

# UCUENCA

**Facultad de Ciencias Químicas**

**Carrera de Ingeniería Ambiental**

**Carrera de Ingeniería Química**

**“Desempeño de floculadores tubulares usando policloruro de aluminio como coagulante en la potabilización del agua”**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental / Ingeniero Químico.

**Autores:**

Bustamante Peralta Jorge Sebastián

CI: 0301967683

Correo electrónico: jorge\_14j@hotmail.com

Gómez García Natasha Estefanía

CI:0107190381

Correo electrónico: gomeznatasha917@gmail.com

**Director:**

Ing. Fausto Fernando García Ávila, PhD

CI:0301454617

**Cuenca-Ecuador**

21 de octubre de 2022

## RESUMEN

Los procesos químicos de coagulación y floculación son los procesos más importantes en el tratamiento del agua ya que, gracias a la adición de coagulantes y floculantes, hacen que ciertas sustancias coloidales presentes en el agua cruda se aglutinen facilitando los posteriores procesos para la potabilización. Es por esta razón que este estudio tuvo como objetivo evaluar el desempeño de un floculador tubular de flujo horizontal (FTFH) y un floculador tubular de flujo vertical (FTFV) utilizando Policloruro de Aluminio (PAC) como coagulante y polielectrolito catiónico como floculante, para remover turbiedad y color y posteriormente comparar los resultados con los de una planta convencional. Para lo cual, se realizaron pruebas experimentales en dos floculadores piloto construido de tubos PVC de diámetros de 75 mm y 110mm para el FTFH y diámetros de 63 mm y 110 mm para el FTFV, se usaron diferentes turbiedades de agua cruda (15, 50, 100 y 1000 NTU), caudales de 0.5, 1 y 2 L/s, así como longitudes de tubería de 90, 97.6 y 187.6 m para el FTFH, y 90, 80 y 170 m para el FTFV. Para determinar la eficiencia de remoción de turbiedad y color se tomaron muestras del agua cruda, agua sedimentada y agua filtrada, tanto del sistema piloto como del sistema convencional de la Planta de Tratamiento de Agua Potable Bayas (PTAP-B). A su vez, se comparó la eficiencia del coagulante PAC y sulfato de aluminio, en este último se tomó los resultados de dos estudios previos realizados. Adicionalmente se determinó parámetros hidráulicos como gradientes de velocidad y tiempo de retención usando trazadores. Finalmente, los resultados del presente estudio demostraron que la eficiencia a la salida del filtro del sistema piloto, con previos usos del FTFH fue de 95.8% para turbiedad y 97.2% para color; con el FTFV fue de 98.48% y 99.4% para turbiedad y color respectivamente; mientras que la PTAP-B fue de 98.78% de turbiedad y 99% para color. Demostrando de esta manera que ambos sistemas fueron eficientes y cumplieron con la normativa INEN 1108. También se evidenció que hubo un mejor desempeño del proceso al sustituir el coagulante sulfato de aluminio por PAC.

**Palabras clave:** Tratamiento del agua. Floculador tubular de flujo horizontal. Floculador tubular de flujo vertical. PAC. Sulfato de aluminio. Eficiencia de remoción.

## ABSTRACT

The chemical processes of coagulation and flocculation are the most important processes in water treatment since, thanks to the addition of coagulants and flocculants, they cause certain colloidal substances present in raw water to agglutinate, facilitating subsequent processes for purification. It is for this reason that this study aimed to evaluate the performance of a horizontal flow tubular flocculator (FTFH) and a vertical flow tubular flocculator (FTFV) using Poly Aluminum Chloride (PAC) as a coagulant and cationic polyelectrolyte as flocculant, to remove turbidity and color and then compare the results with those of a conventional plant. For which, experimental tests were carried out in two pilot flocculators made of PVC tubes with diameters of 75 mm and 110 mm for the FTFH and diameters of 63 mm and 110 mm for the FTFV, using different turbidities of raw water (15 , 50 , 100 and 1000 NTU), flow rates of 0.5, 1 and 2 L/s, as well as pipe lengths of 90, 97.6 and 187.6 m for the FTFH, and 90, 80 and 170 m for the FTFV. To determine the efficiency of turbidity and color removal, raw water, settled water and filtered water samples were taken, both from the pilot system and from the conventional system of the Bayas Potable Water Treatment Plant (PTAP-B). In turn, the efficiency of the PAC coagulant and aluminum sulfate was compared, in the latter the results of two previous studies were taken. Additionally, hydraulic parameters such as velocity gradients and retention time were determined using tracers. Finally, the results of this study showed that the efficiency at the filter outlet of the pilot system, with prior use of the FTFH, was 95.8 % for turbidity and 97.2 % for color; with the FTFV it was 98.48% and 99.4% for turbidity and color, respectively; while the PTAP - B was 98.78 % for turbidity and 99 % for color. Demonstrating in this way that both systems were efficient and complied with INEN 1108 regulations. It was also shown that there was a better performance of the process when substituting the aluminum sulfate coagulant for PAC.

**Keywords:** Water treatment. Horizontal flow tubular flocculator. Vertical flow tubular flocculator. PAC. Aluminum sulfate. Removal efficiency.

## Lista de Abreviaturas

<b>Config</b>	Configuración
<b>FTFH</b>	Floculador tubular de flujo horizontal
<b>FTFV</b>	Floculador tubular de flujo vertical
<b>G</b>	Gradiente de velocidad
<b>Gr</b>	Gradiente de velocidad real
<b>Gt</b>	Gradiente de velocidad teórico
<b>ha</b>	Pérdida de carga por accesorios
<b>hc</b>	Pérdida de carga por presión
<b>JAAP</b>	Junta Administradora de agua potable
<b>L</b>	Longitud
<b>NaCl</b>	Cloruro de sodio
<b>NTU</b>	Unidad Nefelométrica de Turbidez
<b>PTAP-B</b>	Planta de Tratamiento de agua potable de Bayas
<b>Pt-Co</b>	Unidades de Platino-Cobalto
<b>PVC</b>	Policloruro de Vinilo
<b>Q</b>	Caudal
<b>Re</b>	Reynolds
<b>SDT</b>	Sólidos totales disueltos
<b>TAC</b>	Turbiedad de agua cruda
<b>Tr</b>	Tiempo de retención real
<b>Tt</b>	Tiempo de retención teórico
<b>V</b>	Volumen

<b>ÍNDICE</b>	
<b>RESUMEN</b> .....	<b>2</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>3</b>
<b>CLÁUSULAS</b> .....	<b>14</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>18</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>19</b>
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>20</b>
1.1 Antecedentes .....	20
1.2 Problemática .....	21
1.3 Justificación .....	21
1.4 Objetivos .....	23
1.4.1 Objetivo General.....	23
1.4.2 Objetivos específicos.....	23
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>24</b>
2.1 Agua Potable .....	24
2.2 Parámetros físicos, químicos y microbiológicos del agua potable .....	24
2.2.1 Parámetros físicos.....	24
2.1.2 Parámetros químicos.....	26
2.1.3 Parámetros biológicos .....	28
2.2 Normativa.....	29
2.3 Tratamiento de agua potable .....	30
2.3.1 Mezcla rápida .....	30
2.3.2 Teoría de la coagulación .....	30
2.3.3 Teoría de la floculación.....	34
2.3.4 Teoría de la sedimentación .....	38
2.3.5 Teoría de la filtración .....	39
2.4 Estado de arte.....	40
2.4.1 Estudios sobre floculadores tubulares de flujo horizontal .....	40
2.4.2 Estudios sobre floculadores tubulares de flujo vertical .....	41
<b>CAPITULO III. METODOLOGÍA</b> .....	<b>43</b>
3.1. Descripción del área de estudio.....	43

3.2	Descripción de los sistemas tubulares pilotos implementados en la PTAP-B	44
3.2.1	Floculador tubular de flujo horizontal (FTFH) piloto	44
3.2.2	Floculador tubular de flujo vertical (FTFV) piloto	46
3.3	Determinación de parámetros hidráulicos de los sistemas tubulares pilotos implementados para el tratamiento de agua potable	48
3.3.1	Determinación del tiempo de retención teórico	48
3.3.2	Determinación del tiempo de retención real	48
3.3.3	Determinación del gradiente de velocidad (G)	49
3.4	Determinación de la dosis óptima de coagulante y floculante en las pruebas experimentales	52
3.4.1	Determinación de la dosis óptima del coagulante	52
3.4.2	Determinación de la dosis óptima de polímero	52
3.5	Ensayo experimental	52
3.5.1	Tratamientos experimentales	52
3.5.2	Muestreo y análisis de parámetros para la remoción de turbidez, color y determinación de la eficiencia	54
3.5.3	Eficiencia de los tratamientos experimentales	54
3.6	Análisis estadístico	55
3.6.1	Estadística descriptiva	55
3.6.2	Correlación de las variables	55
3.6.3	Prueba estadística	56
<b>CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>		<b>58</b>
4.1	Parámetros hidráulicos de los floculadores tubulares implementados para el tratamiento de agua potable	58
4.1.1	Tiempo de retención teórico	58
4.1.2	Tiempo de retención real	59
4.1.3	Gradiente de velocidad	62
4.2	Dosis de coagulante	65
4.3	Turbiedad y color remanente en los sistemas tubulares pilotos implementados para el tratamiento de agua potable	66
4.3.1	Turbiedad y color en el sedimentador con previo uso del floculador tubular de flujo horizontal (FTFH)	67

4.3.2 Turbiedad y color en el filtro con previo uso del sedimentador y floculador tubular de flujo horizontal (FTFH) .....	69
4.3.3 Turbiedad y color en el sedimentador con previo uso del floculador tubular de flujo vertical (FTFV) .....	71
4.3.4 Turbiedad y color en el filtro con previo uso del sedimentador y floculador tubular de flujo vertical (FTFV) .....	74
4.4 Eficiencia de remoción de turbiedad y color de los dos sistemas pilotos (FTFH y FTFV).....	76
4.4.1 Eficiencia en el sedimentador con previo uso del floculador tubular de flujo horizontal (FTFH) .....	76
4.4.2 Eficiencia en el filtro con previo uso del sedimentador y FTFH .....	79
4.4.3 Eficiencia en el sedimentador con previo uso del floculador tubular de flujo vertical (FTFV).....	83
4.4.4 Eficiencia en el filtro con previo uso del sedimentador y FTFV .....	86
4.5 Comparación de la eficiencia de los sistemas tubulares implementados vs el sistema convencional usado en la PTAP-B. ....	88
4.5.1 Eficiencia del sedimentador experimental con previo uso del FTFH vs eficiencia del decantador con previo uso del floculador de pantallas de la PTAP-B .....	88
4.5.2 Eficiencia del filtro piloto con previo uso del sedimentador y FTFH vs eficiencia del filtro previo uso del decantador y floculador de pantallas de la PTAP-B.....	91
4.5.3 Eficiencia del sedimentador experimental con previo uso del FTFV vs eficiencia del decantador con previo uso del floculador de pantallas de la PTAP-B .....	94
4.5.4 Eficiencia del filtro piloto con previo uso del sedimentador y FTFV vs eficiencia del filtro previo uso del decantador y floculador de pantallas de la PTAP-B.....	96
4.6 Eficiencia de remoción de turbiedad y color del sedimentador y filtro de los sistemas pilotos utilizando sulfato de aluminio y PAC como coagulantes. ....	98
4.6.1 Eficiencia en el sedimentador y filtro con previo uso del FTFH al utilizar los dos coagulantes. ....	98
4.6.2 Eficiencia en el sedimentador y filtro con previo uso del FTFV utilizando los dos coagulantes.....	102
4.7 Análisis estadístico .....	105
4.7.1 Correlación de variables .....	105
4.7.2 Análisis de varianza.....	107

4.8 Discusion final.....	109
<b>CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>113</b>
5.1. Conclusiones .....	113
5.2. Recomendaciones .....	115
<b>CAPITULO VI. REFENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>116</b>
<b>CAPITULO VII. ANEXOS .....</b>	<b>123</b>
Anexo 1. Modelación digital con Scketch Up de los sistemas tubulares pilotos implementados para el tratamiento de agua potable. ....	123
Anexo 2. Determinación del Tr mediante el método de trazadores con NaCl..	125
Anexo 3. Determinación del G (t) y G (r).....	126
Anexo 4. Curva de Dosificación de PAC.....	127
Anexo 5. Muestreo y análisis de parámetros físicos y químicos. ....	128
Anexo 6. Eficiencia de los sistemas tubulares pilotos implementados para el tratamiento de agua potable. ....	129
Anexo 7. Pruebas estadísticas realizadas en el programa RStudio. ....	137
Anexo 8. Histograma y QQplot de Dosis Shapiro Wilk de los sistemas tubulares pilotos implementados para el tratamiento de agua potable.....	138
Anexo 9. Correlación de Spearman de la variables físicas e hidráulicas. ....	140
Anexo 10. Análisis de varianza .....	141
Anexo 11. Prueba de Wilcoxon.....	143



## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Límites máximo-permisibles de los parámetros químicos del agua potable .....	29
<b>Tabla 2.</b> Límites máximo-permisibles de los parámetros físicos del agua potable. ....	29
<b>Tabla 3.</b> Límites máximo-permisibles de los parámetros microbiológicos del agua potable. ....	30
<b>Tabla 4.</b> Número de tratamientos y configuración de los floculadores tubulares pilotos.....	53
<b>Tabla 5.</b> Turbiedades, caudales y los diferentes tratamientos pilotos.....	53
<b>Tabla 6.</b> Descripción de los coeficientes de correlación .....	56
<b>Tabla 7.</b> Tiempo de retención teórico en función de los caudales, diámetros y longitudes de tubería que tiene cada sistema tubular. ....	58
<b>Tabla 8.</b> Tiempo de retención real obtenidos por la técnica de trazadores.....	59
<b>Tabla 9.</b> Valores de tiempo de retención teórico y real de los sistemas tubulares pilotos.....	60
<b>Tabla 10.</b> Valores de tiempo de retención para floculadores hidráulicos convencionales según varios autores. ....	61
<b>Tabla 11.</b> Gradiente de velocidad teórico y real de los dos sistemas tubulares pilotos (FTFH y FTFV).....	63
<b>Tabla 12.</b> Valores de gradiente de velocidad para floculadores hidráulicos de pantallas según varios autores.....	65
<b>Tabla 13.</b> Estadística descriptiva de la turbiedad y color en el sedimentador con previo uso del floculador tubular en función de los diferentes caudales y diámetros .....	67
<b>Tabla 14.</b> Estadística descriptiva de la turbiedad y color en el filtro con previo uso del sedimentador que tiene un sistema de FTFH en función de los diferentes caudales y diámetros. ....	70
<b>Tabla 15.</b> Estadística descriptiva de la turbiedad y color del sedimentador con previo uso del FTFV en función de los diferentes caudales y diámetros. ....	72
<b>Tabla 16.</b> Estadística descriptiva de la turbiedad y color del filtro del sistema experimental en función de los diferentes caudales.....	74
<b>Tabla 17.</b> Estadística descriptiva de la turbiedad y color del sedimentador con previo uso del FTFH en función de los diferentes caudales y diámetros. ....	77
<b>Tabla 18.</b> Estadística descriptiva de la turbiedad y color del filtro con previo uso del sedimentador que tienen un sistema de FTFH en función de los diferentes caudales y diámetros.....	80
<b>Tabla 19.</b> Estadística descriptiva de la turbiedad y color del sedimentador con previo uso del FTFV en función de los diferentes caudales y diámetros. ....	83
<b>Tabla 21.</b> Estadística descriptiva de la turbiedad y color aplicada al sedimentador con previo uso del floculador.....	89

<b>Tabla 22.</b> Estadística descriptiva de la eficiencia de remoción de turbiedad y color obtenida en el filtro del sistema piloto y de la planta convencional. ....	92
<b>Tabla 23.</b> Estadística descriptiva de la turbiedad y color aplicada al sedimentador con previo uso del FTFV y a la planta convencional .....	94
<b>Tabla 24.</b> Estadística descriptiva de la turbiedad y color aplicada al filtro con previo uso del sedimentador del sistema con FTFV y a la planta convencional .....	96
<b>Tabla 25.</b> Media de la eficiencia de remoción de turbiedad y color del sedimentador y filtro de los sistemas pilotos utilizando sulfato de aluminio y PAC como coagulantes para diferentes caudales en C2. ....	99
<b>Tabla 26.</b> Media de eficiencia de remoción de la turbiedad y color del sedimentador y filtro de los sistemas pilotos de flujo vertical utilizando sulfato de aluminio y PAC como coagulantes para diferentes caudales. ....	102
<b>Tabla 27.</b> Matriz de correlación de Spearman para el sistema FTFH piloto .....	106
<b>Tabla 28.</b> Matriz de correlación de Spearman para el sistema FTFV piloto .....	106
<b>Tabla 27.</b> Análisis de varianza ANNOVA a la salida del sedimentador .....	107
<b>Tabla 29.</b> Gradiente teórico y gradiente real de los sistemas tubulares pilotos implementados para el tratamiento de agua potable .....	126
<b>Tabla 30.</b> Eficiencia del sedimentador con previo uso del FTFH .....	129
<b>Tabla 31.</b> Eficiencia del filtro con previo uso del sedimentador con el sistema del FTFH piloto .....	131
<b>Tabla 32.</b> Eficiencia del sedimentador con previo uso del FTFV .....	133
<b>Tabla 33.</b> Eficiencia del filtro con previo uso del sedimentador con el sistema del FTFV piloto.....	135

## Índice de ecuaciones

<b>Ecuación 1.</b> Tiempo de retención teórico .....	48
<b>Ecuación 2.</b> Volumen de la unidad.....	48
<b>Ecuación 3.</b> Cantidad de trazador a añadir .....	49
<b>Ecuación 4.</b> Constante de corrección .....	49
<b>Ecuación 5.</b> Gradiente Hidráulico.....	49
<b>Ecuación 6.</b> Pérdida de carga por presión .....	50
<b>Ecuación 7.</b> Coeficiente de rozamiento.....	50
<b>Ecuación 8.</b> Número de Reynolds.....	51
<b>Ecuación 9.</b> Constante de carga .....	51
<b>Ecuación 10.</b> Pérdida de carga por accesorios.....	51
<b>Ecuación 11.</b> Dosis óptima de coagulante PAC .....	52
<b>Ecuación 12.</b> Cálculo de la eficiencia para la remoción de turbidez .....	54
<b>Ecuación 13.</b> Cálculo de la eficiencia para la remoción de color .....	55

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> Distribución de tamaño de las partículas en el agua.....	25
<b>Figura 2.</b> Esquema de un modelo de enlace de puente para la desestabilización de coloides por polímeros.....	32
<b>Figura 3.</b> Floculador Hidráulico Horizontal.....	37
<b>Figura 4.</b> Floculador Hidráulico Vertical.....	37
<b>Figura 5.</b> Floculador Mecánico de paletas de eje horizontal.....	38
<b>Figura 6.</b> Planta de Tratamiento de Agua Potable Bayas (PTAP-B).....	44
<b>Figura 7.</b> Floculador tubular de flujo horizontal (FTFH) piloto.....	45
<b>Figura 8.</b> Floculador tubular de flujo vertical (FTFV) piloto.....	47
<b>Figura 9.</b> Tiempos de retención teóricos y real del FTFH y FTFV.....	62
<b>Figura 10.</b> Variación del gradiente de velocidad teórico y real del FTFH y FTFV en función del caudal.....	64
<b>Figura 11.</b> Curva de dosificación de PAC para la comparación entre la curva utilizada por la empresa EMAPAL y la que se utilizó en los sistemas tubulares pilotos.....	65
<b>Figura 12.</b> Diagrama de cajas de la turbiedad y color del sedimentador con previo uso del floculador vs los diferentes caudales para el sistema experimental y para la PTAP-B.....	69
<b>Figura 13.</b> Diagrama de cajas de turbiedad y color del filtro del sistema experimental vs la planta de tratamiento de Bayas para diferentes caudales.....	71
<b>Figura 14.</b> Diagrama de cajas de la turbiedad y color del sedimentador con previo uso del FTFV vs los diferentes caudales.....	73
<b>Figura 15.</b> Diagrama de cajas de la turbiedad y color del filtro con previo uso del sedimentador vs los diferentes caudales.....	75
<b>Figura 16.</b> Diagrama de cajas de la eficiencia de turbiedad y color del sedimentador con previo uso del floculador vs los diferentes caudales para el sistema experimental y la PTAP-B.....	77
<b>Figura 17.</b> Diagrama de barras que representan las medias de la eficiencia de turbiedad y color del sedimentador con previo uso del FTFH vs los diferentes caudales.....	79
<b>Figura 18.</b> Diagrama de cajas de la eficiencia de turbiedad y color del filtro con previo uso del sedimentador vs los diferentes caudales.....	80
<b>Figura 19.</b> Diagrama de barras que representan las medias de la eficiencia de turbiedad y color del filtro con previo uso del sedimentador vs los diferentes caudales.....	82
<b>Figura 20.</b> Diagrama de cajas de la eficiencia de turbiedad y color del sedimentador con previo uso del FTFV vs los diferentes caudales.....	84
<b>Figura 21.</b> Diagrama de barras que representan las medias de la eficiencia de turbiedad y color del sedimentador con previo uso del FTFV vs los diferentes caudales.....	85
<b>Figura 22.</b> Diagrama de cajas de la eficiencia de turbiedad y color del filtro con previo uso del sedimentador vs los diferentes caudales.....	87

<b>Figura 23.</b> Diagrama de barras que representan las medias de la eficiencia de turbiedad y color del filtro con previo uso del sedimentador vs los diferentes caudales.....	88
<b>Figura 24.</b> Diagrama de cajas de eficiencia de turbiedad y color del sedimentador con previo uso del FTFH vs el sistema convencional PTAP-B. ....	89
<b>Figura 25.</b> Diagrama de barras que representa las medias de la eficiencia de turbiedad y color del sedimentador con previo uso del FTFH vs el sistema convencional PTAP-B. ....	91
<b>Figura 26.</b> Diagrama de cajas de eficiencia de turbiedad y color obtenida en el piloto y el filtro de la planta convencional PTAP-B. ....	92
<b>Figura 27.</b> Diagrama de barras que representa las medias de la eficiencia de turbiedad y color obtenidas en el filtro piloto y filtro de la planta convencional PTAP-B.....	93
<b>Figura 28.</b> Diagrama de cajas de eficiencia de turbiedad y color del sedimentador con previo uso del FTFV vs el sistema convencional PTAP-B.....	94
<b>Figura 29.</b> Diagrama de barras que representa las medias de la eficiencia de turbiedad y color del sedimentador con previo uso del FTFV vs el sistema convencional PTAP-B. ....	95
<b>Figura 30.</b> Diagrama de cajas de eficiencia de turbiedad y color del filtro con previo uso del sedimentador vs el sistema convencional PTAP-B. ....	97
<b>Figura 31.</b> Diagrama de barras que representa las medias de la eficiencia de turbiedad y color del filtro con previo uso del sedimentador vs el sistema convencional PTAP-B. ....	98
<b>Figura 32.</b> Diagrama de barras de turbiedad y color en el sedimentador para la configuración de 110 mm con pruebas realizadas en el FTFH con sulfato de aluminio y con PAC como coagulantes. ....	100
<b>Figura 33.</b> Diagrama de barras de turbiedad y color en el filtro para la configuración de 110mm con pruebas realizadas en el FTFH con sulfato de aluminio y con PAC como coagulantes. ....	101
<b>Figura 34.</b> Diagrama de barras de turbiedad y color en el sedimentador para la configuración de 110mm con pruebas realizadas en el FTFV con sulfato de aluminio y con PAC como coagulantes. ....	103
<b>Figura 35.</b> Diagrama de barras de turbiedad y color en el filtro para la configuración de 110mm con pruebas realizadas en el FTFV con sulfato de aluminio y con PAC como coagulantes. ....	104
<b>Figura 36.</b> Sistema Floculador Tubular de Flujo Horizontal.....	123
<b>Figura 37.</b> Sistema Floculador Tubular de Flujo Vertical.....	124
<b>Figura 38.</b> Muestreo de Conductividad.....	125
<b>Figura 39.</b> Curva de dosificación de PAC.....	127
<b>Figura 40.</b> Punto de muestreo para el agua cruda .....	128
<b>Figura 41.</b> Punto de muestreo a la salida del sedimentador .....	128
<b>Figura 42.</b> Punto de muestreo a la salida del filtro .....	128
<b>Figura 43.</b> Análisis físico y químico .....	128
<b>Figura 44.</b> Prueba de normalidad de Shapiro Wilk para los datos de turbiedad y dosis .....	137

