetro	Caudal [L/s]		
	6.78	7.84	8.59
ti, tiempo hasta la aparición del trazador [min]	4.33	6.67	6.00
tp, tiempo de máxima concentración [min]	11.67	10.67	8.33
tm, tiempo modal hasta aparición del 50% del trazador [min]	11.83	10.90	9.26
to, tiempo teórico de retención [min]	13.35	11.68	10.72
tf, tiempo final [min]	19.00	17.00	16.00
Co, concentración inicial	100	97	97
Cp, concentración máxima	828	1723	1693

Anexo 9.

Tabla . Z3 Ensayo 1

Parámetro	Caudal [L/s]		
	6.78	7.84	8.59
ti, tiempo hasta la aparición del trazador [min]	11.00	7.33	9.00
tp, tiempo de máxima concentración [min]	16.00	14.67	14.00
tm, tiempo modal hasta aparición del 50% del trazador [min]	17.52	15.15	14.58
to, tiempo teórico de retención [min]	19.79	17.60	16.20
tf, tiempo final [min]	28.33	23.67	22.67
Co, concentración inicial	97	100	95
Cp, concentración máxima	1374	1095	1000

Anexo 10.

Tabla . Z3 Ensayo 2

Parámetro	Caudal [L/s]		
	6.78	7.84	8.59
ti, tiempo hasta la aparición del trazador [min]	10.67	7.33	9.00

tp, tiempo de máxima concentración [min]	15.67	14.33	13.67
tm, tiempo modal hasta aparición del 50% del trazador [min]	17.02	14.96	14.35
to, tiempo teórico de retención [min]	19.79	17.60	16.20
tf, tiempo final [min]	27.00	23.67	22.00
Co, concentración inicial	100	97	97
Cp, concentración máxima	1425	1123	987

Anexo 11.

Tabla de tiempo de retención del floculador correspondiente a las tres pruebas realizadas

	T [°C]	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3
		to [min]	to [min]	to [min]
Q1= 6.78 L/s	21	7.75	11.88	17.02
Q2= 7.84 L/s	20.7	7.09	10.89	14.96
Q3= 8.59 L/s	18.5	6.16	9.87	14.35

Anexo 12.

Tabla de tiempo de retención teórico del floculador, en cada zona

	T [°C]	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3
		to [min]	to [min]	to [min]
Q1= 6.78 L/s	21	7.62	13.35	19.79
Q2= 7.84 L/s	20.7	6.62	11.68	17.60
Q3= 8.59 L/s	18.5	6.07	10.72	16.20

Anexo 13.

Tabla . Z1 Ensayo 1

Criterio	Descripción	Caudal [L/s]		
		6.78	7.84	8.59
ti/t0		0.53	0.45	0.49

	Mide cortos circuitos. Un valor de 1 indica flujo pistón, mientras un valor de 0 indica flujo de mezcla y si es mayor a 0,3 corto circuito			
tm/t0	Indica cortos circuitos cuando su valor es menor a 1 y zonas muertas cuando su valor es mayor a 1	1.02	1.07	1.02
tp/t0	Indica la relación entre flujo pistón y flujo de mezcla del floculador	0.88	0.96	0.88

Anexo 14.

Tabla . Z1 Ensayo 2

Criterio	Descripción	Caudal [L/s]		
		6.78	7.84	8.59
ti/t0	Mide cortos circuitos. Un valor de 1 indica flujo pistón, mientras un valor de 0 indica flujo de mezcla y si es mayor a 0, 3 corto circuito	0.48	0.45	0.49
tm/t0	Indica cortos circuitos cuando su valor es menor a 1 y zonas muertas cuando su valor es mayor a 1	0.97	1.01	1.01
tp/t0	Indica la relación entre flujo pistón y flujo de mezcla del floculador	0.88	0.91	0.88

Anexo 15.

Tabla . Z2 Ensayo 1

Criterio	Descripción	Caudal [L/s]		
		6.78	7.84	8.59
ti/t0	Mide cortos circuitos. Un valor de 1 indica flujo pistón, mientras un valor de 0 indica flujo de mezcla y si es mayor a 0, 3 corto circuito	0.30	0.57	0.59
tm/t0	Indica cortos circuitos cuando su valor es menor a 1 y zonas muertas cuando su valor es mayor a 1	0.89	0.93	0.92
tp/t0	Indica la relación entre flujo pistón y flujo de mezcla del floculador	0.87	0.88	0.84

Anexo 16.