<b>Figura 45.</b> Correlación Spearman para los datos de turbiedad y dosis en los FTFH y FTFV .....	137
<b>Figura 46.</b> Histograma y QQ Plot de la dosis del FTFH, prueba de Shapiro Wilk. ....	138
<b>Figura 47.</b> Histograma y QQ Plot de la turbiedad del FTFH, prueba de Shapiro Wilk. ....	138
<b>Figura 48.</b> Histograma y QQ Plot de la dosis del FTFV, prueba de Shapiro Wilk.	139
<b>Figura 49.</b> Histograma y QQ Plot de la turbiedad del FTFV, prueba de Shapiro Wilk. ....	139
<b>Figura 50.</b> Matriz de correlación de Spearman de las variables que intervienen en el FTFH .....	140
<b>Figura 51.</b> Matriz de correlación de Spearman de las variables que intervienen en el FTFV .....	140
<b>Figura 52.</b> ANNOVA para la turbiedad a) y color b) a la salida del sedimentador .....	141
<b>Figura 53.</b> ANNOVA para turbiedad a) y color b) a la salida del filtro.....	142
<b>Figura 54.</b> Prueba de Wilcoxon a la salida del sedimentador con previo uso del FTFH y usando como coagulantes PAC y sulfato de aluminio.....	143
<b>Figura 55.</b> Prueba de Wilcoxon a la salida del filtro con previo uso del sedimentador y usando como coagulantes PAC y sulfato de aluminio.....	143
<b>Figura 56.</b> Prueba de Wilcoxon a la salida del sedimentador con previo uso del FTFV y usando como coagulantes PAC y sulfato de aluminio.....	143
<b>Figura 57.</b> Prueba de Wilcoxon a la salida del filtro con previo uso del sedimentador y usando como coagulantes PAC y sulfato de aluminio.....	143

## CLÁUSULAS

### Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Jorge Sebastián Bustamante Peralta en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Desempeño de floculadores tubulares usando policloruro de aluminio como coagulante en la potabilización del agua", 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, 21 de octubre de 2022



Jorge Sebastián Bustamante Peralta

C.I: 0301967683

## Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Jorge Sebastián Bustamante Peralta autor del trabajo de titulación "Desempeño de floculadores tubulares usando policloruro de aluminio como coagulante en la potabilización del agua", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 21 de octubre de 2022



Jorge Sebastián Bustamante Peralta

C.I: 0301967683

## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Natasha Estefanía Gómez García en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Desempeño de floculadores tubulares usando policloruro de aluminio como coagulante en la potabilización del agua", 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, 21 de octubre de 2022



Natasha Estefanía Gómez García

C.I: 0107190381



## Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Natasha Estefanía Gómez García autora del trabajo de titulación “Desempeño de floculadores tubulares usando policloruro de aluminio como coagulante en la potabilización del agua”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 21 de octubre de 2022



---

Natasha Estefanía Gómez García

C.I: 0107190381

## **DEDICATORIA**

### **Jorge Sebastián Bustamante Peralta**

El presente trabajo de titulación va dedicado de manera especial a mi madre Filita, que siempre confió en mí y nunca me abandonó, también se la dedico a mi hermano Víctor y abuelita Mercedes, quienes me brindaron su apoyo incondicional en todo momento y por llenar mi vida con sus valiosos consejos.

### **Natasha Estefanía Gómez García**

Dedico con todo mi corazón esta tesis a mis padres, hermanos y abuelitos; quienes me han apoyado en cada uno de mis pasos enseñándome que cada esfuerzo valió, vale y valdrá la pena. Ellos son las personas que más amo y que gracias a sus consejos me han ayudado a forjar la persona que soy hoy en día, por ello este trabajo de titulación se los dedico a ustedes.

## **AGRADECIMIENTO**

### **Jorge Sebastián Bustamante Peralta**

Agradezco de manera especial a mi madre, por su fe, su generosidad y su apoyo en todos estos años de estudios, gracias a ella he llegado a culminar un peldaño más en mi vida. A mi familia por brindarme su apoyo incondicional. A los docentes de la carrera de Ingeniería Ambiental y de manera especial al Ing. Fernando García que aparte de brindarme sus conocimientos para el presente trabajo de titulación, quien con su humildad y profesionalismo me ha impulsado a ser un mejor ser humano.

### **Natasha Estefanía Gómez García**

Agradezco a la Virgen de la Nube y a Dios por la sabiduría e inteligencia a lo largo de mi carrera. A mis padres por luchar día a día y el apoyo brindado en mis estudios desde la niñez permitiéndome llegar hasta esta etapa académica. A los docentes de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad de Cuenca, por las enseñanzas compartidas día a día, y de manera especial al Ing. Fernando García, quien gracias a sus conocimientos pude concluir y llevar con éxito esta tesis. Gracias a mis amigos Erika, Elizabeth, Luis y David, quienes supieron escucharme y estuvieron presentes en mis momentos buenos y malos de mi vida.

## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

El agua a nivel global es reconocida por el ser humano como un líquido vital, esencial para la vida. En el marco del derecho humano al agua, del derecho humano al saneamiento y de los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) es un verdadero reto garantizar agua limpia y saneamiento para la región de América Latina y el Caribe (Lourdes, 2019).

“Garantizar un agua que cumpla con los estándares de calidad y un correcto saneamiento para todas las personas” es lo que expone el objetivo 6 de los ODS establecidos para el año 2030 (Naciones Unidas, 2018). Cumplir este objetivo es fundamental para mantener la dignidad de los seres humanos, lastimosamente esto no se cumple en los países en vías de desarrollo debido a que, en los sectores rurales, la carga poblacional se encuentra distribuida en áreas mucho más amplias y cuentan con menor población en comparación con las áreas urbanas, por lo que es difícil llegar a estos lugares con obra civil y no es económicamente rentable.

Desde el principio del siglo 21, miles de millones de personas alrededor del mundo se han beneficiado del Objetivo 6 de la agenda 2030, pero aún existen 2.100 millones de personas que carecen de agua potable y de fácil disposición en el hogar. Esto demuestra que aún existe grandes desigualdades entre los países y dentro de ellos (WWDR, 2019).

Muy pocas son las comunidades rurales que disponen de agua potable, las cuales son administradas por Juntas administradoras de agua potable (JAAP), estas instalaciones tratan el agua cruda de forma convencional, es decir, cuentan con el proceso de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección. Este tratamiento es suficiente para remover las impurezas y los microorganismos patógenos que pueden provocar un deterioro a la salud. Las comunidades rurales que extraen el agua de pozos o quebradas son vulnerables a enfermedades provocadas por: bacterias, virus y protozoarios.

## **1.2 Problemática**

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) existen a nivel mundial 844 millones de personas que carecen de un servicio básico de suministro de agua potable, quienes consumen aguas captadas directamente de ríos sin tratar (OMS, 2019).

El problema de la falta de servicio de agua potable en las zonas rurales se debe a que algunas comunidades no cuentan con un sistema de agua potable que abastezca en toda su magnitud. Las JAAPs en su mayoría no disponen de un eficiente tratamiento, debido a la falta de infraestructura adecuada y a la poca o nula capacidad de operación, falta de conocimiento sobre las operaciones básicas y mantenimiento de las plantas potabilizadoras, así como a la falta de recursos económicos para la adquisición de tecnología que permitan potabilizar adecuadamente el agua.

Cada vez resulta más difícil conseguir un proceso eficiente de clarificación, pues al provenir el agua cruda de fuentes superficiales como ríos y lagos, esta transporta una serie de partículas suspendidas y disueltas, así como materia orgánica y organismos biológicos. Como resultado de la presencia de esta materia, la calidad de agua se ve deteriorada porque además de tener color y turbidez, contienen microorganismos que resultan perjudiciales para la salud. Son indispensables los procesos que permiten separar las partículas suspendidas y disueltas del agua para el consumo humano. Los procesos de coagulación y floculación son las etapas fundamentales y necesarias para el funcionamiento óptimo en el tratamiento del agua (Srinivas & Vuppala, 2017).

## **1.3 Justificación**

La demanda del recurso agua ha ido incrementando en un 1% anual a nivel mundial desde la década de los 80s, principalmente se debe a la creciente demanda de los países en vías de desarrollo y a las economías emergentes. El acceso al agua es un derecho imprescindible porque cubre y satisface las necesidades básicas como salud, alimentación e higiene, sin embargo aún existen deficiencias a nivel mundial

en la calidad, tratamiento y distribución del agua, así como también en la organización y planificación para su administración responsable (Vásquez et al., 2011).

Considerando que la coagulación-floculación es una etapa inicial y primordial del proceso de potabilización, se debe investigar sobre tecnologías alternativas, tales como los floculadores tubulares, los cuales son una tecnología accesible para poblaciones de escasos recursos o que son administradas por las JAAPs. Adicionalmente, se debería optimizar la cantidad de coagulante que se aplica en la coagulación, lo cual ocasionaría beneficios económicos a las instituciones encargadas de suministrar de agua potable a la población.

Este tipo de tecnologías reduce el espacio físico y los costos de inversión en materia prima, permite remplazar el concreto por un material más liviano para que pueda ser traslado a lugares de difícil acceso sin provocar un impacto ambiental.

Por lo antes mencionado, es necesario realizar una investigación sobre nuevas tecnologías eficientes de potabilización, que sean de bajo costo para la sustitución del concreto de plantas convencionales por materiales como tuberías de PVC con la finalidad de que puedan ser fácilmente implementadas en comunidades en desarrollo.

Por ello, el presente proyecto evaluó la factibilidad de potabilizar el agua usando floculadores no convencionales contruidos con tubos de PVC y aplicando coagulantes diferentes al sulfato de aluminio como lo es el Policloruro de Aluminio (PAC), garantizando la producción de agua potable que cumpla con los requisitos de calidad. La floculación tubular en un futuro podría ser una tecnología alternativa en la provisión de agua potable, la cual beneficiaría a las comunidades en desarrollo ya que reducirá los costos de inversión y la reducción de espacio físico.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

Evaluar el desempeño de dos floculadores tubulares hidráulicos utilizando Policloruro de Aluminio como coagulante para la potabilización del agua y compararlos con el sistema de tratamiento convencional.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Determinar la remoción de turbidez y color aplicando Policloruro de Aluminio en dos sistemas de potabilización piloto que tiene un floculador tubular de flujo horizontal (FTFH) y un floculador tubular de flujo vertical (FTFV).
- Seleccionar entre los dos sistemas pilotos (FTFV y FTFH) cual es el que presenta un mejor rendimiento
- Evaluar en campo la eficiencia de los sistemas tubulares implementados vs sistema convencional usado en una Planta de tratamiento convencional.
- Comparar la eficiencia de los sistemas tubulares implementados utilizando como coagulante Policloruro de Aluminio con los resultados obtenidos en un estudio previo realizado con Sulfato de Aluminio.

## CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Agua Potable

La Organización Mundial de la Salud (OMS) define el agua potable como aquella “agua que es adecuada para todos los usos domésticos habituales, incluida la higiene personal” y que no ocasiona ningún tipo de riesgo para la salud cuando se consume (OMS, 2006). Es decir, es el agua utilizada para preparar, cocinar los alimentos, beber y entre otros usos domésticos, independientemente del origen, tiene características químicas, físicas y microbiológicas que garantizan su aceptabilidad e inocuidad para el consumo humano (INEN 1108, 2020). Además, este tipo de agua es libre de microorganismos pues la presencia de parásitos, bacterias y virus en el agua son las principales causantes de diversas enfermedades (Ríos, Agudelo, & Gutiérrez, 2017).

### 2.2 Parámetros físicos, químicos y microbiológicos del agua potable

#### 2.2.1 Parámetros físicos

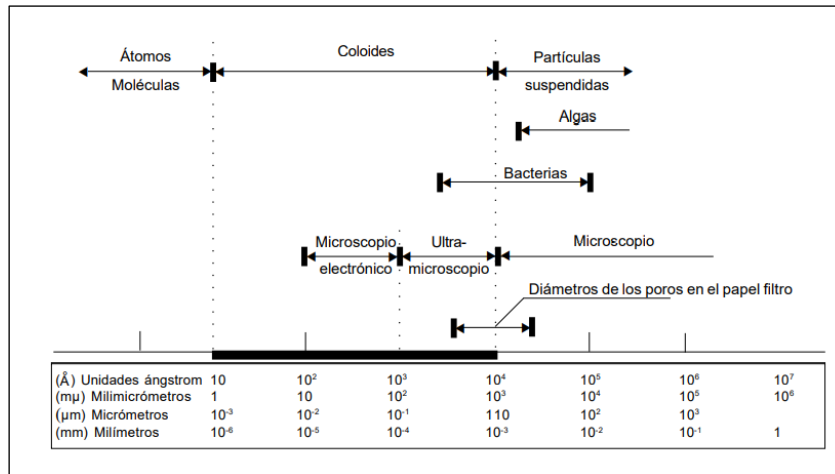
##### 2.2.1.1 Turbiedad

Es una propiedad óptica que tiene una sustancia líquida o sólida de dispersar la luz que pasa por ella en todas las direcciones (Arboleda, 2000). La turbiedad es causada por partículas, tales como (materia orgánica, bacterias, limo, arcilla, tierra) que por su tamaño se encuentran suspendidas, reduciendo la transparencia del agua en mayor o menor nivel. La turbiedad se mide en Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU), es decir, que las observaciones de este método son comparadas con una solución base de referencia (Spellman & Drinan, 2004).

En la figura 1 se puede observar que las partículas que provocan turbiedad pueden ser clasificadas de acuerdo al tamaño que presentan, primero se encuentran las partículas disueltas menores a un nanómetro que no afectan directamente en la turbiedad pero si definen su color y olor, segundo están las partículas coloidales de 1 a 1.000 nanómetro que son las causantes de la turbiedad neta del agua y



finalmente están las partículas suspendidas mayores a 1.000 nanómetro que precipitan al momento de reposar el agua (sedimentación) (CEPIS/OPS, 2004).



**Figura 1.** Distribución de tamaño de las partículas en el agua

**Fuente:** CEPIS/OPS (2004)

### 2.1.1.2 Color

Es originada por la presencia de materia orgánica (fúlvicos y ácidos húmicos) que están asociados a la materia en descomposición del suelo. La metodología que se usa para medir el color es por comparación de las muestras de agua con soluciones estándar (agua destilada). Una Unidad de Color (UC) es equivalente al color producido por 1 mg/L de solución de platino; entre 10 y 15 UC no se detecta visualmente un cambio significativo y a 100 UC el agua tiene apariencia de té (Spellman & Drinan, 2004).

El color del agua se clasifica como color verdadero y color aparente; el primero es el color que tiene el fluido después de ser removido la materia orgánica en suspensión y el segundo es el color que aporta la materia suspendida (Spellman & Drinan, 2004).

### **2.1.1.3 Temperatura**

La temperatura es una de las propiedades más importantes, debido a que provoca efectos en las reacciones químicas y biológicas que se desarrollan en el agua. Una temperatura alta potencia la proliferación de microorganismos y aumenta los problemas de sabor, olor, color y corrosión (OMS, 2006).

### **2.1.1.4 Conductividad eléctrica**

Es aquella que mide la capacidad que tiene un líquido para conducir una carga eléctrica y su capacidad depende de las concentraciones de la fuerza iónica, iones disueltos y de la temperatura del agua (Rusydi, 2018). El instrumento que mide la resistencia que ofrece el agua entre dos electrodos platinizados es estandarizado con valores conocidos de conductancia observados con una solución de cloruro de potasio es el conductímetro (Patil, 2020), la unidad de medida utilizada es el Siemens/cm (S/cm) (Inf. Agro, 2018).

## **2.1.2 Parámetros químicos**

### **2.1.2.1 pH**

Se define como el valor negativo del logaritmo decimal de la concentración de ion hidrógeno (Spellman & Drinan, 2004) e indica la naturaleza del líquido ya sea básica o ácida en una escala del 0 al 14, en donde 7 es un pH neutro, que es lo que recomienda los límites permisibles para el agua de consumo humano (Rodier et al., 2010).

### **2.1.2.2 Alcalinidad**

Es la propiedad que tiene el agua para absorber iones hidrógeno sin cambiar significativamente el pH, es decir, tiene la capacidad para neutralizar ácidos. La alcalinidad presente en las aguas naturales suelen estar en forma de bicarbonatos y carbonatos, las unidades de medida que presenta son miligramos de  $\text{CaCO}_3$  por litro (CINARA, 1991).

### **2.1.2.3 Dureza**

Es la suma de los cationes polivalente disueltos en agua expresados como la cantidad equivalente de carbonato de calcio, los cationes más representativos son

el calcio, el magnesio, y en menor frecuencia el estroncio, hierro y manganeso. La dureza está en función de la geología del lugar que proviene el agua superficial, por lo cual puede tener un rango muy amplio de valores de  $\text{CaCO}_3$  (Spellman & Drinan, 2004).

#### **2.1.2.4 Sulfatos**

Contiene 4 iones de oxígeno y uno de azufre ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), generalmente se encuentran pequeñas concentraciones en efluentes, provienen de la meteorización de la roca que contiene sulfato de hierro. Los sulfatos cálcicos y de magnesio contribuyen a la dureza permanente del agua y en excesivas concentraciones pueden provocar un sabor desagradable del agua. A concentraciones mayores de 300 mg/L puede provocar trastornos gastrointestinales en niños (Bolaños-Alfaro et al., 2017).

#### **2.1.2.5 Nitritos y Nitratos**

Son compuestos solubles, formados por nitrógeno y oxígeno, los nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) provienen de la transformación de los nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) que se encuentran en condiciones de baja oxigenación. El nitrato es un elemento que limita el crecimiento de las plantas, por tal motivo la excesiva concentración de nitratos en los efluentes se debe al uso de fertilizantes. Estos compuestos nitrogenados tienen dos tipos de fuentes: La puntal se atribuye a actividades industriales, ganaderas o urbanas y la fuente difusa que se debe a las actividades agronómicas (Bolaños-Alfaro et al., 2017).

#### **2.1.2.6 Cloruros**

Es un compuesto aniónico ( $\text{Cl}^-$ ) derivado del ácido clorhídrico. Las altas concentraciones de este anión confieren al agua un sabor salado, el umbral gustativo para compuestos como cloruro sódico, cálcico y potásico está entre 200 a 300 mg/L. A partir de ciertas concentraciones de cloruro y pH bajos produce una acción corrosiva en las tuberías y algunos componentes del cemento (OMS, 2006).

## **2.1.3 Parámetros biológicos**

### **2.1.3.1 Coliformes Totales**

Son un grupo de bacterias de la familia Enterobacteriaceae que se encuentran dispersados por los compartimentos ambientales agua y suelo; además, se encuentran en el tracto intestinal de los mamíferos de sangre caliente. La técnica de análisis más conocida es la de tubos múltiples y filtración por membrana (García & Iannacone, 2014).

### **2.1.3.2 Coliformes Fecales**

Son también llamados coliformes Termotolerantes y son un grupo de bacterias Gram negativas, aerobios o anaerobios facultativos que se caracterizan por fermentar la lactosa a una temperatura de 45 °C. A este grupo pertenece el género Escherichia y la especie Klebsiella que habitan en el tracto digestivo de los mamíferos de sangre caliente y su detección en las aguas superficiales indica contaminación fecal (Baque-Mite et al., 2016).

### **2.1.3.3 Escherichia Coli**

Es un bacilo corto Gram Negativo capaz de fermentar lactosa a altas temperaturas, se encuentra en un número elevado en las heces de humanos y animales, la presencia de este organismo en las aguas superficiales indica contaminación fecal. Las cepas de E. coli que más están ligadas a enfermedades por el consumo de agua son: E. coli Enterotoxigénica (ETEC), E. coli Enteropatógena (EPEC), E. coli Enterohemorrágica (EHEC), E. coli Enteroinvasiva (EIEC) (García & Iannacone, 2014).

## 2.2 Normativa

**Tabla 1.** Límites máximo-permisibles de los parámetros químicos del agua potable

<b>Características químicas del agua potable</b>		
<b>PARÁMETRO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>LÍMITE MÁXIMO PERMITIDO</b>
Antimonio	mg/l	0.02
Arsénico	mg/l	0.01
Bario	mg/l	0.7
Boro	mg/l	2.4
Cadmio	mg/l	0.003
Cianuros	mg/l	0.07
Cloro Libre Residual	mg/l	0.3 a 1.5
Cobre	mg/l	2.0
Cromo	mg/l	0.05
Fluoruros	mg/l	1.5
Mercurio	mg/l	0.006
Níquel	mg/l	0.07
Nitratos	mg/l	50
Nitritos	mg/l	3.0
Plomo	mg/l	0.01
Selenio	mg/l	0.04

Fuente: INEN (2020)

**Tabla 2.** Límites máximo-permisibles de los parámetros físicos del agua potable.

<b>Características físicas del agua potable</b>		
<b>PARÁMETRO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>LÍMITE MÁXIMO PERMITIDO</b>
Turbiedad	Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU)	5
Color	Unidades de color aparente (Pt - Co)	15
Olor	...	No Objetable
Sabor	...	No Objetable

Fuente: INEN (2020)

**Tabla 3.** Límites máximo-permisibles de los parámetros microbiológicos del agua potable.

<b>Características de parámetro microbiológicos</b>		
<b>PARÁMETRO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>LÍMITE MÁXIMO PERMITIDO</b>
Coliformes fecales	Número / 100 mL	Ausencia
Cryptosporidium	Número de ooquistes/L	Ausencia
Giardia	Número de quistes/L	Ausencia

<sup>a</sup> En el caso de que sean usados métodos de ensayo alternativos a los señalados, estos deben ser normalizados. En el caso de no ser un método normalizado, este debe ser validado.  
<sup>b</sup> La ausencia corresponde a “< 1,1 NMP/100 mL”.  
<sup>c</sup> La ausencia corresponde a “< 1 UFC/100 mL”.

**Fuente:** INEN (2020)

## 2.3 Tratamiento de agua potable

### 2.3.1 Mezcla rápida

Es aquella que se efectúa a una velocidad flash y cuyo objetivo es disgregar los químicos de manera uniforme en el agua para permitir una mejor remoción de turbidez y facilitar a la coagulación (Ramírez & Jaramillo, 2016).

Du et al. (2020) mencionan que tanto el tiempo como la velocidad de la mezcla rápida afecta al resultado, es decir, cuanto mayor es el gradiente de velocidad ocurrirá en menos tiempo, por tanto, más rápido será la velocidad para la aglomeración de partículas. Según Domínguez et al. (2008), para una coagulación por barrido se requiere tiempos entre 1-7 s con gradientes entre 400 y 800 s<sup>-1</sup>, mientras que para la coagulación por adsorción-neutralización se requiere 1 s. En tanto, para la mezcla rápida es necesario gradientes de 1000 y 3000 s<sup>-1</sup> (Arboleda, 2000).

### 2.3.2 Teoría de la coagulación

Comienza en el instante en que se añade los coagulantes al agua y dura solo fracciones de segundos, es básicamente la desestabilización de las partículas coloidales a partir de una serie de reacciones entre los coagulantes, la alcalinidad del agua y la superficie de la partícula (Loaiza, 1987) contribuyendo a la agregación de partículas para formar microfloculos (Ramírez & Jaramillo, 2016).

## **2.3.2.1 Coloides**

Son sólidos finamente divididos que no sedimentan pero que se pueden removerse del agua a través de la coagulación y filtración (Romero, 2004). Su tamaño varía entre 1 a  $10^3$  nm (Moreno, 2021). Para el tratamiento de agua existen dos términos para distinguir los tipos de sistemas coloidales. Los coloides hidrofílicos que son aquellos que reaccionan con el agua originando color como la materia orgánica y los coloides hidrofóbicos que no reaccionan con el agua como las arcillas y óxidos metálicos que son muy importantes en el tratamiento del agua (Aguilar, 2002).

## **2.3.2.2 Carga eléctrica de los coloides**

Es importante conocer que los coloides tienen carga, debido a que contribuyen a la estabilización de la suspensión coloidal, el signo de la carga es usualmente negativo (CEPIS/OPS, 2004).

## **2.3.2.3 Mecanismo de coagulación**

### **a. Comprensión de capa difusa**

La desestabilización de un coloide es realizada por contraiones (electrolito) y al aumentar estos su carga, la eficacia del proceso de coagulación aumenta, es decir, al introducir concentraciones elevadas del electrolito en el sistema coloidal causa un incremento de contraiones en la capa difusa que rodea las partículas coloidales. Por tanto, la capa difusa para mantenerse eléctricamente neutra tiende a reducir su espesor y la interacción repulsiva entre las partículas coloidales similares (Aguilar, 2002).

### **b. Adsorción y neutralización de la carga**

El coagulante posee una capacidad para desestabilizar una dispersión coloidal a través de interacciones coagulante-coloide, coagulante-disolvente y coloide-disolvente (Aguilar, 2002). La adsorción y neutralización de la carga están relacionadas al de comprensión de la doble capa.

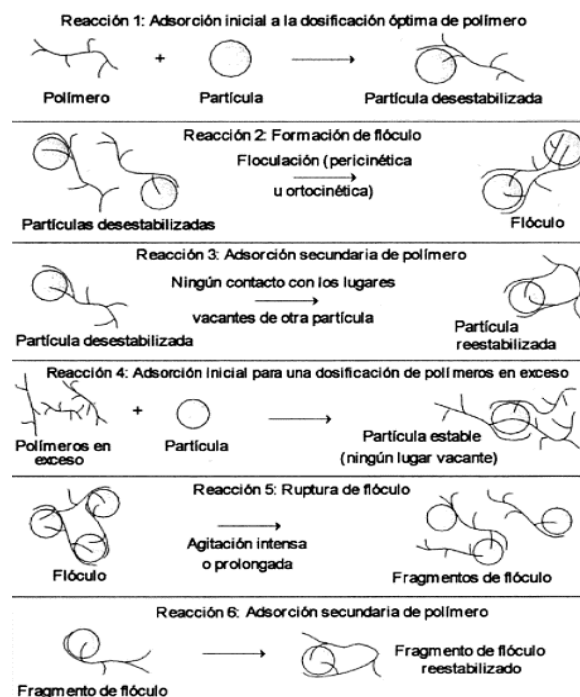
La desestabilización por neutralización de la carga superficial comprende disminuir la carga neta superficial de las partículas en suspensión, es decir, a medida que la carga neta disminuye el espesor de la capa difusa se comprime y la energía que se

requiere para remover las partículas en contacto se minimiza (American Water Works Association, 2002).

### c. Adsorción y formación de un puente químico

Consiste en la adición de polímeros de elevado peso molecular y que contenga grupos químicos para que puedan interaccionar con los lugares de la superficie de las partículas coloidales para desestabilizar las dispersiones coloidales (Aguilar, 2002).

El polímero de alto peso molecular es adsorbido químicamente en las partículas coloidales dejando el resto de la molécula libre de tal manera que pueda flotar en la solución y adherirse a su vez a otro coloide, formándose así un puente molecular que une una partícula con otra, la repetición de este fenómeno permite la aglutinación en masas denominadas floc (figura 2) (Arboleda, 2000).



**Figura 2.** Esquema de un modelo de enlace de puente para la desestabilización de coloides por polímeros

**Fuente:** Aguilar (2002)



## **d. Coagulación por barrido**

Denominada también coagulación por incorporación, esta se produce cuando se adiciona una alta concentración de coagulante, por tanto, se excede el límite de solubilidad de ese compuesto en el agua, en ese instante se precipitan los hidróxidos que se forman por la reacción del agua misma con los coagulantes y de la reacción de la alcalinidad, originándose una masas esponjosa denominada floc de barrido atrapando en su caída a las partículas suspendidas que se ven forzadas a decantar y a los coloides (Arboleda, 2000).

### **2.3.2.4 Factores que influyen al proceso de coagulación**

#### **a. Concentración de coagulante**

Generalmente se usan concentraciones líquidas entre 1-2% (Barreto, 2015).

#### **b. Temperatura**

Este factor se ve influido en el tiempo requerido para que se dé una buena formación de flóculos, es decir, mientras más baja sea la temperatura durará más tiempo en formarse los flóculos, pero este factor puede minimizarse aumentando la dosis de coagulante o aumentando la concentración de la materia en suspensión (Aguilar, 2002).

#### **c. Tipo y Dosis óptima de coagulante**

El tipo y dosis de coagulante debe ser tal que produzca la desestabilización de los coloides; por tanto, cuando se elija el tipo de coagulante se debe recurrir a una comparación experimental, tomando en cuenta el tipo de agua a tratar (Aguilar, 2002). Además, que se debe tener presente que a dosis muy bajas de coagulante no se da la desestabilización ya que la carga de las partículas de la suspensión coloidal cambia originando una estabilización de la dispersión, de igual manera sucede cuando hay una sobredosis de coagulante, pues produce una cantidad elevada de hidróxidos (Barreto, 2015), llevando a provocar un incremento en la cantidad del lodo formado y ocasionando una reducción en los niveles de pH, por lo que se debe añadir productos alcalinos que permitan mantener el pH para que pueda darse una coagulación efectiva (Matilainen, Lindqvist, & Tuhkanen, 2010).

## **d. pH**

Es el factor más importante que se debe de tener en cuenta, debido a que cada tipo de agua a tratar como el tipo de coagulante a usar presentan un rango de pH admisible que si no se toma en cuenta puede ocasionar una mala calidad de agua a tratar y se produce un desperdicio de producto químico (Aguilar, 2002). Barreto (2015) menciona que, para la remoción de color, el pH óptimo está entre 4.0-6.0 y para la eliminación de turbiedad está entre 6.5-8.5. Por tanto, el pH óptimo para la remoción de color es más bajo comparado con el pH que se requiere para la eliminación de la turbiedad (Barreto, 2015). Oliveira y Teixeira (2019) recomiendan rangos de pH entre 6-8 para la remoción de turbiedad.

## **2.3.2.5 Coagulantes**

### **a. Policloruro de Aluminio**

Es un derivado polimérico del aluminio, este coagulante permite una mejor formación de floc, menor generación de lodos y un amplio rango de pH, pero tiene como desventaja su elevado costo a comparación del sulfato de aluminio, es muy utilizado en las plantas de tratamiento de agua potable (Arboleda, 2000).

### **b. Sulfato de Aluminio**

Es un coagulante inorgánico que posee aluminio trivalente que al interaccionar con el agua produce que se formen flocs de hidróxido de aluminio, además es el coagulante más utilizado en las plantas de tratamiento de aguas potables, por su eficiente remoción de sustancias húmicas y bajo costo. Sin embargo, una mezcla inadecuada de un este coagulante puede afectar la formación de un buen flóculo; por tanto, la solución es utilizar un exceso de la sustancia química para tener un buen rendimiento de la planta (Brandt, Johnson, Elphinston, & Ratnayaka, 2017).

## **2.3.3 Teoría de la floculación**

La floculación es una etapa en la que la formación de los flóculos se produce por las interacciones y aglomeraciones entre: partículas primarias, partículas primarias y flóculos, flóculos y otros flóculos (Watanabe, 2017). Estas interacciones pueden ser ortocinética o pericinética, en la primera las colisiones que se dan entre partículas son gracias al movimiento del fluido producido por una fuente de energía

externa como turbinas o paletas; mientras en la segunda la colisión se produce en la misma masa de agua debido a la turbulencia del fluido y a la gravedad de los flóculos preformados (Floculadores y Clasificación, 1982).

La eficiencia del proceso de potabilización está ligada en gran parte al proceso de formación de flóculos, ya que en esta etapa se debe conseguir un flóculo de gran tamaño y compacto para posteriormente caer por acción de la gravedad en el tanque sedimentador, esto hace que se reduzca la carga sólida evitando colmataciones en el filtro rápido, aumentando los tiempos de carrera de filtración e involucrando menos mano de obra en el proceso.

### **2.3.3.1 Factores que influyen en la floculación.**

#### **a. Naturaleza del agua**

La presencia de partículas que modifican las características naturales del agua como: turbiedad, color, pH y alcalinidad pueden influir en el proceso de formación de flóculos debido a que interfieren en la generación de cadenas poliméricas de los hidróxidos aumentando el tiempo de floculación (CEPIS/OPS, 2004).

#### **b. Tiempo de floculación**

La velocidad de formación del flóculo es proporcional al tiempo que permanece la partícula en el floculador, el tiempo de retención promedio recomendado para que el flóculo tenga las características óptimas para su posterior sedimentación es de 20 a 40 minutos; un tiempo inferior o superior a este provocará un flóculo débil e inestable que no se precipitará en el tanque de sedimentación (Romero Rojas, 1999).

#### **c. Gradiente de velocidad (G)**

La velocidad de aglomeración de las partículas es proporcional al gradiente de velocidad, hasta un determinado punto; se debe a que un valor demasiado alto de G puede dar lugar a la ruptura del flóculo por la acción de las fuerzas de corte del líquido sobre los flóculos preformados (CEPIS/OPS, 2004). La resistencia de los flóculos a valores altos de G va a depender de varios factores como:

1. Tamaño, forma y compactación del flóculo.

2. Tamaño, forma y naturaleza de las partículas.
3. Número y forma de los enlaces que unen las partículas.

#### **d. Variación del caudal**

El gradiente de velocidad y el tiempo de retención están íntimamente relacionados con la variación del caudal, de igual manera se relaciona con el tipo de floculador que se emplee en el proceso. En los floculadores hidráulicos existe más flexibilidad a las variaciones del caudal, puesto que al disminuir el caudal aumenta el tiempo de retención y disminuye el gradiente de velocidad, viceversa al aumentar el caudal (CEPIS/OPS, 2004).

#### **2.3.3.2 Tipos de floculadores**

Los floculadores se clasifican de acuerdo con el tipo de energía que se introduce al sistema para producir la agitación del fluido, pueden ser: floculadores hidráulicos y floculadores mecánicos.

##### **a. Floculadores hidráulicos:**

Utiliza la energía potencial para provocar un gradiente de velocidad suficiente y producir las colisiones entre partículas floculantes (Romero Rojas, 1999).

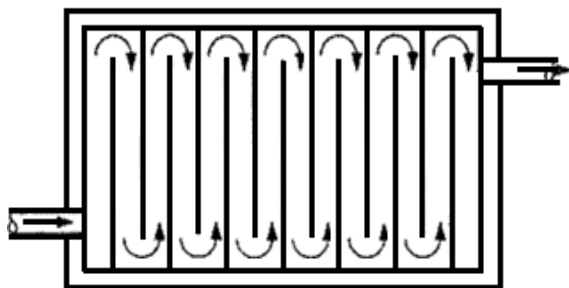
- **Floculadores de Pantallas**

Son los más utilizados en las plantas de tratamiento por ser eficientes y económicas entre todos los floculadores utilizados actualmente. Generalmente son construidas con materiales como fibra de vidrio, concreto prefabricado, plástico, madera o asbesto cemento; este último material se puede utilizar solo si las aguas presentan un pH mayor o igual a 6 y si la planta no se encuentra en un área de alto riesgo sísmico puesto que estas estructuras son frágiles.

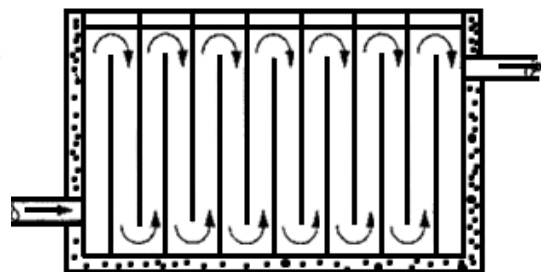
Los floculadores de pantalla se clasifican en flujo horizontal y flujo vertical, el primero cuando el fluido va y viene alrededor de los tabiques haciendo un giro de 180 grados al final de cada uno (figura 3). Es recomendable para caudales menores a 50 l/s, este tanque floculador está dividido por pantallas, dispuestos de tal manera que el agua en su recorrido sea de ida y vuelta alrededor de las mismas, la turbulencia se

produce en cada cambio de dirección de flujo y la velocidad del mismo al entrar al sistema floculador varía entre 0.10 y 0.60m/s y al final baja entre 0.10 y 0.20 m/s. Se debe tener en cuenta que velocidades mayores o menores a estas no permitirá una formación compacta del flóculo (CEPIS/OPS, 2004); el tiempo de retención de acuerdo a lo que menciona Romero Rojas (1999) para un floculador convencional se encuentra entre 10-60 min.

En los floculadores de flujo vertical el fluido sube y baja en condiciones similares (figura 4), son más compactos que los horizontales debido a que ocupan menor área para su construcción y son recomendables para caudales mayores a 50 l/s, tienen una profundidad de 3 a 4 metros y para evitar los problemas de acumulación de lodos en el fondo del tanque se realiza una abertura en la base equivalente al 5% del área horizontal de cada compartimento. La velocidad del agua en los tramos rectos está entre 0.2 y 0.6 m/s y el tiempo de retención teórico puede variar entre 10 a 30 minutos, mientras que el gradiente de velocidad esta entre el rango de 10 a  $100s^{-1}$  (CEPIS/OPS, 2004).



**Figura 3.** Floculador Hidráulico Horizontal



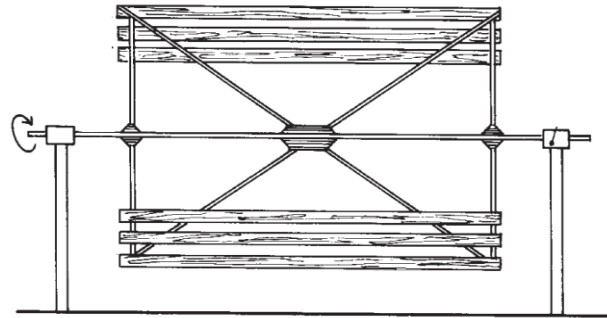
**Figura 4.** Floculador Hidráulico Vertical

**Fuente:** (Romero Rojas, 1999)

## **b. Floculadores mecánicos:**

Se introduce potencia para asegurar una mezcla lenta mediante agitadores mecánicos (Romero Rojas, 1999). Estos se clasifican según el movimiento que produce el agitador sobre la masa del líquido, pueden ser giratorios y reciprocantes.

El primero utiliza velocidades bajas de rotación (paletas) o de alta velocidad (turbinas) con eje horizontal y vertical (figura 5).



**Figura 5.** Floculador Mecánico de paletas de eje horizontal.  
**Fuente:** (CEPIS/OPS, 2004)

### 2.3.4 Teoría de la sedimentación

Es un proceso físico en el cual las partículas más densas que el agua y previamente floculadas, se separan del líquido por acción de la gravedad, tiene una velocidad de caída tal que, puede llegar al fondo del tanque sedimentador en un tiempo económicamente aceptable (Arboleda, 2000). Además, se le conoce comúnmente como clarificación y espesamiento, el primero se refiere únicamente en el interés de clarificar el agua y el segundo en la suspensión concentrada de sólidos. Este proceso puede realizarse de dos formas: la sedimentación simple en el que no se emplea un producto químico y la sedimentación compuesta después de la coagulación y floculación (Romero Rojas, 1999).

La sedimentación de las partículas suspendidas puede ser de diferentes formas, ya que depende de factores como la concentración de sólidos, naturaleza de sólidos y grado de floculación. Estas partículas se clasifican en discretas y floculantes. Las partículas discretas no cambian de tamaño, forma o densidad cuando se precipitan, en cambio las partículas floculantes tienen cambios constantes de densidad, forma, y tamaño a medida que se adhieren unas a otras por diferentes mecanismos de floculación precipitación, arrastre o barrido (Romero Rojas, 1999).

La velocidad de sedimentación de las partículas floculantes va a depender de las características hidráulicas de los sedimentadores y de la velocidad de

sedimentación para cada diámetro y tipo de partícula. El tiempo de retención en los sedimentadores dependerá del tamaño de la partícula: los macro agregados tienen un tiempo estimado de 5 minutos, los micro agregados de 5 a 60 minutos y los agregados primarios es decir las partículas más pequeñas pueden tardar hasta las 8 horas en sedimentarse (Bouyer et al., 2005).

Los sedimentadores de alta tasa son tanques con una profundidad aproximada de 3.2m (Arboleda, 2000), con módulos instalados en toda su área, pueden ser placas onduladas o de otras formas y con un tiempo de retención relativamente corto al convencional. Los sedimentadores de alta tasa de flujo ascendente presentan módulos cuyos conductos estén dispuestos con un ángulo de 45° o mayor, para que el flóculo puede caer verticalmente a la zona de lodos o adherirse a las paredes interiores de la estructura. Para este tipo de sedimentadores el mantenimiento tiene que realizar periódicamente debido a que se satura en cortos periodos de tiempo (CINARA, 1991).

### **2.3.5 Teoría de la filtración**

Es el último proceso de separación sólido-líquido en la potabilización del agua (Jiao et al., 2017), es decir, las sustancias húmicas, partículas coloidales, presentes en la suspensión acuosa se separan mediante un medio poroso, permitiendo el paso del fluido y reteniendo así las partículas sólidas.

Para la eficiencia de la remoción de las partículas en suspensión se necesita de ciertos mecanismos de filtración. Entre ellos como menciona L.Cleasby & S.Logsdon (1999) se puede dar por dos mecanismos, el primero de transporte, ya que los sólidos por remover son transportados desde la suspensión a la superficie de los granos del medio poroso, entre ellas está el cribado para remover algunos sólidos si las partículas son más grandes que los poros del medio y otros mecanismos como sedimentación, difusión, impacto inercial. El segundo mecanismo es de adherencia debido a que, los sólidos por remover permanecen adheridas a los granos del medio poroso gracias a las fuerzas de Van der Waals

que dan resultado a una fuerza de atracción neta ocurriendo la unión de los sólidos por remover a la superficie del grano del medio poroso.

Un filtro rápido se caracteriza por tener velocidades altas de 120 a 360 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> día (Arboleda, 2000). Entre estos filtros rápidos los más comunes son los de arena, este filtro puede ser un tanque a presión o estar abierto a la atmósfera y está constituido de una capa de arena de tamaño efectivo entre 0.4-1.2 mm (Córdoba & Dueñas, 2016). El medio filtrante puede tener un espesor entre 45.7 y 76.2 cm, está soportado sobre un sistema de desagüe inferior que recoge el agua filtrada y distribuye el agua de retrolavado en sentido ascendente (Weber, 1979).

## **2.4 Estado de arte**

### **2.4.1 Estudios sobre floculadores tubulares de flujo horizontal**

- De acuerdo con un estudio realizado en una planta de tratamiento para aguas residuales en el procesamiento de subproductos avícolas de Bogotá, se implementó un sistema de floculación tubular horizontal con flotación. Esto como uno de los medios más efectivos para la separación de aceites y grasas de las aguas, mediante la separación líquido-sólido. Este sistema consistió en introducir el agua residual en un tanque de retención cerrado, en el cual el flotador por aire disuelto contenía un tubo floculador horizontal donde se preparó la reacción de coagulantes y floculantes. Estos favorecieron a la formación de flocs en tubos de PVC, las corrientes de aguas residuales que pasa por los tubos está saturada con aire a presiones elevadas, al formarse pequeñas burbujas estas se ponen en contacto con las partículas presentes en el flujo de manera continua, tales burbujas suben luego al tanque de flotación (Cano Marin, 2015).
- En la parroquia Bayas de la ciudad de Azogues con el objetivo de mejorar la calidad del agua a través de una tecnología potencial sostenible, la Universidad de Cuenca a través de un proyecto de investigación, diseñaron una planta de tratamiento piloto a base de tuberías de PVC de 4" de diámetro que constituyeron el floculador tubular horizontal (FTH), un sedimentador de concreto y un filtro de arena. Para las pruebas experimentales se utilizaron



dos longitudes de 68.4 m y 97.6 m para el FTH con turbiedades de agua cruda de 10, 20, 50, 100 y 200 NTU y caudales de 0.25, 0.5, 0.75, 1 y 2 L/s resultando un total de 50 ensayos. Los resultados demostraron que la eficiencia de remoción a la salida del filtro de turbiedad y color fueron de 98.77% y 99.92% respectivamente, cumpliéndose de esta manera con los parámetros que establece la NTE INEN 1108 (Méndez & Trelles, 2021).

#### **2.4.2 Estudios sobre floculadores tubulares de flujo vertical**

- Según un estudio realizado en la Universidad de Colombia, un grupo de estudiantes realizaron un prototipo de un floculador hidráulico vertical mediante tuberías de PVC para caudales de 0.5 y 1 L/s, con el objetivo de abastecer con esta agua tratada a acueductos rurales y urbanos. Para su construcción tomaron en cuenta parámetros como los tiempos de retención siendo estos de 35min y 10min para un caudal de 0.5 L/s y de 1 L/s respectivamente. El prototipo contaba con tuberías de PVC de 3" para una longitud de 89m y 4" para una longitud de 67m ubicados en forma vertical unidos a través de codos, este prototipo estaba en una estructura metálica para proporcionarle estabilidad y rigidez. Además, tenía un sistema de desaireado compuesto de mangueras transparentes de 1/2" cada una con una longitud de 2m, estas servían para desairear las tuberías durante el llenado inicial floculador, estos desaireadores fueron adaptados a una tabla de madera de 0.5 m X 2.40m. Para evaluar el funcionamiento y eficiencia del floculador piloto vertical se realizaron pruebas de turbiedad y se compararon con el floculador de la planta. Generando una eficiencia de remoción de turbidez mayor al 80% en el prototipo respecto a la planta de tratamiento que no superaba el 60%, ambos sistemas se realizaron con pruebas para un rango de turbiedad mayores a 100 NTU (Agudelo, Mejía, & Pinzón, 2015).
- En la planta de agua potable de la ciudad de Azogues, Novoa & Tenezaca (2021) llevaron a cabo un análisis experimental con un floculador tubular vertical (FTV) a base de tuberías de PVC con diámetro de 4 pulgadas y dos longitudes de 58 y 80 m utilizando como coagulante Sulfato de Aluminio, un

# UCUENCA

sedimentador y posteriormente un filtro. Los caudales utilizados para los experimentos fueron de 0.25, 0.5, 0.75, 1 y 2 L/s y turbiedades en el rango de 0.1-10, 10 – 20, 20 – 50, 50 – 100, 100 – 200 y más de 200 NTU. Los resultados demostraron que a una menor longitud del sistema (58m) hay una mejor eficiencia cuando se aplica caudales bajos de 0.25 y 0.5 L/s con 83.33% y 75.24% respectivamente de eficiencia de remoción, pero hay una mayor eficiencia de remoción en caudales altos de 1 y 2L/s con 77.57% y 79.99% respectivamente cuando se aplica para una longitud de 80 m. De igual manera se pudo constatar que al aumentar la longitud del FTV no existe una diferencia significativa entre las eficiencias en el sedimentador luego deber usado longitudes de 58 y 80 m del FTV. Finalmente, los autores concluyeron que sería útil como tecnología sostenible para la potabilización de agua en comunidades rurales ya que la calidad del agua a la salida de la filtración cumple la normativa de calidad del agua.

## CAPITULO III. METODOLOGÍA

### 3.1. Descripción del área de estudio

Este estudio se llevó a cabo en los sistemas tubulares pilotos de floculación implementados en la Planta de Tratamiento de Agua Potable de la Junta de agua potable de la parroquia Bayas, cantón Azogues. Este estudio fue la continuación del proyecto de investigación llamado “Floculación tubular hidráulica como una tecnología potencial para la provisión de agua potable en comunidades en desarrollo” el cual evaluó el sistema piloto usando como coagulante el Sulfato de Aluminio.