Tabla . Z2 Ensayo 2

Criterio	Descripción	Caudal [L/s]
----------	-------------	--------------

		6.78	7.84	8.59
ti/t0	Mide cortos circuitos. Un valor de 1 indica flujo pistón, mientras un valor de 0 indica flujo de mezcla y si es mayor a 0, 3 corto circuito	0.32	0.57	0.56
tm/t0	Indica cortos circuitos cuando su valor es menor a 1 y zonas muertas cuando su valor es mayor a 1	0.89	0.93	0.86
tp/t0	Indica la relación entre flujo pistón y flujo de mezcla del floculador	0.87	0.91	0.78

Anexo 17.

Tabla . Z3 Ensayo 1

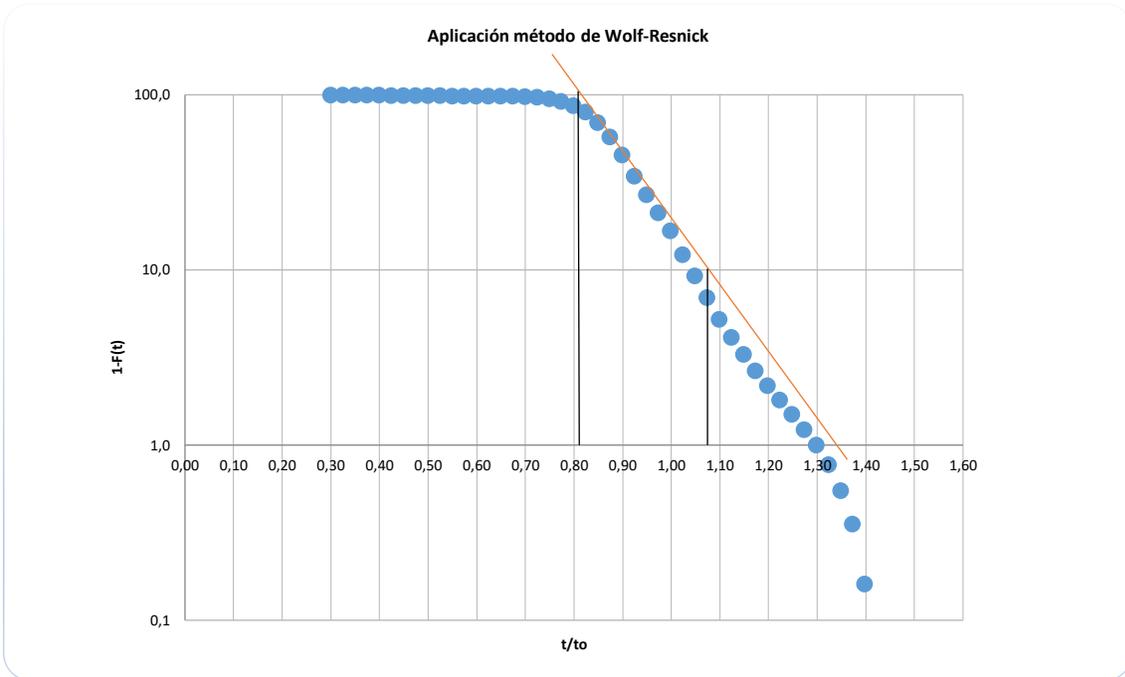
Criterio	Descripción	Caudal [L/s]		
		6.78	7.84	8.59
ti/t0	Mide cortos circuitos. Un valor de 1 indica flujo pistón, mientras un valor de 0 indica flujo de mezcla y si es mayor a 0, 3 corto circuito	0.56	0.42	0.56
tm/t0	Indica cortos circuitos cuando su valor es menor a 1 y zonas muertas cuando su valor es mayor a 1	0.89	0.86	0.90
tp/t0	Indica la relación entre flujo pistón y flujo de mezcla del floculador	0.81	0.83	0.86

Anexo 18.

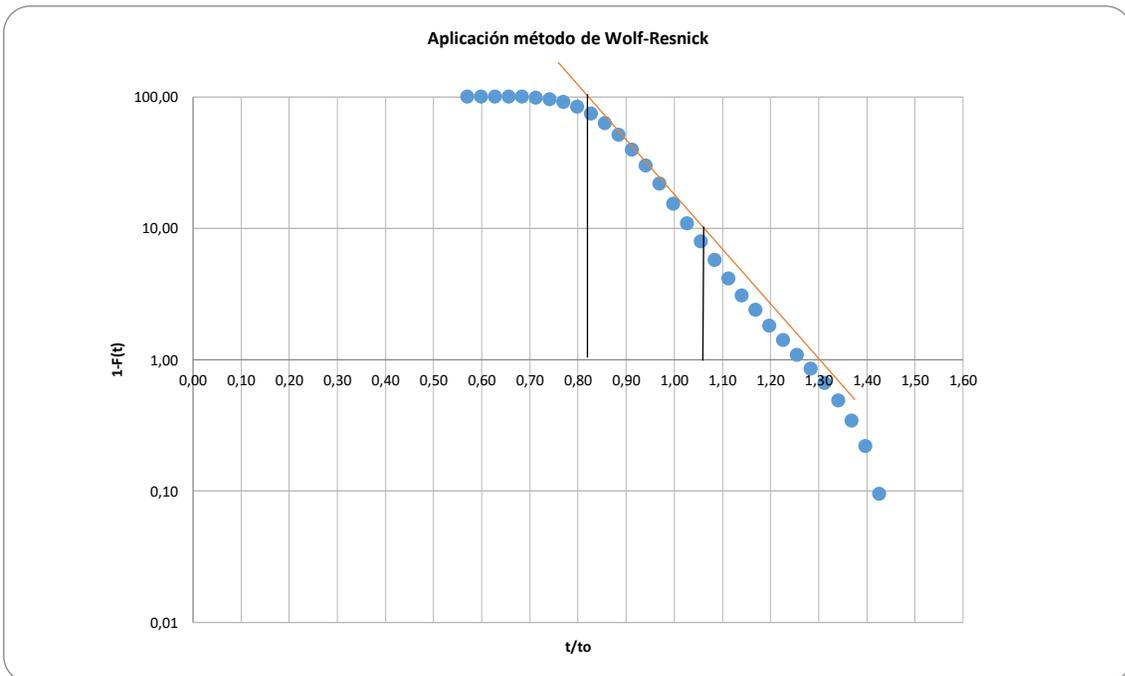
Tabla . Z3 Ensayo 2

Criterio	Descripción	Caudal [L/s]		
		6.78	7.84	8.59
ti/t0	Mide cortos circuitos. Un valor de 1 indica flujo pistón, mientras un valor de 0 indica flujo de mezcla y si es mayor a 0, 3 corto circuito	0.54	0.42	0.56
tm/t0	Indica cortos circuitos cuando su valor es menor a 1 y zonas muertas cuando su valor es mayor a 1	0.86	0.85	0.89
tp/t0	Indica la relación entre flujo pistón y flujo de mezcla del floculador	0.79	0.81	0.84