Como se mencionó anteriormente, la PTAP-B es una planta convencional y usa agua cruda proveniente de 4 captaciones denominadas Mahuarca, Chagrarcazhca, Santa Ana y Santa Ana-Llaucay (Figura 6). La planta trabaja con un caudal máximo de 20 L/s, el agua cruda ingresa a un tanque de recepción través de las 4 tuberías de PVC, pasa a un mezclador rápido (vertedero rectangular) que alimenta a dos módulos de floculación, posteriormente el agua es transportada al proceso de sedimentación (cada uno opera con un caudal máximo de 10 L/s), para pasar luego a 4 filtros rápidos, luego a la cámara de cloración en donde el agua es desinfectada con hipoclorito de calcio y finalmente el agua tratada es trasladada al tanque de almacenamiento (capacidad de 200 m<sup>3</sup>) y es entregada a 10 sectores como Abuga Ingapirca, Corazón de María, General Vintimilla, Juguil, Leg Abuga, Leg tabacay, Oriente alto, Oriente bajo, Señor de flores y Zhirincay. La PTAP-B abastece a aproximadamente a 6000 personas.



**Figura 6.** Planta de Tratamiento de Agua Potable Bayas (PTAP-B)  
**Fuente:** Elaboración propia

### **3.2 Descripción de los sistemas tubulares pilotos implementados en la PTAP-B**

#### **3.2.1 Floculador tubular de flujo horizontal (FTFH) piloto**

En el estudio realizado por Méndez & Trelles (2021) sobre este mismo FTFH se usó un solo diámetro (4" = 110mm) y dos longitudes diferentes (68.4 y 97.6 m) y se aplicó sulfato de aluminio como coagulante. En el presente estudio se utilizó como coagulante policloruro de aluminio (PAC) y se utilizó dos diámetros de (3" = 75 mm) y (4" = 110 mm) y tres longitudes: 90 m con tubería de 3", 97.6 m con tubería de 4", y 187.6 m con tubería de 3" + tubería de 4".

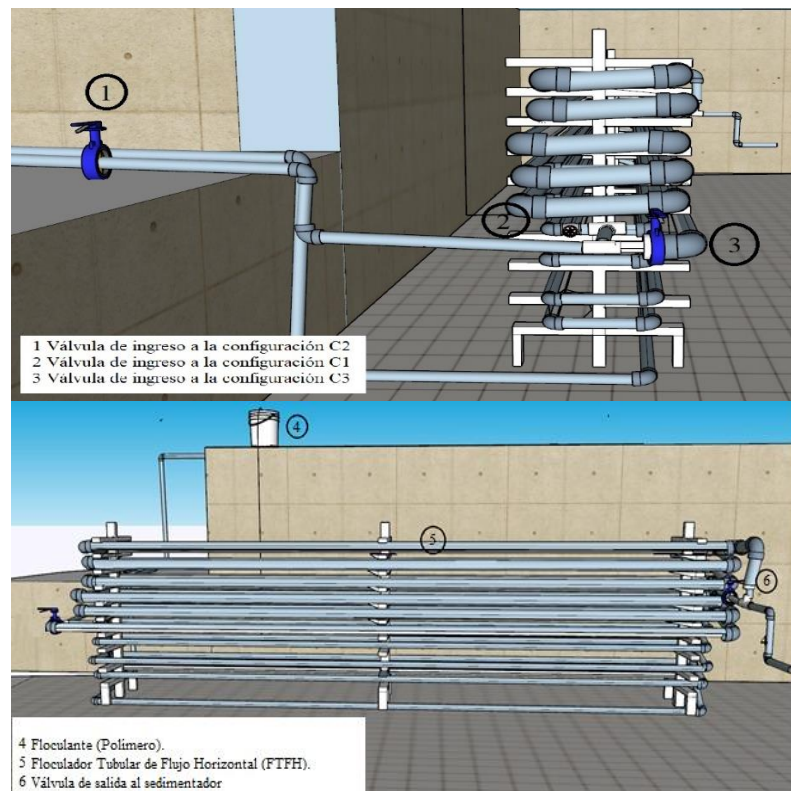
El FTFH se alimentó con agua cruda coagulada (coagulante PAC) directamente desde la mezcla rápida en el vertedero de la PTAP-B a través de una tubería de PVC (75 mm) y con una válvula de globo para regular el caudal de entrada para las diferentes pruebas que se realizaron.

El FTFH estuvo colocado sobre una base metálica y se construyó con tuberías de PVC de dos diámetros de 75 mm y 110 mm. Para los ensayos experimentales se usó tres configuraciones: 1. Usando solo tubería de 75 mm de diámetro con longitud 90 m (C1); 2. Usando solo tubería de 110 mm de diámetro con longitud de 97.6 m (C2) y 3. Combinación de los dos diámetros de 75 mm y 110 mm de diámetro con longitud 187.6 m (C3). Para trabajar en forma independiente con cada configuración

# UCUENCA

se ubicó una válvula de globo a la entrada de cada una de ellas. El polímero fue inyectado a través de mangueras plásticas de 1/8" de diámetro a 12 m del inicio de cada configuración (figura 7). El floculador se diseñó para un caudal de 1 L/s y con una velocidad de 0.13 m/s (Méndez & Trelles, 2021).

La salida de cada configuración del floculador tubular horizontal se conectó a un sedimentador de alta tasa, construido de latón galvanizado, que en su interior tuvo 2 módulos de sedimentación contruidos de acrilonitrilo butadieno estireno (ABS). En su parte inferior tiene una llave de válvula tipo globo para su desfogue y el lavado de lodos ubicada en la parte inferior del sedimentador. A la salida del sedimentador se encuentra una válvula de compuerta que se conecta a través de unas tuberías de PVC (110mm) a un filtro rápido de arena que está fabricada de concreto. En el Anexo 1 se puede observar con mejor detalle la configuración del sistema experimental.



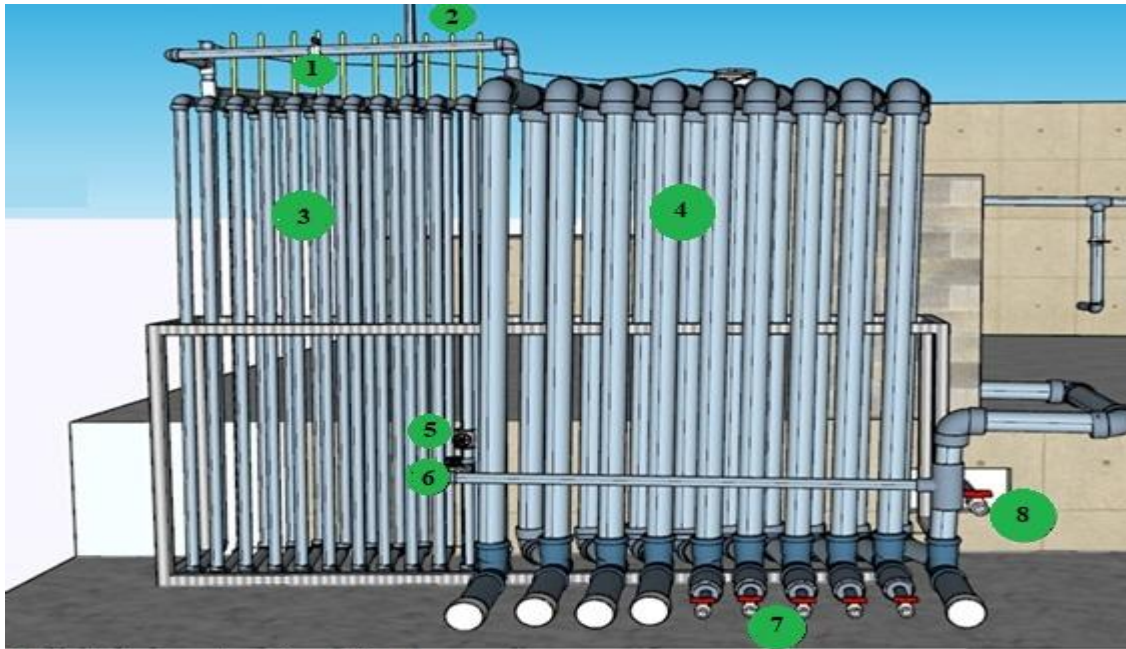
**Figura 7.** Floculador tubular de flujo horizontal (FTFH) piloto  
**Fuente:** Elaboración propia

### 3.2.2 Floculador tubular de flujo vertical (FTFV) piloto

En el estudio realizado por Novoa & Tenezaca (2021) sobre este mismo FTFV se usó un solo diámetro (4" =110 mm) y dos longitudes diferentes (58 y 80 m) y se aplicó sulfato de aluminio. En el presente estudio se usó 2 diámetros diferentes (2.5" y 4") (63 mm y 110 mm) y tres longitudes: 90 m con tubería de 2.5", 80 m con tubería de 4", y 170 m con tubería de 2.5" + tubería de 4". Adicionalmente se aplicó otro coagulante como es el PAC.

Al igual que el FTFH, este FTFV se alimentó con agua coagulada directamente desde la mezcla rápida de la PTAP-B mediante una tubería de PVC (75 mm), a esta tubería se adaptó una válvula de compuerta abierta para ajustar al caudal con el que se realizó las diversas pruebas.

El FTFV se implementó sobre una base metálica, la misma que sirvió como soporte para las tuberías de PVC ubicadas de manera vertical. Como se observa en la Figura 8, también se implementó tres configuraciones o disposiciones: 1. Correspondiente a las tuberías con un diámetro de 63 mm con longitud de 90 m (D1); 2. Correspondiente a las tuberías con un diámetro de 110 mm con longitud de 80 m (D2) y 3. Disposición con tuberías con un diámetro de 63 mm seguido de 110 mm, con longitud de 170 m (D3). Cada configuración estuvo provista con su respectivo desaireador (mangueras plásticas de 1/2") en la parte superior. Para trabajar en forma independiente con cada configuración se ubicó una válvula de globo a la entrada del agua. En la parte inferior de cada tubería se instaló una válvula, con el fin de desfogar los lodos que se acumularon por acción de la gravedad, lo cual se lo realizó cada vez que las turbiedades medidas a la salida del sistema piloto fueron superiores a 5 NTU. Así mismo para la dosificación de polímero se instaló una manguera de 1/8" de diámetro a 12 m del inicio de cada configuración.



1. Válvula de paso a la configuración D2.
2. Mangueras para **desairear**
3. Configuración D1.
4. Configuración D2.
5. Válvula de paso a la configuración D2
6. Válvula de paso al sedimentador nilotó vertical.
7. Válvula para desfogue de lodos.
8. Válvula para desfogue de lodos del Sedimentador pilotó Vertical.

**Figura 8.** Floculador tubular de flujo vertical (FTFV) piloto

**Fuente:** Elaboración propia

A la salida del FTFV estuvo implementado un sedimentador piloto tipo II de alta tasa, construido de concreto para un caudal de 1 L/s y con un volumen de 1.5 m<sup>3</sup>. Se instaló una válvula para el desfogue de lodos en la parte inferior del sedimentador y otra tubería se instaló en la parte superior del sedimentador para conectar a los filtros rápidos de arena, estos filtros fueron realizados con una tubería de diámetro de 300 mm, se contó con un número de 4 unidades y cada unidad estuvo diseñado para una tasa de 5 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>/h conectados entre sí para desfogar el agua filtrada. Estos filtros estuvieron provistos con válvulas instaladas en la parte superior e inferior; el mantenimiento del sistema se lo realizó cada vez que el agua a la salida del filtro tenía una turbiedad igual o mayor a 1 NTU. Mientras, el sistema de filtros de PVC estuvo en mantenimiento, el agua que salía del sedimentador de concreto se conducía a un filtro de concreto. Este filtro de hormigón fue implementado por la Junta de Agua y operó con el sistema horizontal. Ver Anexo 2

## 3.3 Determinación de parámetros hidráulicos de los sistemas tubulares pilotos implementados para el tratamiento de agua potable

### 3.3.1 Determinación del tiempo de retención teórico

El tiempo de retención teórico ( $T_t$ ) es el tiempo en que un fluido de caudal  $Q$  pasa a través de una unidad que tiene un volumen  $V$ , esto se expresa a través de la ecuación 1 (Oliveira & Teixeira, 2019).

$$T_t = \frac{V}{Q} \quad \text{Ecuación 1. Tiempo de retención teórico}$$

Donde:

$V$ = volumen de la unidad ( $m^3$ )

$Q$ = caudal de entrada a la unidad ( $m^3/s$ )

El volumen de la unidad se calculó usando la ecuación 2, la longitud comercial de un tubo de PVC es de 6 m, el diámetro fue hallado en las fichas técnicas de la empresa plastigama.

$$V = \pi * r^2 * L \quad \text{Ecuación 2. Volumen de la unidad}$$

Donde

$r$  = radio de la tubería (m)

$L$ = longitud de la unidad (m)

### 3.3.2 Determinación del tiempo de retención real

Se realizó con la técnica de trazadores utilizando cloruro de sodio ( $NaCl$ ), esta técnica depende del volumen de la unidad para determinar la cantidad necesaria de sal ( $NaCl$ ). Se midió a intervalos de un minuto la concentración de sólidos disueltos totales (SDT) a la salida de cada configuración, con la gráfica concentración de SDT vs tiempo se pudo determinar el tiempo de retención de los dos flocladores tubulares (FTFH y FTFV), cada uno con sus configuraciones y caudales correspondientes.

Para conocer la cantidad necesaria de  $NaCl$  a añadir en la unidad se determinó a través de la ecuación 3, el grado de pureza ( $I$ ) a utilizarse fue del 98% de acuerdo



a la ficha técnica de CRIS-SAL y la concentración  $C_o$  que se recomienda en el caso del NaCl es de 50 mg/L para determinar con facilidad en el agua (CEPIS/OPS, 2004).

$$M = \frac{V \cdot K \cdot C_o}{I \cdot 10^3}$$

**Ecuación 3.** Cantidad de trazador a añadir

Donde:

M = masa del trazador por añadir a la unidad (kg)

V = volumen de la unidad ( $m^3$ )

K = constante de corrección (ver ecuación 4)

$C_o$  = concentración (mg/l o  $g/m^3$ )

I = grado de pureza del trazador

$$K = \frac{\text{peso de NaCl}}{\text{peso Cl}}$$

**Ecuación 4.** Constante de corrección

Una vez conocida la cantidad de trazador necesaria para preparar la solución, se mezcló esta cantidad en un recipiente de plástico de 20 L. Esta solución se aplicó a la entrada del floculador y con la ayuda del conductímetro y aplicando la metodología de la curva de los tiempos de residencia se halló la mayor concentración del trazador que es el tiempo de retención real ( $T_r$ ) (CEPIS/OPS, 2004).

### 3.3.3. Determinación del gradiente de velocidad (G)

Para determinar este parámetro, primero se debe conocer el rango en el que oscila G para este tipo de floculadores. Según Arboleda (2000) el rango recomendable para una buena eficiencia fluctúa entre 10 y 100  $s^{-1}$  y propone la ecuación 5 para el cálculo de la misma, en donde, la viscosidad cinemática se tomó del libro Mecánica de fluidos sexta edición (Mott, 2006) de acuerdo a la temperatura promedio del agua durante los análisis ( $15^\circ C$ ).

$$G = \sqrt{\frac{\rho \cdot g \cdot h c}{\mu \cdot t}}$$

**Ecuación 5.** Gradiente Hidráulico

Donde:

G = gradiente hidráulico ( $s^{-1}$ ).

# UCUENCA

$\rho$  = densidad del fluido (Kg/m<sup>3</sup>)

$h_c$  = pérdida de carga total (m)

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

$\mu$  = viscosidad dinámica del fluido (Pa.s)

$t$  = tiempo de retención teórico o real en la unidad (s).

La pérdida de carga por presión a lo largo de la tubería se puede calcular con la ecuación 6 de Darcy – Weisbach, esta se calculó para las diferentes longitudes que tienen el FTFH y FTFV como se observa en la tabla 4.

$$h_c = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g}$$

**Ecuación 6.** Pérdida de carga por presión

Donde:

$f$  = coeficiente de rozamiento.

$D$  = diámetro interno de la tubería (m)

$L$  = longitud de la tubería (m)

$v$  = velocidad del agua (m/s)

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

Para determinar el coeficiente de rozamiento se utilizó la ecuación 7 de Chen, en donde la rugosidad de la tubería se escogió de acuerdo con el material de la tubería en este caso para una tubería de PVC la rugosidad de acuerdo al libro Mecánica de fluidos sexta edición (Mott, 2006) es  $3.0 \times 10^{-7}$  m.

$$f = \frac{1}{\left( -2 \log \left( \frac{\varepsilon}{3.7065D} - \frac{5.0452}{Re} * \log \left( \frac{1}{2.8257} \left( \frac{\varepsilon}{D} \right)^{1.1098} + \frac{5.8506}{Re^{0.8981}} \right) \right) \right)^2}$$

**Ecuación 7.**  
Coeficiente de rozamiento

Donde:

$f$  = coeficiente de rozamiento

$D$  = diámetro interno de la tubería (m)

$Re$  = número de Reynolds

$\varepsilon$  = rugosidad de la tubería (m)

Para hallar el coeficiente de rozamiento se determinó el número de Reynolds (Re) que se calculó a partir de la ecuación 8. El número de Re permite conocer el tipo de flujo, existen dos casos si  $Re > 4000$  existe un flujo turbulento caso contrario si el flujo es laminar el  $Re < 2300$  según menciona Azizi et al. (2019).

$$Re = \frac{\rho * D * v}{\mu}$$

### **Ecuación 8.** Número de Reynolds

*Donde:*

$R_e$  = Número de Reynolds

$D$  = diámetro interno de tubería (m)

$\rho$  = densidad del fluido ( $\text{Kg/m}^3$ )

$v$  = velocidad del fluido (m/s)

$\mu$  = viscosidad dinámica (Pa.s)

Además de la pérdida de carga por presión a lo largo de la tubería, se necesitó también conocer la pérdida de carga por accesorio ( $h_a$ ), que se calculó con la ecuación 10, la cual a su vez depende de la constante de carga de la ecuación 9 que varía dependiendo del accesorio que se tenga (codos y válvulas).

$$K = f * \frac{L}{D}$$

### **Ecuación 9.** Constante de carga

$$h_a = K \frac{v^2}{2g}$$

### **Ecuación 10.** Pérdida de carga por accesorios

*Donde:*

$h_a$  = pérdida de carga solo de accesorios (codos y válvulas)

$f$  = factor de fricción del accesorio

$K$  = constante de carga

$v$  = velocidad del agua (m/s).

$g$  = aceleración de la gravedad ( $\text{m/s}^2$ ).

## **3.4 Determinación de la dosis óptima de coagulante y floculante en las pruebas experimentales**

### **3.4.1 Determinación de la dosis óptima del coagulante**

La dosis óptima de coagulante aplicada fue escogida en función de la turbiedad del agua cruda que ingresó PTAP-B y con la ayuda de la curva de dosificación de policloruro de aluminio (PAC) elaborada por la Empresa EMAPAL (Anexo 4); esto se efectuó debido a que la PTAP-B no tiene una curva de dosificación de PAC. La ecuación 11 fue usada para calcular el caudal de coagulante (q), utilizando 2.5 % de concentración de PAC.

$$Q \times D = q \times C \quad \text{Ecuación 11. Dosis óptima de coagulante PAC}$$

Donde:

D = dosis de coagulante (mg/L)  
q = caudal del coagulante (L/s)  
C = concentración de coagulante (mg/L)  
Q = caudal de agua cruda (L/s)

### **3.4.2 Determinación de la dosis óptima de polímero**

Para la correcta dosificación de polímero se empleó la ecuación 11, que es la misma utilizada en la determinación de la dosis óptima del coagulante. Para el cálculo del caudal de polímero (q) en todas las pruebas experimentales se usó el caudal de entrada al vertedero Q, la concentración de polímero usada para la preparación de la solución C=0.025 mg/L, en este caso la planta utiliza polielectrolito catiónico, además se hizo uso del estudio realizado previamente de Calle & Zambrano (2015) con el objetivo de conocer la dosis óptima de polímero siendo esta D= 0.075 mg/L.

## **3.5 Ensayo experimental**

### **3.5.1 Tratamientos experimentales**

Los ensayos experimentales fueron realizados usando tanto el FTFH como el FTFV. El FTFH tuvo 3 configuraciones (C1, C2, C3). El FTFV también tuvo 3 configuraciones (D1, D2, D3). Cada configuración estuvo en función del diámetro y longitud de tubería. Se obtuvo en total 6 sistemas de tratamiento piloto, tal como se indica en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Número de tratamientos y configuración de los floculadores tubulares pilotos

Nº de Tratamiento	Conformación del sistema de tratamiento piloto	Configuración de los floculadores tubulares
T1	C1+S+F	C1= FTFH de Ø=75 mm, L= 90 m
T2	C2+S+F	C2= FTFH de Ø=110 mm, L= 97.6 m
T3	C3+S+F	C3= FTFH de Ø=75 mm+110 mm, L= 187.6 m
T4	D1+S+F	D1= FTFV de Ø=63 mm, L= 90 m
T5	D2+S+F	D2= FTFV de Ø=110 mm, L= 80 m
T6	D3+S+F	D3= FTFV de Ø=63mm+110mm, L= 170 m

FTFH= Floculador Tubular de flujo Horizontal, FTFV= Floculador Tubular de flujo Vertical, S= Sedimentador, F= Filtro.

**Fuente:** Elaboración propia.

Los tratamientos T1, T2 y T3 trabajaron con cuatro rangos de turbiedades (0-15; 15-50; 50-100; >100NTU) y tres caudales (0.5; 1; 2 L/s). En tanto los tratamientos T4, T5 y T6 trabajaron con cuatro rangos de turbiedades (0-15; 15-50; 50-100; >100NTU) y dos caudales (0.5; 1 L/s). Dando en total 60 ensayos experimentales (Tabla 5). Se debe acotar que cada ensayo se hizo por duplicado, obteniéndose en total 120 ensayos.

**Tabla 5.** Turbiedades, caudales y los diferentes tratamientos pilotos

Turbiedad (NTU)	Q (L/s)	Tratamiento	Turbiedad (NTU)	Q (L/s)	Tratamiento
0-15 15-50 50-100 >100	0.5	T1	0-15 15-50 50-100 >100	0.5	T4
	1			1	
	2			2	
	0.5	T2		0.5	T5
	1			1	
	2			2	
0.5	T3	0.5	T6		
1		1			
2		2			

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.5.2 Muestreo y análisis de parámetros para la remoción de turbidez, color y determinación de la eficiencia

Los ensayos experimentales se realizaron entre los meses de octubre a marzo del 2022, se determinó turbidez y color en cada uno de los 60 ensayos, considerando los ensayos duplicados, resultaron un total de 120 monitoreos. Los puntos de muestreos establecidos en cada uno de los tratamientos fueron: 1. entrada del agua cruda, 2. salida del sedimentador piloto, 3. salida del filtro como se puede observar en el Anexo 5. Las muestras fueron tomadas en vasos de precipitación totalmente limpios y secos. Los rangos turbiedades de agua cruda que se utilizaron en el muestreo se encuentran expresados en la tabla 5. El control de la turbiedad se realizó con un turbidímetro HACH (2100Q), para el color se usó un colorímetro HACH (DR/890) y para la temperatura y el pH se midió con un pHmetro (HANNA).

Para comparar la eficiencia de los sistemas pilotos vs el sistema convencional; se tomaron 2 puntos de muestreo en el sistema convencional: 1. salida del tanque sedimentador convencional y 2. salida de los filtros rápidos.

### 3.5.3 Eficiencia de los tratamientos experimentales

Para el cálculo de la eficiencia en los seis tratamientos experimentales implementados y del sistema convencional de la PTAP-B se utilizó la ecuación 12. Esta eficiencia se determinó en base a la eliminación de turbidez y color.

$$Eficiencia\ sedimentador = \frac{TAC - Turbidez\ de\ agua\ sedimentador}{TAC} * 100$$

$$Eficiencia\ filtro = \frac{TAC - Turbidez\ de\ agua\ filtro}{TAC} * 100$$

**Ecuación 12.** Cálculo de la eficiencia para la remoción de turbidez

*Eficiencia sedimentador*

$$= \frac{\text{Color de agua cruda} - \text{Color de agua sedimentador}}{\text{Color de agua cruda}} * 100$$

$$\text{Eficiencia filtro} = \frac{\text{Color de agua cruda} - \text{Color de agua filtro}}{\text{Color de agua cruda}} * 100$$

**Ecuación 13.** Cálculo de la eficiencia para la remoción de color

Para el cálculo de la eficiencia del sedimentador piloto en ambos sistemas (FTFH y FTFV), los parámetros de estudio tanto para la remoción de turbidez y color se midió una vez que el agua pasó por el floculador, de igual manera se realizó para el cálculo de la eficiencia en el filtro piloto, en el que los parámetros de remoción de turbidez y color se midió luego de que el agua haya pasado por el floculador (FTFH o FTFV) y el sedimentador.

### **3.6. Análisis estadístico**

#### **3.6.1. Estadística descriptiva**

Se calculó la media aritmética, la mediana, desviación estándar, valor máximo y valor mínimo con los valores obtenidos de la eficiencia de remoción de turbiedad y color de los seis tratamientos, así como del sistema convencional de la Junta de Bayas. Estos datos se compararon con lo que se indica en la norma INEN 1108 referente al agua potable. Además, se realizó gráficas de barras para representar las medias y diagramas de caja que ayudaran a visualizar de mejor manera los valores máximos, mínimos y medianas, estos gráficos se realizaron en el programa R Studio y con los datos obtenidos de las diferentes pruebas experimentales en cada configuración FTFH y FTFV.

#### **3.6.2. Correlación de las variables**

Se trata sobre una agrupación entre las variables numéricas, es decir, indican la tendencia (decreciente o creciente) que tienen los datos. Entre los coeficientes de correlación que se utilizan con más frecuencia está el coeficiente de correlación de Pearson, el cual se utiliza como medida de relación lineal para datos que presentan una distribución normal de forma conjunta. El coeficiente de Spearman se usa como

medida de una agrupación monótona para datos continuos que no presentan una distribución normal (Schober, Bóer, & Schwarte, 2018).

Ambos coeficientes de correlación están escalados desde el -1 a +1, siendo el 0 que indica que no hay una agrupación lineal o monótona, y si la relación se fortalece y se aproxima a una curva que aumenta o disminuye constantemente mientras se acerca el coeficiente a un valor de 1 significa que hay una correlación de Spearman, mientras si resulta una línea recta es una correlación de Pearson (Schober, Bóer, & Schwarte, 2018). En la tabla 6 se muestra los rangos con su respectiva descripción de los coeficientes de correlación.

**Tabla 6.** Descripción de los coeficientes de correlación

Rangos de coeficiente de correlación	Descripción
0.00-0.10	Correlación insignificante
0.11-0.39	Correlación débil
0.4-0.69	Correlación moderada
0.7-0.89	Correlación fuerte
0.9-1	Correlación muy fuerte

**Fuente:** Schober & Schwarte (2018)

Pero antes de conocer que coeficiente de correlación se tuvo que aplicar a los diferentes tratamientos, se determinó si las variables cuantitativas tenían una distribución paramétrica o no paramétrica, para lo cual se realizó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, en esta prueba si p value es mayor a 0.05 se afirma que hay una distribución paramétrica en los datos (Di Rienzo et al., 2008). Como Shapiro-Wilk indicó que los datos de turbiedad de agua cruda no presentaron una distribución normal se usó Spearman y se generó una matriz de correlación en el programa InfoStat versión 2017.1.2 tanto para los datos del sistema con FTFH como del FTFV piloto.

### 3.6.3 Prueba estadística

Se utilizó el programa InfoStat para realizar la prueba de normalidad de Shapiro Wilks, que determinó la distribución de los datos analizados. Para el objetivo general se halló la normalidad de los datos de la eficiencia de la turbiedad del sedimentador



y del filtro en función de la longitud de ambos sistemas pilotos tubulares. Así también, se evaluó para el último objetivo del presente estudio la normalidad de los datos de la eficiencia de la turbiedad del sedimentador y filtro para la configuración C2 y D2 de los sistemas pilotos tubulares.

1. Después de realizar la prueba de Shapiro-Wilk se analizó la remoción de turbidez en función de las longitudes concluyendo que hay una distribución normal, por tanto se aplicó ANOVA de una vía para comparar más de 3 grupos (Flores, Miranda, & Villasis, 2017), y se plantearon las siguientes hipótesis: la hipótesis nula ( $H_0$ ): no hay diferencia en la eficiencia de remoción de turbiedad a la salida del sedimentador y filtro al incrementar la longitud piloto del FTFH y del FTFV. En tanto, que la hipótesis alterna ( $H_a$ ): si hay diferencia en la eficiencia de remoción de turbiedad a la salida del sedimentador y filtro al incrementar la longitud piloto del FTFH y del FTFV.
2. Analizando la eficiencia de remoción de turbidez en función de los dos coagulantes, los datos de las medias de eficiencia de remoción de turbidez del sedimentador y del filtro tanto del FTFH como del FTFV presentaron que no hay distribución normal, por tanto, se aplicó la prueba de Wilcoxon para comparar dos grupos de datos. Por tanto, la hipótesis fueron las siguientes  $H_0$ : La eficiencia de remoción de turbiedad a la salida del sedimentador y filtro piloto no cambia al usar como coagulante PAC en lugar de Sulfato de Aluminio. Mientras que la  $H_a$ : La eficiencia de remoción de turbiedad a la salida del sedimentador y filtro piloto cambia al usar como coagulante PAC en lugar de Sulfato de Aluminio

Finalmente, en todos los casos del presente estudio se utilizó un nivel de significancia de 0.05.

## CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Parámetros hidráulicos de los floculadores tubulares implementados para el tratamiento de agua potable

#### 4.1.1 Tiempo de retención teórico

Para las configuraciones C1, C2, C3, D1, D2 y D3 representadas en la tabla 4, se calculó el tiempo de retención teórico en base a la ecuación 1, para resolver esta ecuación los datos que se utilizaron fueron los respectivos caudales para cada configuración (0.5, 1 y 2 L/s) para C1, C2, C3 y (0.5 y 1 L/s) para D1, D2 y D3. Los volúmenes de cada tubería se determinaron a través de la ecuación 2, en el que utilizó los diámetros de cada tubería (75 mm, 110 mm y combinado) y (63 mm, 110 mm y combinado) para las configuraciones C1, C2, C3 y D1, D2 y D3 respectivamente. En la tabla 7 se muestra los resultados del tiempo de retención teórico en función de los caudales y diámetros de tubería que tuvo cada configuración.

**Tabla 7.** Tiempo de retención teórico en función de los caudales, diámetros y longitudes de tubería que tiene cada sistema tubular.

Sistema Floculador Tubular Horizontal (FTFH)			Sistema Floculador Tubular Vertical (FTFV)		
Config	Q(L/s)	Tt (min)	Config	Q(L/s)	Tt (min)
C1 Ø=75 mm, L= 90m	0.5	13.2	D1 Ø=63 mm, L= 90m	0.5	9.33
	1.0	6.6		1.0	4.67
	2.0	3.3			
C2 Ø=110 mm, L= 97.6	0.5	31	D2 Ø=110 mm, L= 80m	0.5	25.33
	1.0	15.5		1.0	12.66
	2.0	7.75			
C3 Ø=75 mm+110 mm, L= 187.6m	0.5	44.22	D3 Ø=63 mm +110 mm, L= 170 m	0.5	34.66
	1.0	22.1		1.0	17.33
	2	11.05			

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 7 se puede observar que, el tiempo de retención es proporcional al diámetro y longitud para cada configuración de los floculadores tubulares implementados (FTFH y FTFV). Es decir, mientras menor sea su diámetro para una misma longitud, menor será su tiempo; así, C1 tuvo un tiempo de 13.2 min y C2 31

min para un mismo caudal de 0.5 L/s. De la misma manera sucede con D1 al tener un tiempo de 9.33 min y D2 con 25.33 min para el mismo caudal. Así mismo, a mayor longitud y diámetro del floculador mayor fue el tiempo de retención, así C3 tuvo mayor tiempo de retención que todas las configuraciones propuestas.

Ahora bien, al comparar los tiempos de retención teóricos en un mismo floculador, estos varían al cambiar el caudal; es decir, mientras mayor es el caudal menor es su tiempo de retención y viceversa. Además, se observa que al tener un mismo diámetro en ambas configuraciones C2 y D2 pero diferentes longitudes el tiempo de retención es mayor en el FTFH que en el FTFV, esto se debe a que el FTFH tuvo 17.6 m más de longitud que el FTFV, lo que indicó que a una mayor longitud el tiempo de retención es mayor.

#### 4.1.2 Tiempo de retención real

Se determinó de acuerdo con la técnica de trazadores utilizando el cloruro de sodio (NaCl), los resultados que se obtuvieron se presentan en la tabla 8.

**Tabla 8.** Tiempo de retención real obtenidos por la técnica de trazadores.

Sistema Floculador Tubular Horizontal (FTFH)			Sistema Floculador Tubular Vertical (FTFV)		
Config	Q(L/s)	Tr (min)	Config	Q(L/s)	Tr (min)
<b>C1</b> Ø=75 mm, L= 90m	0.5	14	<b>D1</b> Ø=63 mm, L= 90m	0.5	12.30
	1	5.45		1	8
	2	2.45			
<b>C2</b> Ø=110 mm, L= 97.6	0.5	32	<b>D2</b> Ø=110 mm, L= 80m	0.5	21.5
	1	13.5		1	10
	2	5.25			
<b>C3</b> Ø=75 mm+110 mm, L= 187.6m	0.5	46.15	<b>D3</b> Ø=63 mm +110 mm, L= 170 m	0.5	31.15
	1	18.15		1	20.3
	2	9.95			

**Fuente:** Elaboración propia

Ahora bien, ya conocido los  $T_t$  y  $T_r$  de cada configuración, tal como se observa en la tabla 9, estos valores son cercanos entre sí, a excepción de los valores para un caudal de 0.5 L/s en el caso del FTFH (C3) y en el caso del FTFV (D1 y D3) para

un caudal de 1L/s, esto pudo deberse a las fluctuaciones en el caudal de ingreso a la PTAP-B.

Los tiempos de retención en su mayoría cumple con los valores registrados en la tabla 10, los mismos que son recomendados por los diferentes autores, tal como lo menciona Romero Rojas (1999); este autor señala que para un floculador horizontal convencional se recomienda entre 10-60 min. El tiempo no cumple para los caudales de 1 y 2 L/s pertenecientes a la configuración C1 debido a que la longitud es menor respecto a las demás configuraciones, en las configuraciones C2 y C3 no cumple con el caudal de 2 L/s, pero el de 1 L/s llega a estar dentro del rango recomendado dado en la tabla 10.

Mientras que, para el FTFV, tomando como referencia el tiempo entre 10 a 60 min de la tabla 10, cumplen todos a excepción de los valores con un caudal de 1 L/s de la configuración D1. Aunque hay otros autores como CEPIS que recomiendan que el tiempo de retención para un floculador vertical varíe entre 10 a 30 min, el cual solo para caudales de 1 L/s en la configuración D3 y caudales de 0.5, 1 L/s de D2 cumplen; esto puede ser por su diámetro que son mayores a la tubería de D1.

**Tabla 9.** Valores de tiempo de retención teórico y real de los sistemas tubulares pilotos

Sistema Floculador Tubular Horizontal (FTFH)				Sistema Floculador Tubular Vertical (FTFV)			
Config	Q(L/s)	Tt (min)	Tr (min)	Config	Q(L/s)	Tt (min)	Tr (min)
<b>C1</b> Ø=75 mm, L= 90 m	0.5	13.2	14	<b>D1</b> Ø=63 mm, L= 90 m	0.5	9.33	12.30
	1	6.6	5.45		1	4.67	8
	2	3.3	2.45		---	---	---
<b>C2</b> Ø=110 mm, L= 97.6	0.5	31	32	<b>D2</b> Ø=110 mm, L= 80 m	0.5	25.33	21.5
	1	15.5	13.5		1	12.66	10
	2	7.75	5.25		---	---	---
<b>C3</b> Ø=75 +110 mm, L= 187.6m	0.5	44.22	46.15	<b>D3</b> Ø=63+110 mm, L= 170 m	0.5	34.66	31.15
	1	22.1	18.15		1	17.33	20.30
	2	11.05	9.95		---	---	---

**Fuente:** Elaboración propia

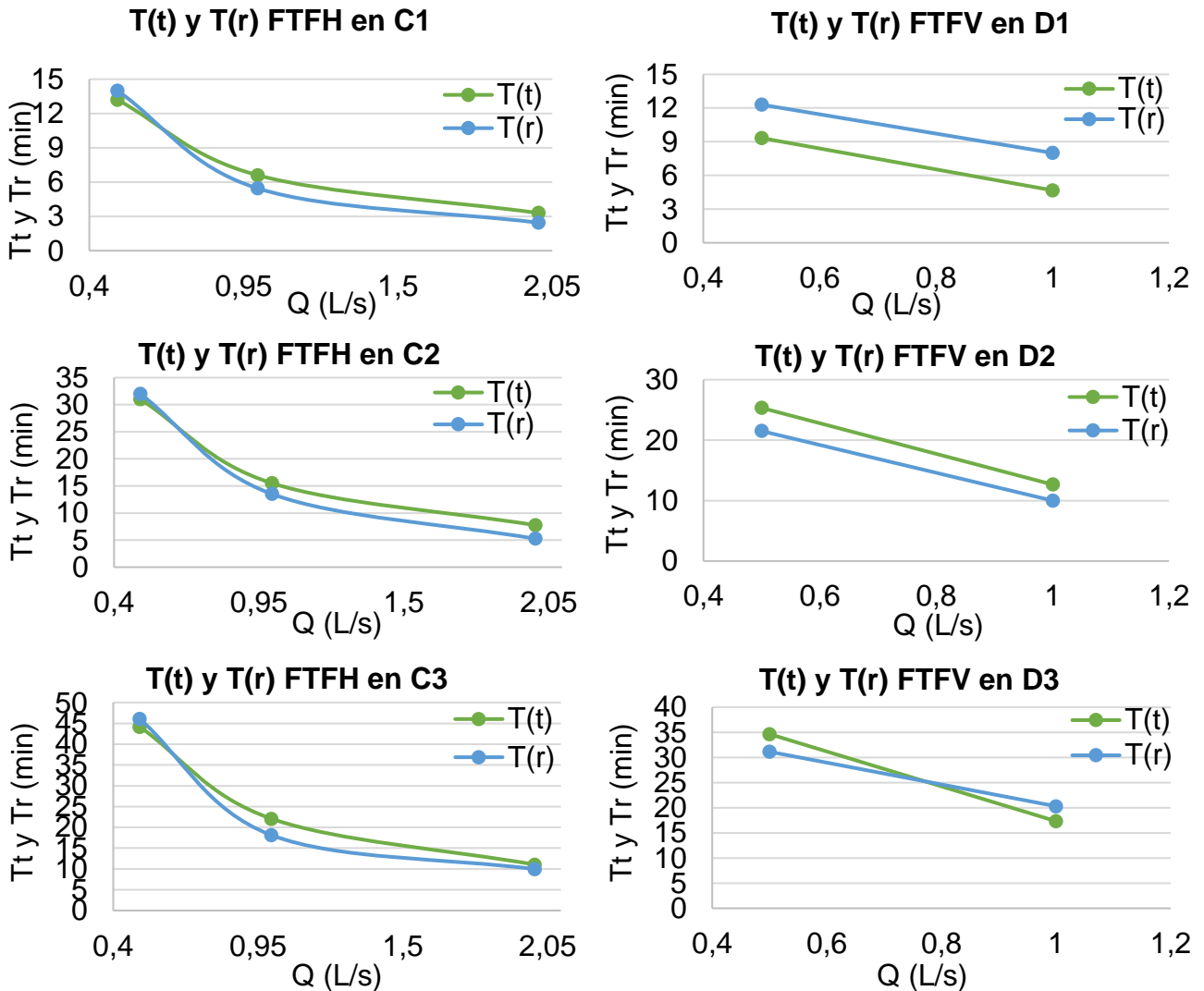
**Tabla 10.** Valores de tiempo de retención para floculadores hidráulicos convencionales según varios autores.

<b>Autor</b>	<b>Tiempos de retención (min)</b>
Fair Geyer y Okun 1968	10 a 60
Cordón y Mérida (Criterios utilizados en el diseño de la planta)	15 a 30
Babbitt and Donald	30 a 60
Hopkins 1948	15 a 30
CEPIS	10 a 30
Smethurst	10 a 60

**Fuente:** Cortés & Mora (2015), Romero Rojas (1999)

A continuación, mediante la figura 9 se visualiza los  $T_t$  y  $T_r$  vs el  $Q$  para cada configuración de ambos sistemas tubulares pilotos (FTFH y FTFV), en el que se observó que a medida que aumenta el caudal, menor es su tiempo de retención.

Los tiempos  $T_t$  y  $T_r$  fueron similares en el caso del FTFH, pero no sucede lo mismo en el FTFV, donde se ve claramente que los valores de  $T_t$  y  $T_r$  no son cercanos, esto en el caso de la configuración D1 porque los valores del  $T_t$  no está dentro del rango recomendado por la tabla 10 y en la configuración D3 existe un cruce entre las rectas de los  $T_t$  y  $T_r$  esto se debe a algún error en la medición en el  $T_r$  para un caudal de 1L/s.



**Figura 9.** Tiempos de retención teóricos y real del FTFH y FTFV

**Fuente:** Elaboración propia

### 4.1.3 Gradiente de velocidad

Para su cálculo se utilizó la ecuación 5 y en base al caudal diámetros y tiempos de retención de cada configuración se determinó el gradiente de velocidad teórico  $G_t$  y gradiente real  $G_r$ , como se puede observar en el Anexo 3. A continuación los resultados se resumen en la tabla 11.

**Tabla 11.** Gradiente de velocidad teórico y real de los dos sistemas tubulares pilotos (FTFH y FTFV).

Sistema Floculador Tubular Horizontal (FTFH)					Sistema Floculador Tubular Vertical (FTFV)				
Config	L(m)	Q(L/s)	Gt(s <sup>-1</sup> )	Gr(s <sup>-1</sup> )	Config	L(m)	Q(L/s)	Gt(s <sup>-1</sup> )	Gr(s <sup>-1</sup> )
C1	90	0.5	18.04	17.52	D1	90	0.5	40.39	35.18
		1.0	48.51	53.38			1.0	105.25	80.42
		2.0	123.62	143.47					
C2	97.6	0.5	5.38	5.3	D2	80	0.5	6.97	7.57
		1.0	15.05	16.13			1.0	19.98	22.48
		2.0	37.42	45.47					

**Fuente:** Elaboración propia

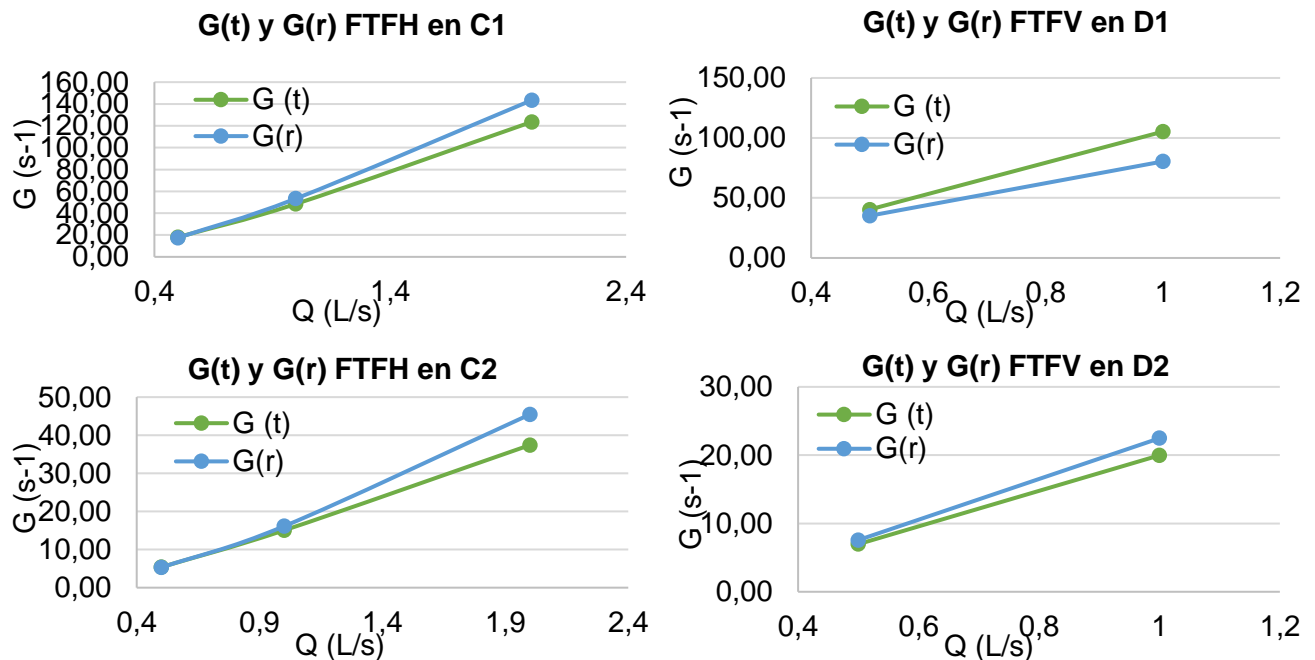
En la tabla 11, los gradientes de velocidad (G) presentaron una relación directa con respecto al caudal, es decir, a menor caudal su G es menor y viceversa. Pero no sucedió lo mismo con la longitud, ya que esta actuó de manera inversa con el G; por ejemplo, para un mismo caudal de 0.5 L/s del FTFH se tuvo que el Gt y el Gr fue menor mientras aumenta la longitud.

Según los diferentes autores mencionados en la tabla 12 y tomando como rango el valor mínimo de 10 y máximo de 100 para el G, se observó que los valores de la tabla 11 se encontraron dentro del rango recomendado, a excepción del caudal de 2 y 0.5 L/s para la configuración de C1 y C2 respectivamente; así como, para el caudal de 1 y 0.5 L/s para una configuración de D1 y D2 respectivamente. En ambos floculadores pilotos para los caudales de 2 L/s (C1) y 1L/s (D1) se obtuvo un valor alto de G, mayor a 100 s<sup>-1</sup> sugerido por la tabla 12, señalando que a gradientes altos causan la ruptura y disgregación de los flóculos ya formados debido a la acción de fuerzas de corte del líquido (Ramírez, 2022). Mientras que, para los caudales de 0.5 L/s (C2 y D2) al presentar valores menores a lo recomendado por la tabla 12, hará que los siguientes procesos como sedimentación y filtración se vean perjudicados por tener una floculación incompleta (Lastra, 2010).

Ahora bien, el gradiente de la configuración C3 está formado por los gradientes de las configuraciones C1 y C2. Mientras que, la configuración D3 está formado por

los gradientes de las configuraciones D1 y D2. Tanto en la configuración C3 como D3 el primer gradiente es mayor (C1, D1) y el segundo es menor (C2, D2), por lo que ayuda a reducir la velocidad evitando de esta manera que se rompa el flóculo, es decir en el primer tramo hubo un mayor gradiente que el segundo tramo, tal como se presenta en floculadores de pantallas (Domínguez M. , 2010).

En la figura 10, se representa los valores de los  $G_t$  y  $G_r$  en función del caudal.



**Figura 10.** Variación del gradiente de velocidad teórico y real del FTFH y FTFV en función del caudal

**Fuente:** Elaboración propia

Al comparar ambos gradientes de velocidad teóricos y reales, se observó que los  $G_r$  fueron mayores a los  $G_t$  en C1, C2 y D2, en tanto en D1 sucedió lo contrario como se observa en la figura 10, esto se debe a que los modelos matemáticos no toman en cuenta las condiciones geométricas del floculador por lo que genera valores ideales.