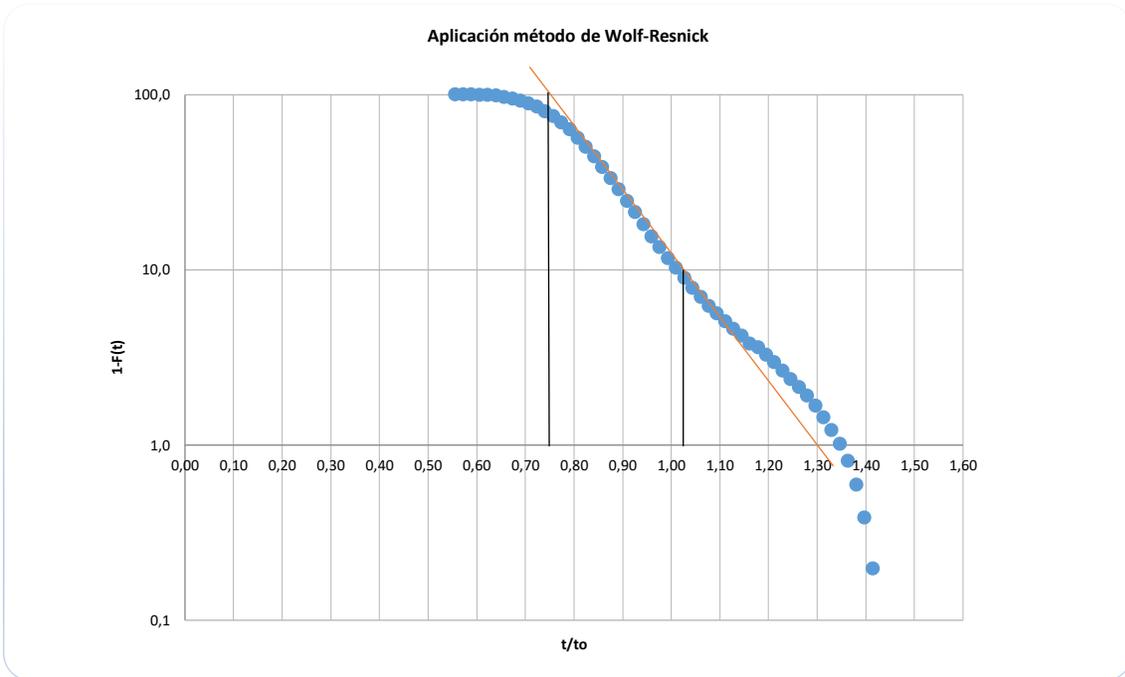
Anexo 19. Curva 1 – F(t) usada para el modelo Wolf – Resnick de la zona 2, ensayo 1



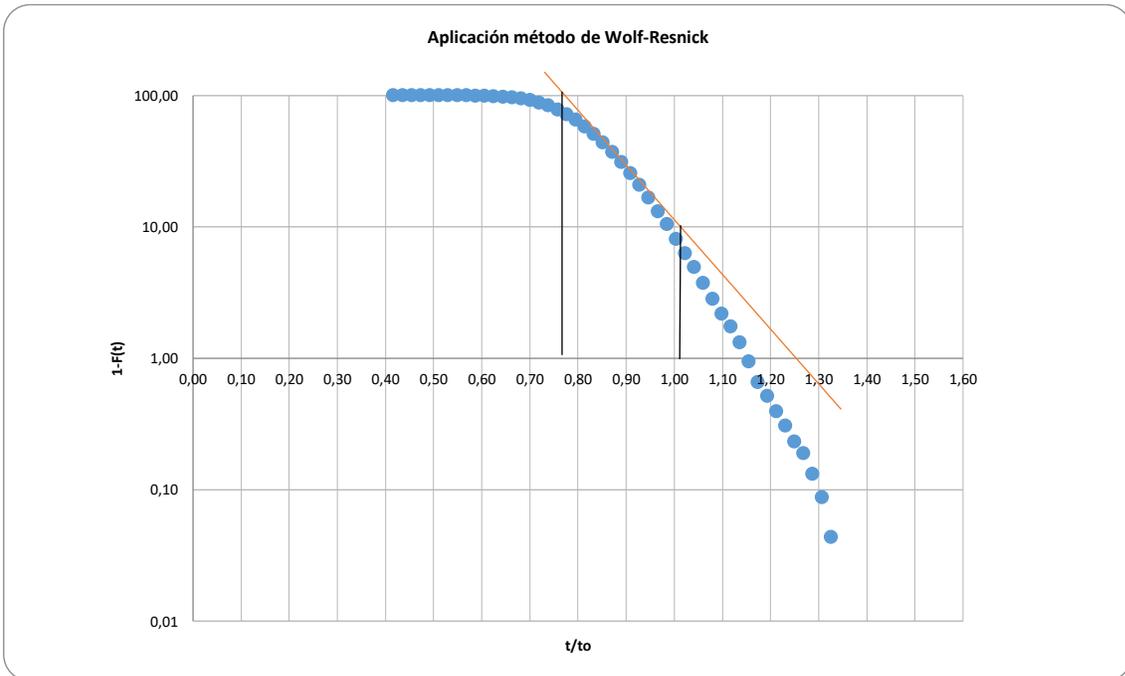
Anexo 20. Curva 1 – F(t) usada para el modelo Wolf – Resnick de la zona 2, ensayo 2



Anexo 21. Curva 1 – F(t) usada para el modelo Wolf – Resnick de la zona 3, ensayo 1



Anexo 22. Curva 1 – F(t) usada para el modelo Wolf – Resnick de la zona 3, ensayo 2



Anexo 23.