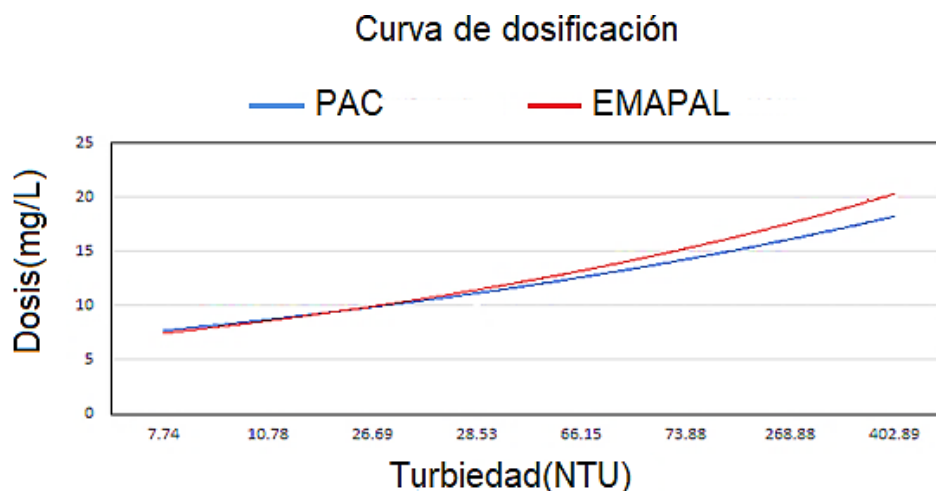
**Tabla 12.** Valores de gradiente de velocidad para floculadores hidráulicos de pantallas según varios autores.

Autor	Gradiente de velocidad ( $s^{-1}$ )
Fair Geyer y Okun 1968	20 a 75
Cordón y Mérida (Criterios utilizados en el diseño de la planta)	10 a 100
Richter 1981	10 a 70
CEPIS	20 a 70
Arboleda	10 a 100
Smethurst	20 a 100

**Fuente:** Cortés & Mora (2015), Romero Rojas (1999)

## 4.2 Dosis de coagulante

El agua cruda que ingresó a los sistemas floculadores pilotos tanto horizontal y vertical, así como al floculador de la PTAP-B fue coagulada con PAC, la misma que fue aplicada en base a una curva de dosificación elaborada previamente por la Empresa de Agua Potable de Azogues EMAPAL.



**Figura 11.** Curva de dosificación de PAC para la comparación entre la curva utilizada por la empresa EMAPAL y la que se utilizó en los sistemas tubulares pilotos.

**Fuente:** Elaboración propia

En la figura 11 se puede observar dos líneas exponenciales que representan la curva de dosificación del coagulante; la línea color roja fue elaborada previamente por le empresa EMAPAL y la línea color azul se obtuvo a partir de los datos

experimentales del presente estudio, es decir los datos de la dosis de coagulante PAC añadida antes del proceso de floculación. En esta misma figura se puede observar que para turbiedades menores a 10 NTU existe una pequeña variación de dosis de PAC entre ellas. Mientras que, para turbiedades aproximadamente de 28 NTU en adelante hay una diferencia más marcada teniendo una menor dosificación el sistema piloto que el de la curva de dosificación de EMAPAL. En turbiedades altas, superiores a los 400 NTU el exceso de coagulante es más evidente, esto genera pérdidas económicas en épocas de invierno cuando las turbiedades superan incluso los 1000 NTU.

Los datos de turbiedad de agua cruda y dosis del coagulante fueron analizados estadísticamente mediante la prueba de Shapiro Wilk que indica la normalidad de los datos, obteniendo como resultados que, los datos no tienen una distribución normal, debido a que  $p$  fue menor a 0.05, como se puede observar en el Anexo 7. De igual manera se puede corroborar en el Anexo 8 que los datos en el Q-Q Plot no se ajustan a la línea de frecuencia y el histograma no se asemeja a una campana de normalidad.

### **4.3 Turbiedad y color remanente en los sistemas tubulares pilotos implementados para el tratamiento de agua potable**

En base a los diferentes valores obtenidos en las pruebas experimentales realizadas en el FTFH y en el FTFV se determinó la estadística descriptiva hallando la media, mediana, desviación estándar, mín y máx para la turbiedad y color final medida en el sedimentador con previo uso del floculador piloto. Así mismo, se midió turbiedad y color en el filtro con previo uso del sedimentador y floculador piloto. Los resultados de la estadística descriptiva se interpretaron en un diagrama de cajas (figura 12, 13, 14 y 15), en estas figuras se representó los valores máximos, mínimos y medianas de cada configuración (C1, C2, C3 para el FTFH y D1, D2, D3 para el FTFV), así como también de la PTAP-B.

## 4.3.1 Turbiedad y color en el sedimentador con previo uso del floculador tubular de flujo horizontal (FTFH)

En la tabla 13, la media de turbiedad y color a la salida del sedimentador fue mayor en la configuración C1 que en C2 y C3 para todos los caudales; a excepción de la media para el caudal de 2 L/s, donde C2 (23.73NTU y 232.88Pt-Co) y C3 (15.75NTU y 145.25Pt-Co) fueron mayores a C1(16.18NTU y 162.38Pt-Co). Una de las razones por la que presentó una elevada turbiedad y color es que, el caudal de 2L/s supera al caudal de diseño de 1L/s del sistema experimental. Por otro lado, los valores de turbiedad y color de la PTAP-B fueron menores comparados con C1, C2 y C3, pues la media de la PTAP-B estuvo en 1.72 NTU y 13.8 Pt-Co respectivamente.

**Tabla 13.** Estadística descriptiva de la turbiedad y color en el sedimentador con previo uso del floculador tubular en función de los diferentes caudales y diámetros

Config	Q(L/s)	TURBIEDAD (NTU)					COLOR (Pt-Co)				
		Media	Me	DS	Mín	Máx	Media	Me	DS	Mín	Máx
C1	0.5	17.27	17.8	12.4	3.39	29.9	171.6	171.7	111.1	51	292
	1	15.4	5.43	20.6	4.4	46.3	153.8	101	147.0	43	370.5
	2	16.18	15.9	8.17	8.27	24.5	162.3	167.2	90.46	62	253
C2	0.5	5.45	4.47	3.10	2.92	9.96	54.88	42	31.4	34.5	101
	1	11.21	12.1	7.06	2.43	18.1	115.7	116.2	72.55	44.5	186
	2	23.73	25.4	12.1	7.43	36.5	232.8	251.2	115.6	79	350
C3	0.5	7.75	4.39	7.74	2.95	19.2	78.63	48.75	69.64	34.5	182.5
	1	15	14.3	10.8	2.62	28.7	82.08	53.05	85.88	19.2	203
	2	15.75	9.46	15.2	5.98	38.1	145.2	104.7	113.9	60.5	311
PTAP-B		1.72	1.59	12.3	0.97	22.8	13.8	13.5	38.92	2	204

Fuente: Elaboración propia

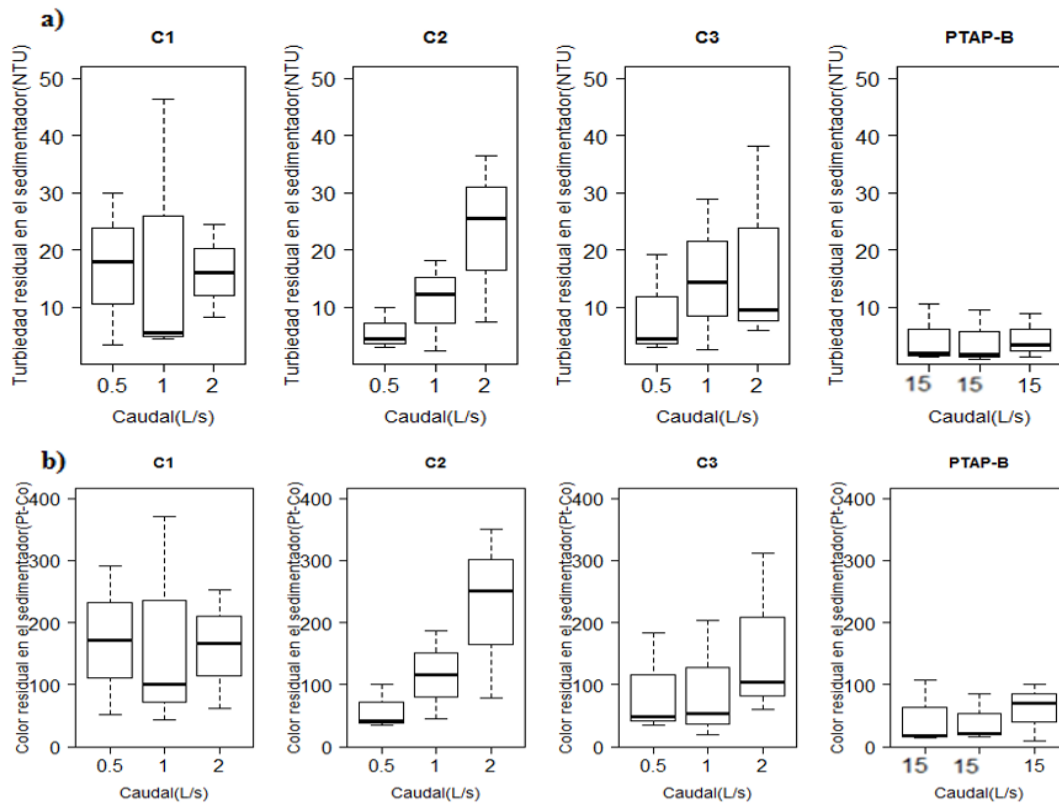
En la figura 12 se puede visualizar de mejor manera los resultados de turbiedad y color obtenidos en el sedimentador luego de que el agua ha pasado por el FTFH. En la figura 12 a) se observa que, en la configuración C1 la turbiedad máxima registrada fue de 46.35 NTU para un caudal de 1L/s y TAC menor a 522 NTU (ver

anexo 6); mientras que, en la configuración C2 la turbiedad máxima registrada fue de 36.55 NTU y en C3 fue de 38.1 NTU. Ambas configuraciones C2 y C3 para una TAC menor a 191.15 NTU y un caudal de 2L/s. Por otra parte, en la PTAP-B la turbiedad máxima fue de 22.8 NTU, con una TAC de 517 NTU. Los valores de turbiedades elevados en C2 y C3 se deben a que el caudal de 2 L/s fue superior al del diseño de 1 L/s del FTFH. Esto se puede confirmar con el estudio realizado por Méndez & Trelles (2021), en el que utilizan el mismo sistema piloto tubular y obtienen para la configuración C2 una turbiedad máxima de 31.55 NTU con una turbiedad de agua cruda menor a 200 NTU.

Ahora bien, al analizar el caudal de diseño de 1 L/s, la turbiedad es mayor en C1 (46.35NTU) respecto a C2 (18.10NTU) y C3 (28.77NTU), una de las razones es que el tiempo de retención en C1 (5.45 min) no se encontró dentro del valor recomendado por Romero Rojas (1999), por lo que no hubo el tiempo necesario para la formación del flóculo, mientras que en C2 (13.5min) y C3 (22.1min) el tiempo de retención se encontró dentro del rango (ver apartado 4.1.2). Sin embargo, al comparar C2 y C3 para el caudal de diseño (1L/s), este último presentó una turbiedad máxima elevada, esto pudo pasar que al momento de aumentar la longitud del floculador ocasionó la rotura de los flóculos como menciona Méndez & Trelles (2021) en su estudio y donde además señalaron que existe mayor turbiedad residual para el caudal de diseño en la longitud de 97.6m (16.10NTU) que para la longitud de 68.4m (10.30NTU).

En la figura 12 b) se observa que el color tiene la misma tendencia que la turbiedad. Teniendo el máximo color en C2 (350 Pt-Co) y C3 (311 Pt-Co) para el caudal de 2 L/s, mientras que en C1 el color máximo fue de 370 Pt-Co para un caudal de 1 L/s.

Al comparar los valores máximos de color de C1, C2 y C3 con los de la PTAP-B (13.5 Pt-Co), esta última es la que tiene menor color residual.



**Figura 12.** Diagrama de cajas de la turbiedad y color del sedimentador con previo uso del floculador vs los diferentes caudales para el sistema experimental y para la PTAP-B.

**Fuente:** Elaboración propia

### 4.3.2 Turbiedad y color en el filtro con previo uso del sedimentador y floculador tubular de flujo horizontal (FTFH)

En la tabla 14 se pudo observar que los valores de la media de la turbiedad como los valores de la media de color de C1, C2 y C3, así como también de la PTAP-B se encontraron dentro del límite máximo permisible de 5 NTU registrado en la normativa INEN 1108. A pesar de que estos valores de turbiedad cumplieron con la normativa, se debe tener presente que, para caudales de 2 L/s en todas las configuraciones existe una mayor turbiedad. Esto se puede comprobar con el estudio realizado por Méndez & Trelles (2021), donde obtuvieron a la salida del filtro

para la misma configuración C2 y con un caudal de 2 L/s una media de 0.63 NTU y 1 Pt-Co. Una de las razones es por lo mencionado anteriormente en el apartado 4.3.1, en el que, se señaló que el caudal de 2 L/s supera al caudal de diseño (1L/s), por tanto, los tiempos de retención disminuyeron ocasionando una mala formación de los flóculos y colmatando de esta manera el filtro piloto rápidamente.

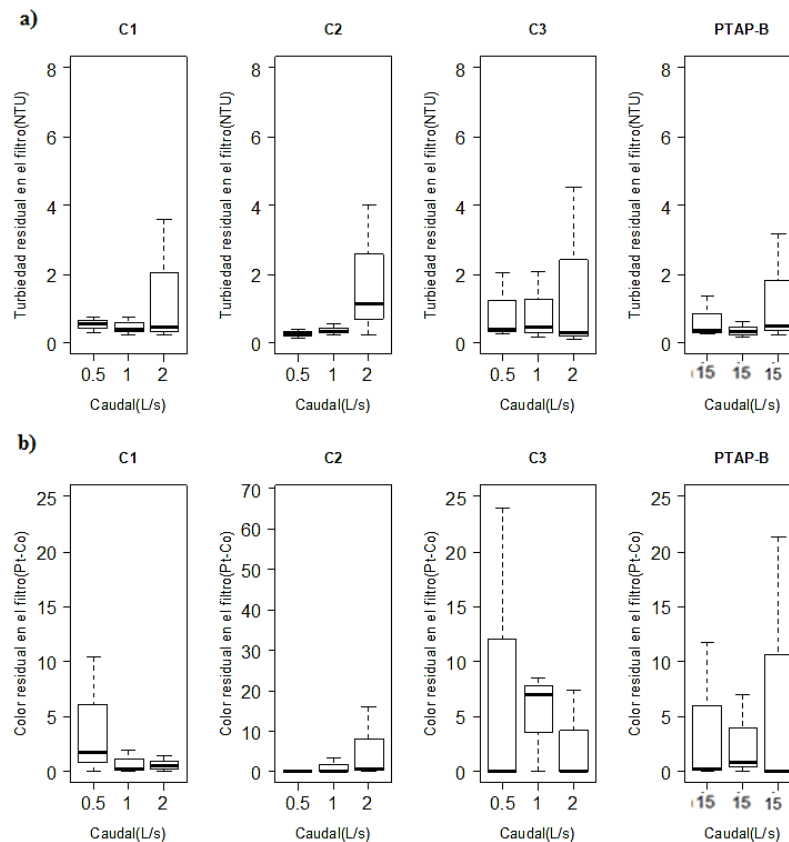
**Tabla 14.** Estadística descriptiva de la turbiedad y color en el filtro con previo uso del sedimentador que tiene un sistema de FTFH en función de los diferentes caudales y diámetros.

Config	Q(L/s)	TURBIEDAD (NTU)					COLOR (Pt-Co)				
		Media	Me	DS	Mín	Máx	Media	Me	DS	Mín	Máx
C1	0.5	0.55	0.56	0.26	0.3	0.78	3.5	1.75	4.95	0	10.5
	1	0.46	0.42	0.24	0.25	0.77	0.63	0.25	0.95	0	2
	2	1.19	0.47	1.62	0.23	3.62	0.63	0.5	0.75	0	1.5
C2	0.5	0.26	0.26	0.13	0.13	0.4	0	0	0	0	0
	1	0.37	0.33	0.14	0.25	0.56	0.88	0	1.75	0	3.5
	2	1.63	1.14	1.78	0.25	4	4.25	0.5	7.85	0	16
C3	0.5	0.77	0.4	0.85	0.26	2.04	6	0	12	0	24
	1	0.79	0.46	0.89	0.17	2.09	5.63	7	4.01	0	8.5
	2	1.32	0.3	2.16	0.12	4.55	1.88	0	3.75	0	7.5
PTAP-B		0.40	0.39	1.28	0.12	3.86	1.5	1.5	10.3	0	23

Fuente: Elaboración propia

Para una mejor comprensión se presenta la figura 13 a) y 13 b) en donde se mostró los resultados de las medianas, mínimos y máximos de turbiedad y color residual respectivamente obtenidos en el filtro. En todas las configuraciones del sistema piloto se visualizó, que para caudales de 2 L/s y una TAC menor a 376.5 NTU, hubo valores ligeramente elevados a diferencia de los caudales de 1 y 0.5 L/s. Esto se debe a que los Tr no se encuentran dentro del rango recomendado por Romero Rojas (1999), pues están por debajo de 10 min debido a que el caudal de 2 L/s

supera al caudal de diseño. Por otro lado, en la PTAP-B, los valores se encontraron por debajo de los valores obtenidos en el sistema piloto tanto en la turbiedad y color.



**Figura 13.** Diagrama de cajas de turbiedad y color del filtro del sistema experimental vs la planta de tratamiento de Bayas para diferentes caudales.

**Fuente:** Elaboración propia

### 4.3.3 Turbiedad y color en el sedimentador con previo uso del floculador tubular de flujo vertical (FTFV)

En la tabla 15 la media de la turbiedad para los caudales 0.5 y 1 L/s en las configuraciones D1(6.16 y 8.7NTU), D2(3.43 y 6.26NTU) y D3(3.33 y 3.82NTU) respectivamente, presentó una menor turbiedad residual en D3, seguido de D2 y D1. Esto se debe a que, a un mayor diámetro de tubería, existe mayor tiempo de retención y menor gradiente de velocidad. Por lo que, habrá menor turbulencia en el líquido y un alto tiempo de retención, lo que ayuda a que se estructure de mejor forma el flóculo.

De manera similar se observó para el color, en el que, se registró los siguientes valores de las medias en D1(67.5 y 70 Pt-Co), D2(36.13 y 64.25 Pt-Co) y D3(41 y 56.38Pt-Co), todos estos valores de color residual se obtuvieron para un caudal de 0.5 y 1 L/s respectivamente y se pudo diferenciar nuevamente que D3 tiene menor color residual que en D1 y D2.

**Tabla 15.** Estadística descriptiva de la turbiedad y color del sedimentador con previo uso del FTFV en función de los diferentes caudales y diámetros.

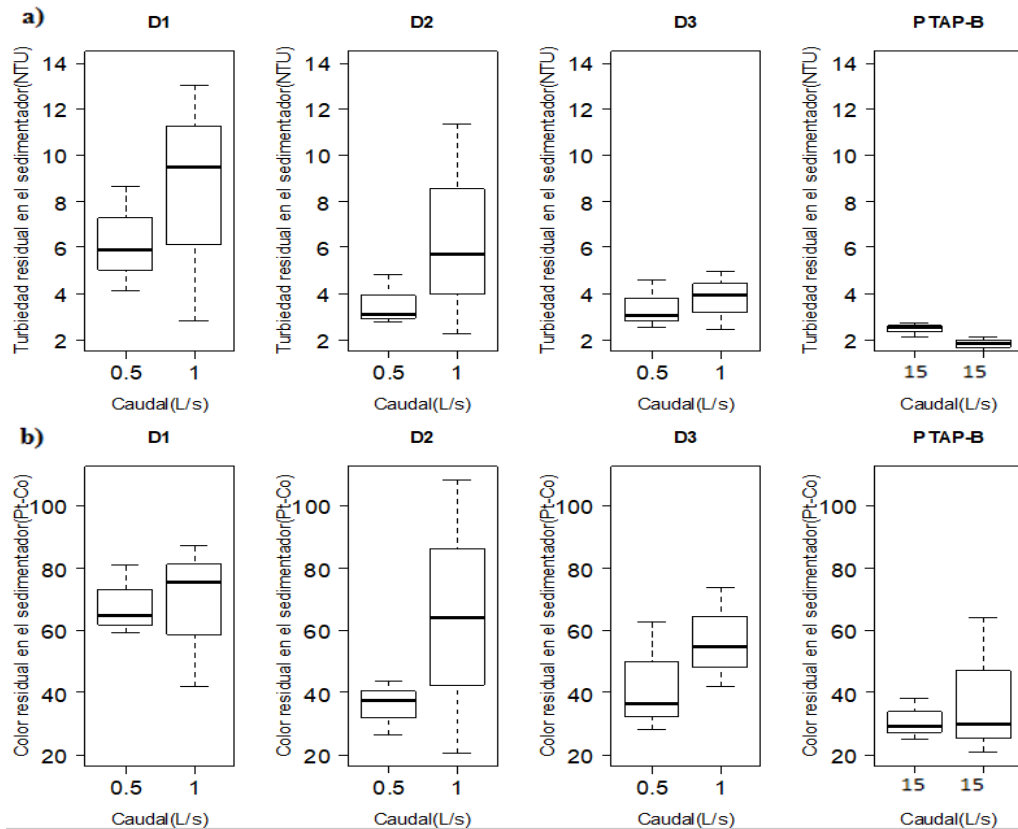
Config	Q(L/s)	TURBIEDAD (NTU)					COLOR (Pt-Co)				
		Media	Me	DS	Mín	Máy	Media	Me	DS	Mín	Máy
D1	0.5	6.16	5.93	2	4.11	8.66	67.5	65	9.75	59	81
	1	8.7	9.47	4.56	2.83	13.03	70	75.5	20.2	42	87
D2	0.5	3.43	3.09	0.96	2.76	4.8	36.13	37.2	8.48	26.5	43.5
	1	6.26	5.72	4.34	2.26	11.35	64.25	64	41.5	20.5	108.5
D3	0.5	3.33	3.06	0.9	2.56	4.63	41	36.7	15.0	28	62.5
	1	3.82	3.93	1.07	2.44	4.99	56.38	54.7	13.7	42	74
PTAP-B	15	1.26	1.45	1.89	0.29	2.36	34	26.2	8.36	22	68

**Fuente:** Elaboración propia

En la figura 14 a) y 14 b) se muestra un diagrama de cajas que representó la mediana, máx y min de los datos de turbiedad y color residual respectivamente, obtenidos en el sedimentador piloto con previo uso del FTFV, así como los datos de turbiedad y color obtenidos en el sedimentador de PTAP-B. En esta figura se observa que hay una mayor turbiedad y color residual en D1, D2 y D3 para un caudal de 1 L/s que en 0.5 L/s, estos valores fueron obtenidos para una TAC menor a 355.5 NTU y color de agua cruda de 3035 Pt-Co. También se observó que al comparar las 3 configuraciones para caudales de 0.5 L/s y 1 L/s, fue menor en la configuración D3 con respecto a D2 y D1. Indicándonos de esta manera que a medida que aumenta la longitud, la turbiedad y el color residual disminuye en gran medida a la



salida del sedimentador piloto. Por otro lado, el sedimentador de la PTAP-B presento una turbiedad y color residual menores al sistema piloto.



**Figura 14.** Diagrama de cajas de la turbiedad y color del sedimentador con previo uso del FTFV vs los diferentes caudales.

**Fuente:** Elaboración propia

De acuerdo con el estudio realizado por Novoa & Tenezaca (2021) en el mismo FTFV, los valores de las medias de turbiedad y color remanente fueron mayores al disminuir la longitud. Para el caudal de 1 L/s que es el caudal de diseño, los valores de turbiedad residual fueron 10.42 NTU y 9.87 NTU para longitudes de 58 m y 80 m respectivamente. En la tabla 15 se observa que la turbiedad y color remanente en el sedimentador fue proporcional al caudal empleado, es decir a mayor caudal existió mayor turbiedad y color remanente en el sedimentador. Una de las razones es que a mayor caudal existió menor  $Tr$  y mayor  $Gr$ , por lo tanto, la agitación del fluido al interior del FTFV y el corto tiempo de retención afecta a la formación y estructuración del floculo.

#### 4.3.4 Turbiedad y color en el filtro con previo uso del sedimentador y floculador tubular de flujo vertical (FTFV)

En la tabla 16 se observó que los valores de las medias de turbiedad a la salida del filtro piloto no tienen mucha diferencia entre D1, D2, D3 y la PTAP-B, pues se mantienen en un rango de 0.37 a 0.73 NTU, cumpliendo con la normativa INEN 1108 que señalan que el límite máximo permisible es de 5 NTU. De la misma manera se señaló que los valores de la media para el color todos cumplen con lo recomendado en la normativa INEN 1108 que tiene como límite máximo 15 Pt-Co.

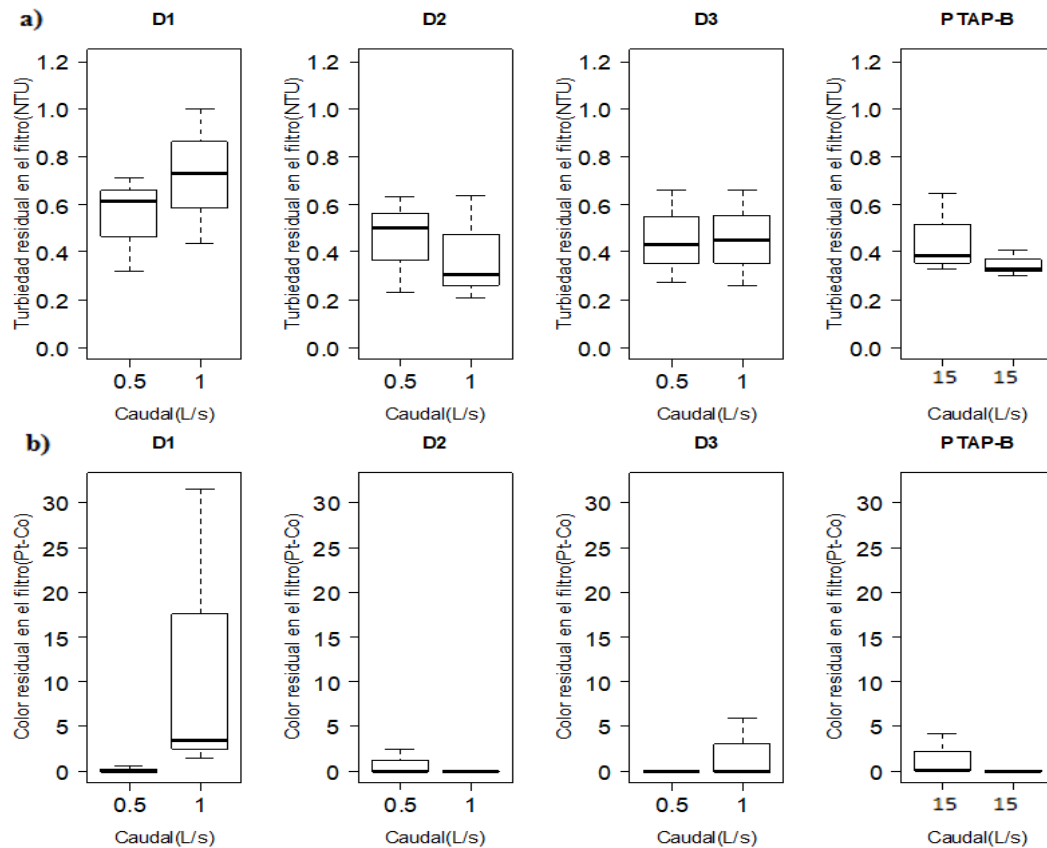
Los valores de las medias de turbiedad y color residual más altos fueron para el caudal de diseño de 1 L/s, tanto en la configuración D1 (0.73 NTU y 7 Pt-Co) y D3 (0.46 NTU y 6 Pt-Co). Esto se pudo comprobar con el estudio realizado por Novoa & Tenezaca (2021), en el que señalan también que los valores más altos de turbiedad y color en el filtro fueron para ese mismo caudal (1L/s), tanto con la longitud de 58m (0.43 NTU y 0.4 Pt-Co) y 80 m (0.3 NTU y 0.2 Pt-Co). Sin embargo, no sucedió lo mismo con D2, pues a menor caudal (0.5 L/s), existió mayor turbiedad 0.47 NTU y color 0.63 Pt-Co, a pesar de ello, si cumple con la normativa INEN 1108.

**Tabla 16.** Estadística descriptiva de la turbiedad y color del filtro del sistema experimental en función de los diferentes caudales.

Config	Q (L/s)	TURBIEDAD (NTU)					COLOR (Pt-Co)				
		Media	Me	DS	Mín	Máx	Media	Me	DS	Mín	Máx
D1	0.5	0.56	0.61	0.17	0.32	0.71	0.13	0	0.25	0	0.5
	1.0	0.73	0.73	0.25	0.44	1	7.0	3.5	14.3	1.5	31.5
D2	0.5	0.47	0.5	0.17	0.23	0.63	0.63	0	1.25	0	2.5
	1.0	0.37	0.31	0.2	0.21	0.64	0	0	0	0	0
D3	0.5	0.45	0.44	0.16	0.27	0.66	0	0	0	0	0
	1.0	0.46	0.45	0.18	0.26	0.66	1.5	0	3	0	6
PTAP-B		0.4	0.49	0.14	0.26	0.64	1	0	0	0	3

Fuente: Elaboración propia

En la figura 15 se registraron los valores de la mediana, mínima y máxima de turbiedad y color residual a la salida del filtro piloto. En la figura 15 a) se visualizó que la turbiedad de las 3 configuraciones al comparar con los de PTAP-B indicó que estos valores del sistema piloto estuvieron cercanos a los de la PTAP-B, registrándose valores menores a 0.71 NTU, por lo que, ambos sistemas se encuentran dentro del límite permisibles de turbiedad (5 NTU) recomendado en la normativa INEN 1108. En la figura 15 b) de la misma manera el color en D1, D2 y D3 se registraron valores similares al de la PTAP-B, aquí el color fue menor a 3.5 Pt-Co, cumpliendo con la normativa INEN 1108 de 15 Pt-Co, pero no con el valor máximo de color de la configuración D1(31.5 Pt-Co), una razón puede ser que no se realizó la lectura correctamente en una de las pruebas.



**Figura 15.** Diagrama de cajas de la turbiedad y color del filtro con previo uso del sedimentador vs los diferentes caudales.

**Fuente:** Elaboración propia

## **4.4 Eficiencia de remoción de turbiedad y color de los dos sistemas pilotos (FTFH y FTFV)**

Se determinó la media, Me (mediana), DS (desviación estándar), Mín (mínima) y Máx (máxima) de la eficiencia de turbiedad y color a la salida del sedimentador con previo uso del floculador tubular piloto; así como la eficiencia a la salida del filtro piloto. Esto se aplicó para los dos sistemas tubulares FTFH y FTFV, al igual que para la PTAP-B, ver Anexo 6.

Los resultados de la estadística descriptiva se representaron en dos diagramas, el primero que pertenece al diagrama de cajas se expresó los valores máximos, mínimos y medianas de cada configuración (C1, C2, C3 para el FTFH y D1, D2, D3 para el FTFV) y de la PTAP-B, mientras que el segundo diagrama de barras se presentó las medias del sistema piloto y de la PTAP-B.

### **4.4.1 Eficiencia en el sedimentador con previo uso del floculador tubular de flujo horizontal (FTFH)**

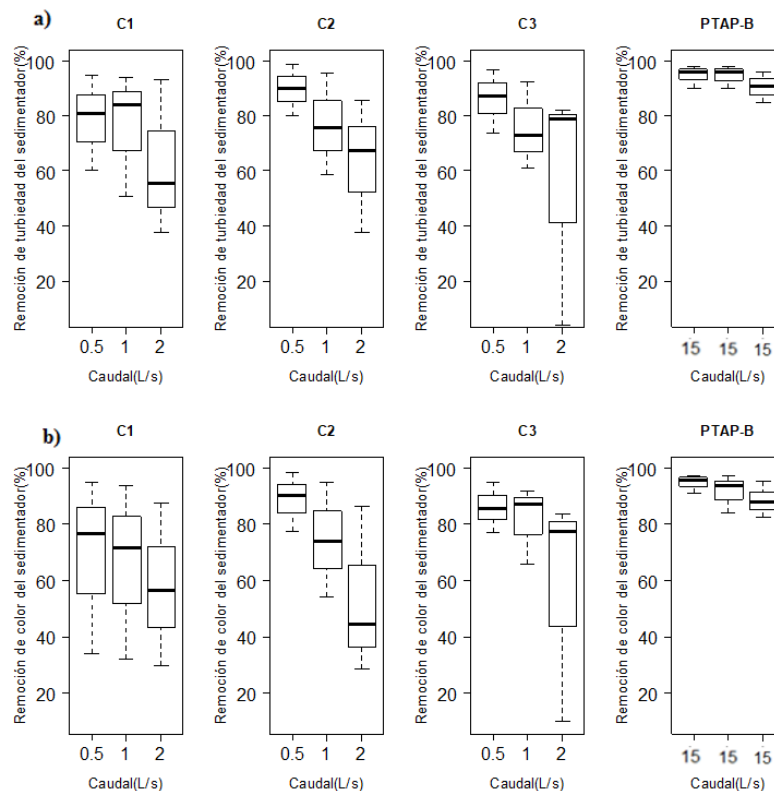
En la tabla 17 y figura 16, se observa que la eficiencia de turbiedad y color disminuye al aumentar el caudal. Esto se debe por tener caudales mayores, el Tr es bajo y el Gr es alto por lo que existe una mayor turbulencia en el interior del fluido impidiendo que el floc se compacte y estructure.

La mínima eficiencia de turbiedad y color se presentó en el caudal de 2 L/s para C1, C2 y C3, esto por lo mencionado en el apartado 4.3.1 del presente estudio, que indicó que existió una sobrecarga en el sedimentador pues sobrepasaba al caudal de diseño (1 L/s). Para el caso de la PTAP-B la eficiencia de turbiedad y color fue mejor que del sistema piloto, presentando eficiencias mayores al 90%.

**Tabla 17.** Estadística descriptiva de la turbiedad y color del sedimentador con previo uso del FTFH en función de los diferentes caudales y diámetros.

Config	Q (L/s)	TURBIEDAD (NTU)					COLOR (Pt-Co)				
		Media	Me	DS	Mín	Máx	Media	Me	DS	Mín	Máx
C1	0.5	80.09	80.6	30.2	60.2	94.8	70.67	76.7	24.4	34.0	95.25
	1	74.84	83.88	19.8	50.6	94.2	67.41	71.8	28.6	31.9	94.04
	2	60.56	55.57	26.6	37.5	93.49	57.49	56.4	24.1	29.4	87.64
C2	0.5	86.3	90.26	8.03	80.1	98.6	85.86	90.1	9.05	77.6	98.24
	1	76.6	75.82	15.1	59.0	95.75	74.46	74.1	16.7	54.3	95.12
	2	60.8	67.36	34.7	37.5	85.59	57.35	44.3	33.0	28.2	86.49
C3	0.5	89.82	87.43	10.7	73.7	96.54	89.07	85.5	9.37	77.3	94.89
	1	78.15	72.98	13.9	60.7	92.6	82.99	87.1	11.7	65.6	92.06
	2	60.93	78.94	37.9	4.01	81.85	58.12	77.5	35.0	9.7	83.65
PTAP-B		93.61	94.3	4.46	84.9	97.97	91.87	92.5	4.91	82.2	97.2

Fuente: Elaboración propia



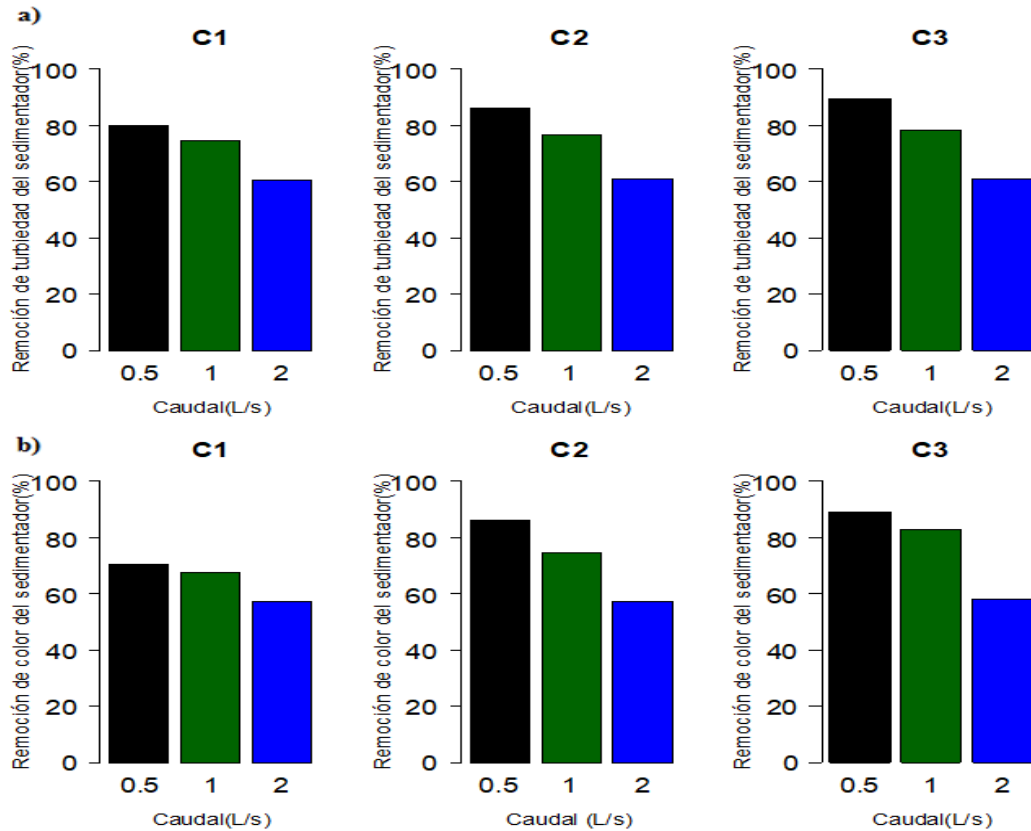
**Figura 16.** Diagrama de cajas de la eficiencia de turbiedad y color del sedimentador con previo uso del floculador vs los diferentes caudales para el sistema experimental y la PTAP-B

Fuente: Elaboración propia

# UCUENCA

En la figura 17 a) se pudo identificar que la media de la eficiencia de turbiedad para los caudales 0.5 y 1 L/s en las configuraciones C1 (80.09 y 74.84%), C2 (86.3 y 76.6%) y C3 (89.82 y 78.15%) respectivamente, presentándose buena remoción, con el caudal de 0.5L/s con valores arriba del 80%. Pero no sucedió lo mismo con el caudal de 2 L/s, puesto que presentaron eficiencias bajas por debajo del 70%, esto se debe a lo ya mencionado en el párrafo anterior. También, se observó que a mayor longitud la eficiencia es mejor debido a que incrementó los tiempos de retención, esto en el caso del caudal de 0.5 y 1 L/s que se pudo evidenciar claramente. Para el caudal 2 L/s existe una diferencia mínima de eficiencia entre las longitudes, sin embargo, cumplen con lo establecido en el estudio realizado por Méndez & Trelles (2021), quienes recomendaron que para mejorar la eficiencia en un caudal de 2 L/s se necesitará de una longitud mayor a 70 m.

En la figura 17 b) se observa que los valores de la media en la eficiencia del color siguen el mismo patrón que los valores de turbiedad, es decir, el mayor porcentaje de eficiencia de color se obtuvo en las medias de la configuración C3, seguido de la C2 y C1 con valores 89.07%, 85.86% y 70.67% de remoción respectivamente con un caudal de 0.5 L/s. Para caudales de 1 L/s se mantiene la tendencia, observándose que la eficiencia en C3 es superior a C2 y C1, mientras que para caudales de 2 L/s no se observa una diferencia significativa entre las configuraciones.



**Figura 17.** Diagrama de barras que representan las medias de la eficiencia de turbiedad y color del sedimentador con previo uso del FTFH vs los diferentes caudales.

**Fuente:** Elaboración propia

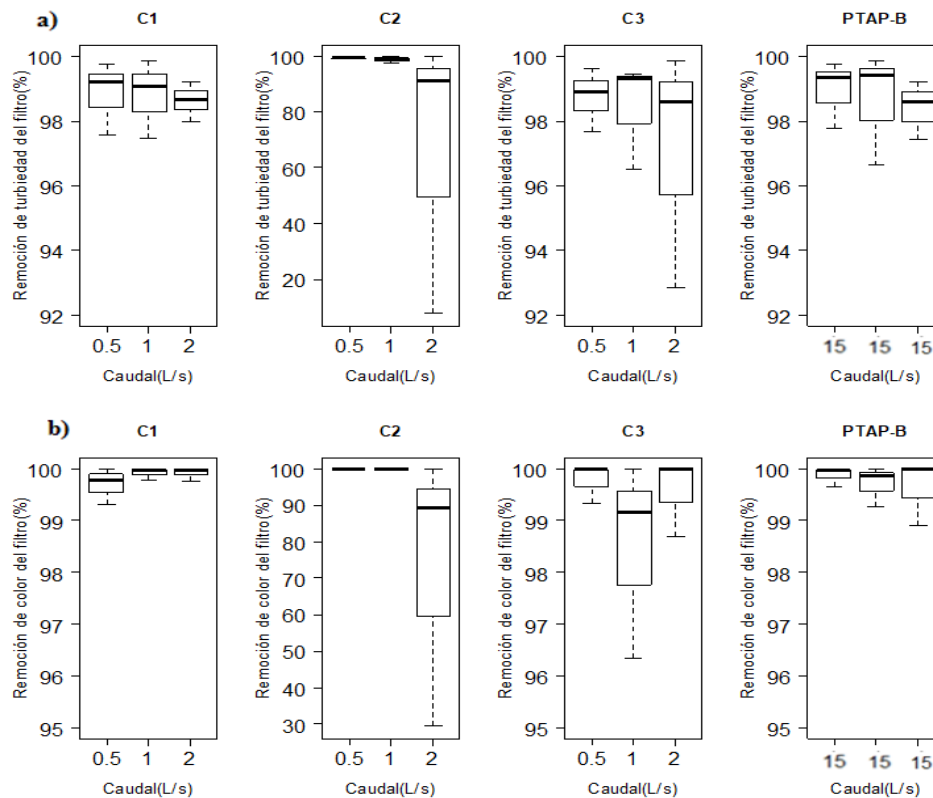
#### 4.4.2 Eficiencia en el filtro con previo uso del sedimentador y FTFH

En la tabla 18 y figura 18 se observa que la eficiencia de turbiedad y color a la salida del filtro previo al uso del sedimentador fue excelente. Esta eficiencia pudo ser comparada con el de la PTAP-B, pues ambos sistemas se encontraron con valores de mediana por encima del 98% para turbiedad y 99% para color. También, se pudo observar cómo los valores de las medianas, mín y máx de las eficiencias de turbiedad y color presentaron un comportamiento similar entre C1, C2 y C3.

**Tabla 18.** Estadística descriptiva de la turbiedad y color del filtro con previo uso del sedimentador que tienen un sistema de FTFH en función de los diferentes caudales y diámetros.

Config	Q (L/s)	TURBIEDAD (NTU)					COLOR (Pt-Co)				
		Media	Me	DS	Mín	Máx	Media	Me	DS	Mín	Máx
C1	0.5	98.94	99.2	0.95	97.5	99.73	99.73	99.8	0.34	99.3	100
	1	98.86	99.06	1.02	97.4	99.85	99.93	99.9	0.1	99.7	100
	2	98.64	98.67	0.58	97.9	99.2	99.9	99.9	0.11	99.7	100
C2	0.5	99.37	99.29	0.46	98.9	99.9	100	100	0	100	100
	1	98.83	99.08	1.14	97.2	99.8	99.9	100	0.05	99.9	100
	2	72.64	91.5	43.9	7.7	99.8	77.1	89.4	33.2	29.5	100
C3	0.5	98.78	98.9	0.9	97.6	99.6	99.8	100	0.34	99.3	100
	1	98.65	99.32	1.43	96.5	99.4	98.6	99.1	1.64	96.3	100
	2	97.46	98.58	3.16	92.8	99.8	99.6	100	0.64	98.7	100
PTAP-B		98.78	99.11	1.03	96.6	99.8	99.7	99.9	0.35	98.9	100

Fuente: Elaboración propia



**Figura 18.** Diagrama de cajas de la eficiencia de turbiedad y color del filtro con previo uso del sedimentador vs los diferentes caudales.

Fuente: Elaboración propia

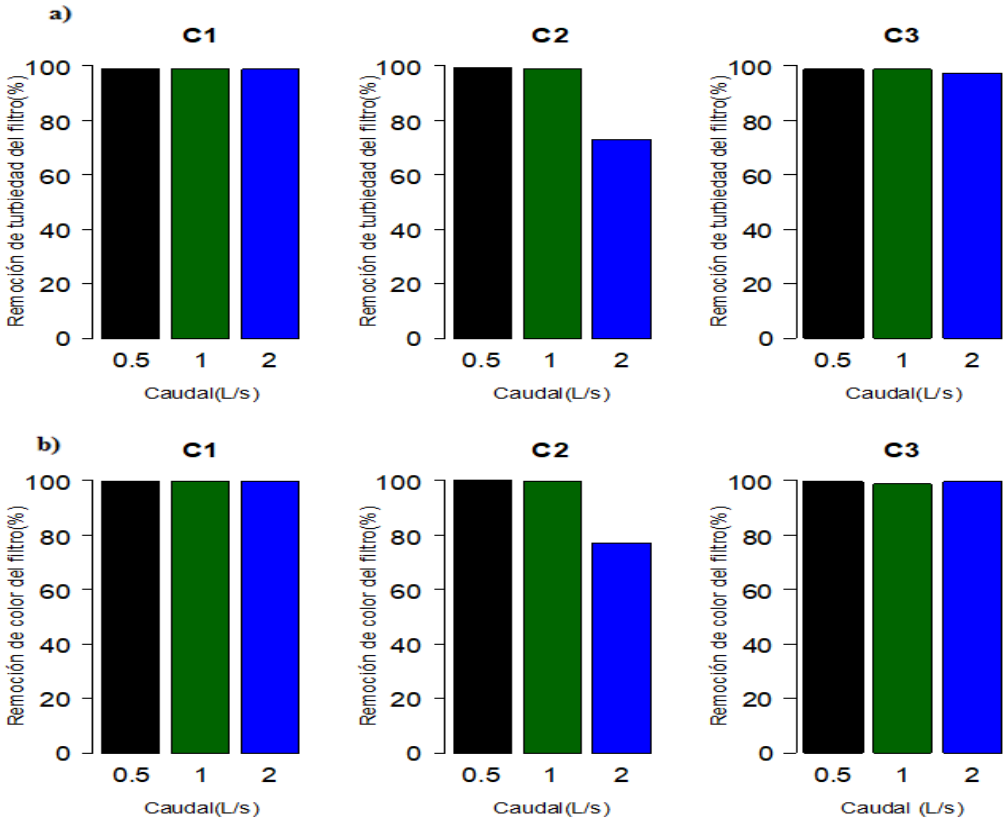


# UCUENCA

En la figura 19 a) se observa que para los diferentes caudales experimentados 0.5, 1 y 2 L/s, la eficiencia de turbiedad presentó un comportamiento similar en C1 y C3, pues los valores de la media de eficiencia de turbiedad fueron superiores a 97.46%. Pero no sucedió lo mismo con la configuración C2 para el caudal de 2 L/s, donde la eficiencia de turbiedad fue de 72.64%, siendo la menor eficiencia al comparar con el resto de configuraciones.