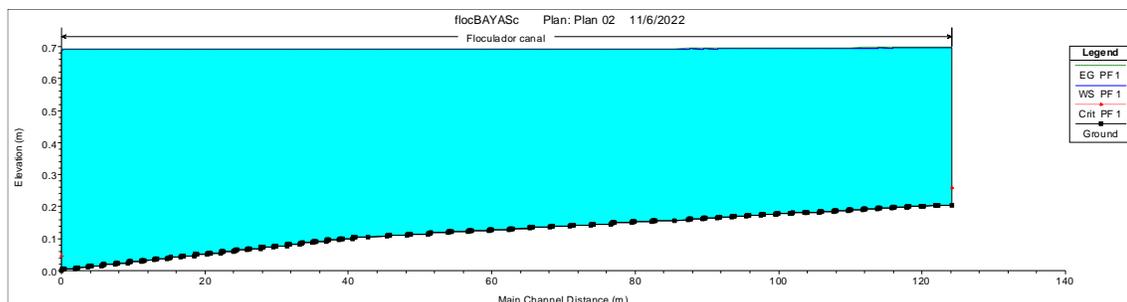
ENSAYO 1

		$\Theta=t1/to$	$t2/to$	$tg \alpha$	Flujo pistón P [%]	Flujo mezclado M [%]	Zonas muertas m [%]
ZONA 1	Q1=6.78 L/s	0.85	1.12	3.70	87.9	12.1	3.3
	Q2=7.84 L/s	0.90	1.24	2.90	85.6	14.4	-4.5
	Q3=8.59 L/s	0.84	1.12	3.64	87.5	12.5	4.0
ZONA 2	Q1=6.78 L/s	0.82	1.08	3.77	87.6	12.4	7.0
	Q2=7.84 L/s	0.82	1.06	4.17	88.7	11.3	7.6
	Q3=8.59 L/s	0.78	1.00	4.55	89.1	10.9	12.4
ZONA 3	Q1=6.78 L/s	0.75	1.02	3.70	86.5	13.5	13.3
	Q2=7.84 L/s	0.78	1.01	4.35	88.6	11.4	12.0
	Q3=8.59 L/s	0.79	1.03	4.17	88.3	11.7	10.6

Anexo 24.

ENSAYO 2							
		$\Theta=t1/to$	$t2/to$	$tg \alpha$	Flujo pistón P [%]	Flujo mezclado M [%]	Zonas muertas m [%]
ZONA 1	Q1=6.78 L/s	0.82	1.12	3.28	86.0	14.0	5.2
	Q2=7.84 L/s	0.86	1.13	3.70	88.0	12.0	2.3
	Q3=8.59 L/s	0.82	1.12	3.33	86.3	13.7	5.0
ZONA 2	Q1=6.78 L/s	0.8	1.06	3.85	87.6	12.4	8.7
	Q2=7.84 L/s	0.85	1.05	5.00	90.7	9.3	6.3
	Q3=8.59 L/s	0.72	0.96	4.17	87.3	12.7	17.6
ZONA 3	Q1=6.78 L/s	0.74	0.99	4.00	87.2	12.8	15.1
	Q2=7.84 L/s	0.77	0.98	4.76	89.4	10.6	13.9
	Q3=8.59 L/s	0.77	1.02	4.00	87.6	12.4	12.1

Anexo 25. Curva altura vs distancia longitudinal del floculador usando Q2 (7.84 L/s) del modelo HEC-RAS



Anexo 26. Curva altura vs distancia longitudinal del floculador usando Q3 (8.59 L/s) del modelo HEC-RAS