Una de las razones es por lo mencionado en el apartado 4.3.2, en el que se observó que en C2 al presentar una turbiedad residual elevado de 1.63 NTU que es un valor mayor al resto de las configuraciones (C1 y C3) y al tener un caudal de 2 L/s superior al caudal de diseño de 1 L/s, hizo que el filtro se saturara, debido a que los tiempos de retención no se encontraban dentro del rango recomendado de 10-60 min ocasionando una mala formación de los flóculos.

En la figura 19 b) se puede visualizar que los datos de eficiencia de color siguieron el mismo patrón que los valores de eficiencia de turbiedad, es decir, que las configuraciones tuvieron eficiencias cercanas al 100% para C1 y C3 con todos los caudales y para C2 con caudales de 1 y 0.5 L/s. Pero C2 con el caudal de 2 L/s fue de 77.1%, esto pudo ser como se mencionó en el párrafo anterior y como se observó en el apartado 4.3.2 que tuvo un color residual de 32.38 Pt-Co que es un valor superior al resto de configuraciones.



**Figura 19.** Diagrama de barras que representan las medias de la eficiencia de turbiedad y color del filtro con previo uso del sedimentador vs los diferentes caudales.

**Fuente:** Elaboración propia

Según un estudio realizado por Gil Solano & López (2009) en Colombia, usaron PAC como coagulante en remplazo del sulfato de aluminio en la planta potabilizadora de la ciudad de Popayán, se obtuvo como resultado una remoción de un 93% de remoción de turbiedad previo uso de un floculador hidráulico de pantallas de flujo horizontal y filtro, que en comparación con los resultados del presente estudio la eficiencia fue menor a la media registrada en todas las configuraciones y caudales; excepto para la configuración C2 con caudal de 2 L/s.

## 4.4.3 Eficiencia en el sedimentador con previo uso del floculador tubular de flujo vertical (FTFV)

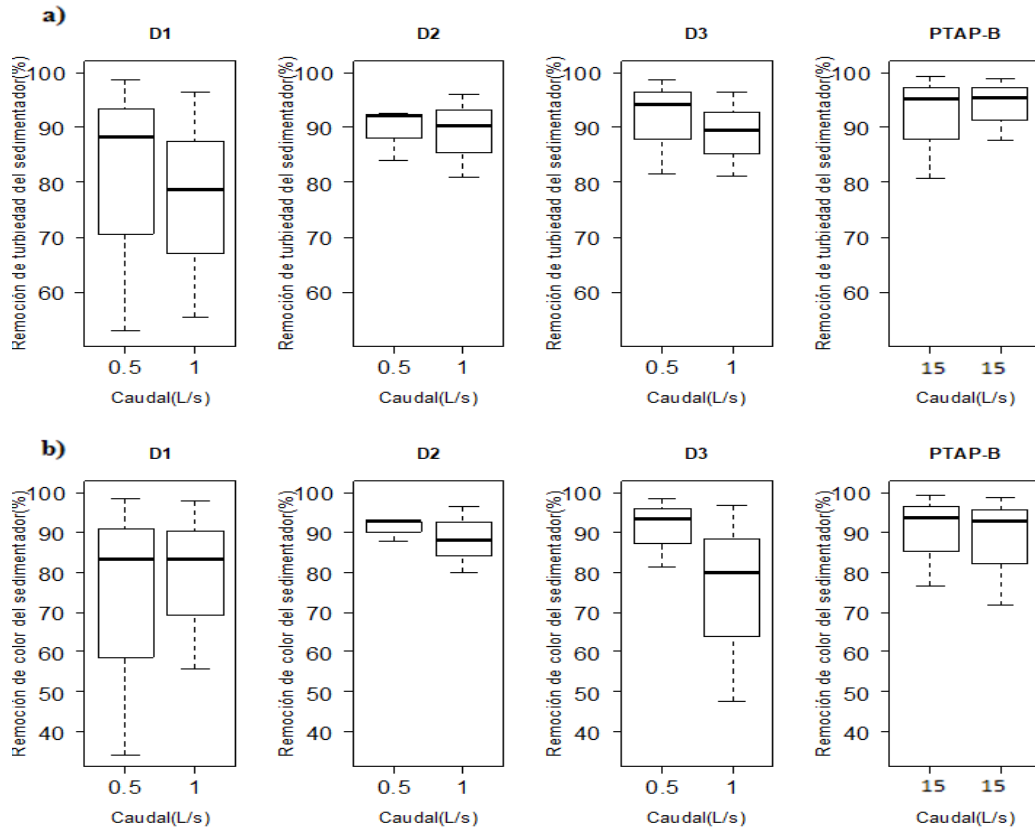
En la tabla 19 y en la figura 20, los valores de la mediana, mín y máx de la eficiencia de turbiedad y color fueron mayores para un caudal de 0.5L/s en D1, D2 y D3. Esta última (D3) tuvo la máxima eficiencia entre las otras configuraciones con un 98.71% de remoción de turbiedad y 98.4% para la remoción de color, estas para un caudal de 0.5L/s.

También, se observó que los valores de la mediana de eficiencia de turbiedad y color de las configuraciones D2 y D3 estuvieron cercanos a los valores de la PTAP-B, pues estos valores se encontraron en un rango de 90-95% de remoción de turbiedad y 80-93% para el color.

**Tabla 19.** Estadística descriptiva de la turbiedad y color del sedimentador con previo uso del FTFV en función de los diferentes caudales y diámetros.

Config	Q(L/s)	TURBIEDAD (NTU)					COLOR (Pt-Co)				
		Media	Me	DS	Mín	Máx	Media	Me	DS	Mín	Máx
D1	0.5	81.99	88.2	19.9	52.9	98.6	74.82	83.2	27.9	34.3	98.4
	1	77.24	78.5	19.3	55.5	96.3	79.93	83.0	19.2	55.7	97.74
D2	0.5	90.05	92.1	3.67	84.0	92.51	90.54	92.7	2.25	87.8	92.57
	1	89	90.3	7.03	80.7	95.98	89.24	88.2	7.28	80.1	96.5
D3	0.5	92.05	93.9	7.66	81.5	98.71	91.46	93.1	7.58	81.1	98.4
	1	89.03	89.4	7.78	81.0	96.28	76.16	80.0	23.8	47.8	96.7
PTAP-B		93.4	95.1	6.7	80.6	99.30	89.87	93.1	10.8	71.6	99.27

Fuente: Elaboración propia



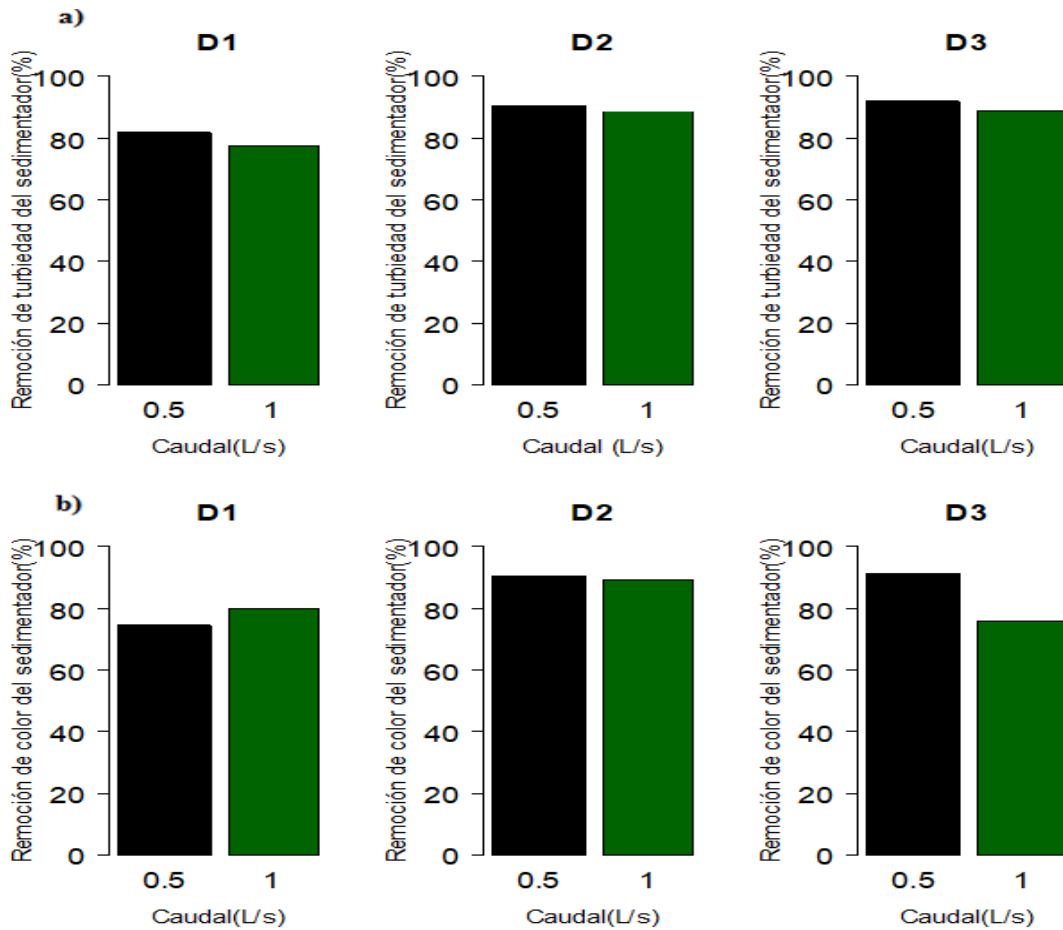
**Figura 20.** Diagrama de cajas de la eficiencia de turbiedad y color del sedimentador con previo uso del FTFV vs los diferentes caudales.

**Fuente:** Elaboración propia

En la figura 21 a) se observa que la media en la eficiencia de turbiedad presentó una excelente remoción para el caudal menor (0.5 L/s), esto se debe a que al aumentar el  $Tr$  y disminuir el  $Gr$  se obtiene mejores resultados. También, se visualizó que a medida que incrementa la longitud la eficiencia es mejor. Siendo D3 con valores de 92.05% para un caudal de 0.5 L/s y 89.03% para 1 L/s, la configuración que presentó una mayor eficiencia de turbiedad. Seguido de D2(90.05% para 0.5 L/s y 89% para 1 L/s) y D1(81.99% para 0.5 L/s y 77.24% para 1 L/s).

En la figura 21 b) se representó la eficiencia de remoción de color y se observó que los valores de la media siguen el mismo patrón que los valores de eficiencia de turbiedad, es decir, la eficiencia disminuyó al aumentar el caudal esto para cada

configuración, excepto para la configuración D1 con un caudal 0.5 L/s, en el que se observó que la media de color con 1 L/s (79.93%), presentó un mayor valor de eficiencia que el caudal de 0.5 L/s (74.82%), esto pudo ser por un error en la lectura de la medición de color.



**Figura 21.** Diagrama de barras que representan las medias de la eficiencia de turbiedad y color del sedimentador con previo uso del FTFV vs los diferentes caudales.

**Fuente:** Elaboración propia

Según un estudio realizado por Núñez Camacho (2015), en una planta de agua potable, ubicada en Uyumbicho, utilizaron un floculador hidráulico vertical y como coagulante PAC. Como resultado obtuvieron una eficiencia máxima de 81% con un  $G$  igual a  $30 \text{ s}^{-1}$  y un tiempo de retención de 15 minutos. A diferencia de este estudio que se obtuvo en la unidad de sedimentación previo uso del FTFV una eficiencia de

turbiedad máxima de 98.71% para la configuración D3 con un caudal de 0.5 L/s y un G de 42.75 s<sup>-1</sup> y tiempo de retención de 31.15 min. Esto demuestra que ambos estudios presentaron buenas eficiencias a la salida del sedimentador, mayores al 81%, porque los parámetros hidráulicos se encontraron dentro del rango recomendado por los autores en la tabla 10 y 11.

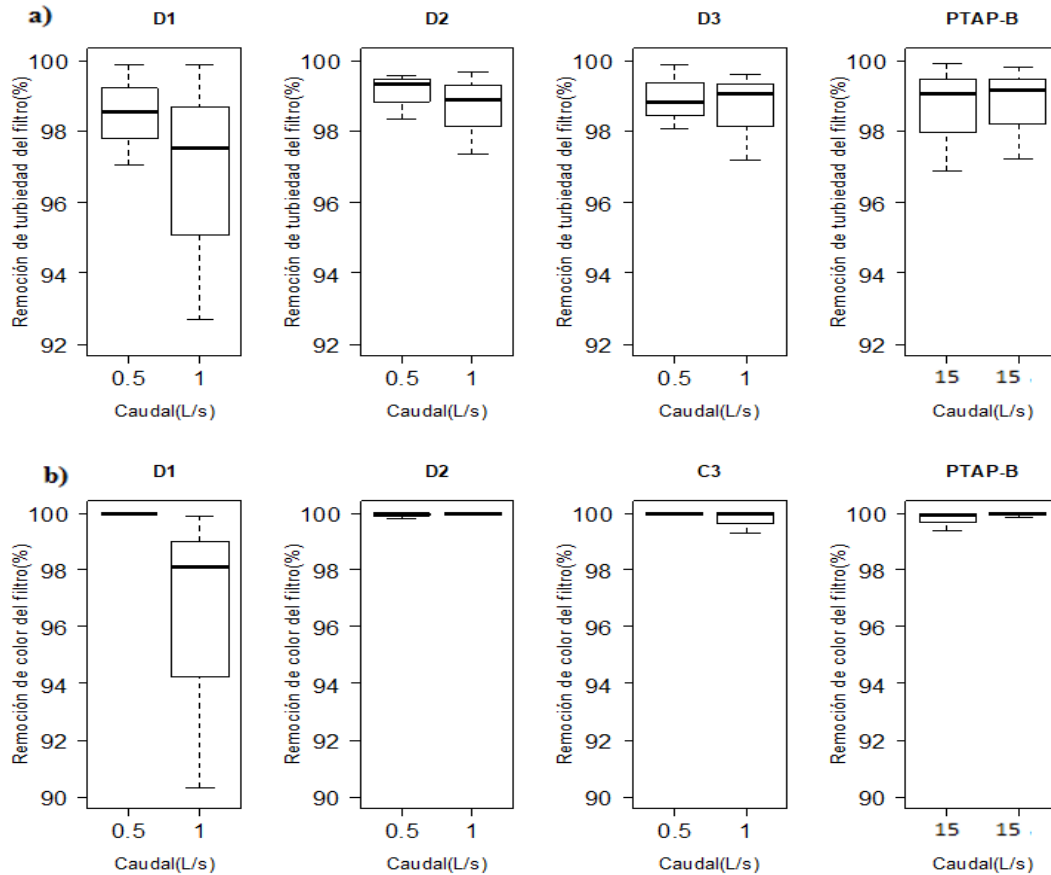
#### 4.4.4 Eficiencia en el filtro con previo uso del sedimentador y FTFV

En la tabla 20, los valores de las medianas, mínimos y máximos en D1, D2 y D3, presentaron eficiencias de turbiedad y color similares al de la PTAP-B, puesto que tuvieron valores superiores al 90%, lo que señalo que el filtro piloto presentó una buena eficiencia.

Al comparar ambos sistemas el valor mínimo fue 92.6% para eficiencia de turbiedad y 90.34% para eficiencia de color, estos valores correspondieron a D1 para un caudal de 1 L/s, sin embargo, no presenta gran significancia ante los otros valores, puesto que fue superior al 90%. Esto se puede visualizar con gran detalle en la figura 22.

		TURBIEDAD (NTU)					COLOR (Pt-Co)				
Config	Q(L/s)	Media	Me	DS	Mín	Máx	Media	Me	DS	Mín	Máx
D1	0.5	98.51	98.5	1.18	97.0	99.8	100	100	0	99.9	100
	1	96.9	97.5	3.24	92.6	99.8	96.6	98.0	4.5	90.3	99.88
D2	0.5	98.94	99.3	0.67	98.3	99.5	99.96	100	0.09	99.8	100
	1	98.99	98.9	1.06	97.3	99.6	100	100	0	100	100
D3	0.5	98.9	98.8	0.91	98.0	99.8	100	100	0	100	100
	1	98.73	99.0	1.05	97.2	99.6	99.83	100	0.35	99.3	100
PTAP-B		98.78	99.1	1.23	96.8	99.9	99.89	99.9	0.18	99.3	100

Fuente: Elaboración propia

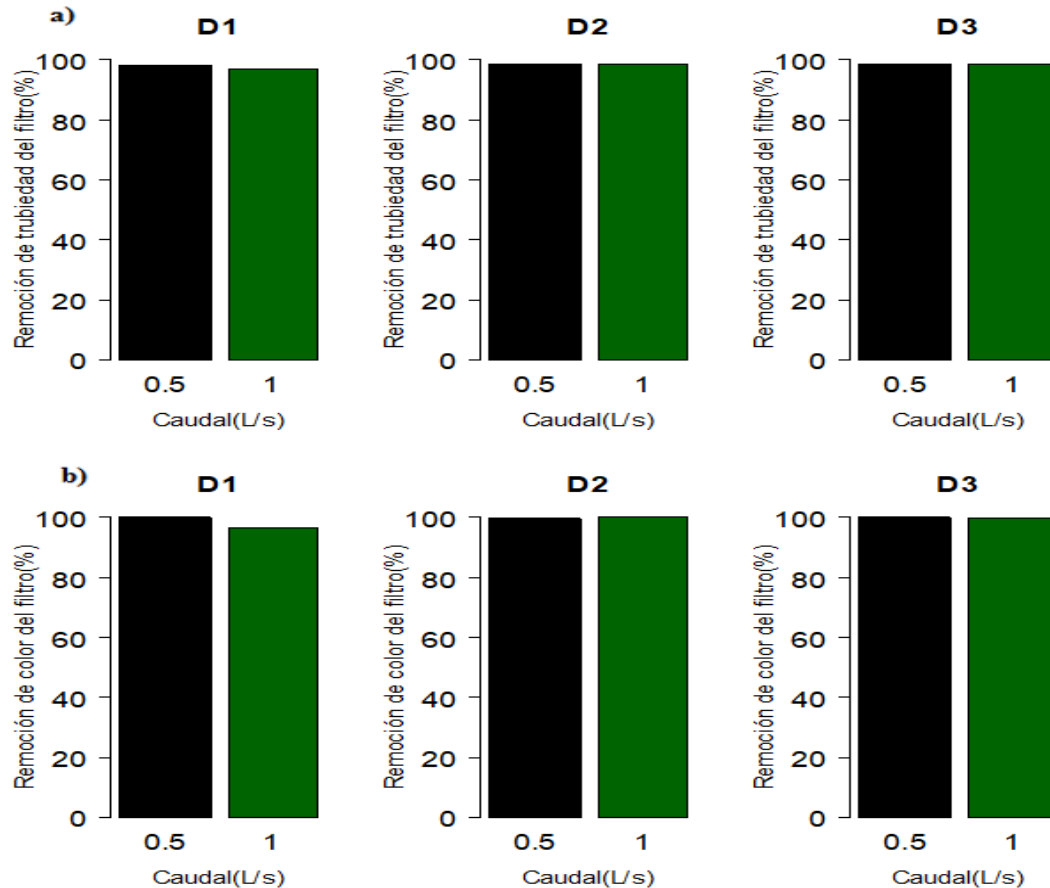


**Figura 22.** Diagrama de cajas de la eficiencia de turbiedad y color del filtro con previo uso del sedimentador vs los diferentes caudales.

**Fuente:** Elaboración propia

En la figura 23 a) se observó gráficamente que no existe una diferencia significativa entre las medias de eficiencia de turbiedad para las diferentes configuraciones y caudales, obteniéndose excelentes resultados en la remoción. Sin embargo, se puede ver que la eficiencia fue mayor para el caudal de 0.5 L/s en D1 (98.51%) y D3 (98.9%). Pero no para D2, puesto que la eficiencia fue mayor, pero con una diferencia mínima en el caudal de 1 L/s (98.99%) que en el de 0.5 L/s (98.94%). Esto se puede comprobar en el estudio realizado por Novoa & Tenezaca (2021), en el que obtuvieron en el mismo FTFV como promedio una eficiencia de turbiedad a la salida del filtro cercano al 98.71% y 98.96% para caudales de 0.5 y 1L /s en una longitud de 80 m aplicando como coagulante sulfato de aluminio.

En la figura 23 b) se puede observar que la eficiencia de color fue superior al 96.6% y que en el caudal de 0.5 L/s fue mayor en D1 y D3 (100%), mientras para D2 fue mayor en el caudal de 1 L/s (100%) que en 0.5 L/s (99.96%) la eficiencia.



**Figura 23.** Diagrama de barras que representan las medias de la eficiencia de turbiedad y color del filtro con previo uso del sedimentador vs los diferentes caudales.

**Fuente:** Elaboración propia

## 4.5 Comparación de la eficiencia de los sistemas tubulares implementados vs el sistema convencional usado en la PTAP-B.

### 4.5.1 Eficiencia del sedimentador experimental con previo uso del FTFH vs eficiencia del decantador con previo uso del floculador de pantallas de la PTAP-B

En la tabla 21 se pudo observar que los valores de las medianas, mínimos y máximos de la eficiencia de remoción de turbiedad y color en todas las

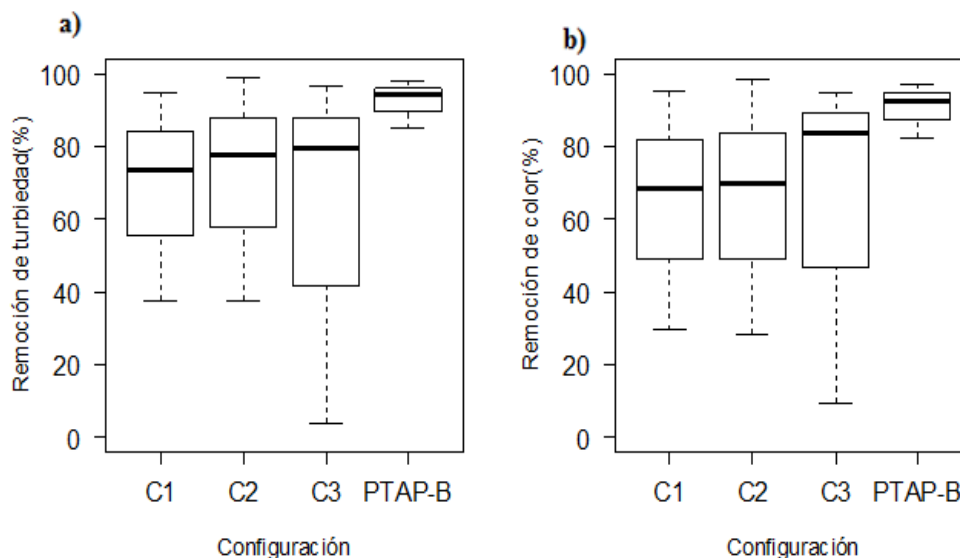


configuraciones (C1, C2, C3) del sistema piloto se encontraron por debajo de los valores obtenidos en la PTAP-B. Con una excepción en C2, pues el valor máximo de eficiencia de turbidez (98.6%) y de color (98.24%), fue ligeramente mayor al valor de la PTAP-B con 97.97% para turbiedad y 97.2% para el color. Esto se visualiza claramente en la figura 24a) que indica la eficiencia de turbiedad y figura 24 b) la eficiencia de color, en ambos casos C1, C2 y C3 tuvieron menores eficiencias al de la PTAP-B.

**Tabla 20.** Estadística descriptiva de la turbiedad y color aplicada al sedimentador con previo uso del floculador.

Config	TURBIEDAD (NTU)					COLOR (Pt-Co)				
	Media	Me	DS	Mín	Máx	Media	Me	DS	Mín	Máx
<b>C1</b>	71.83	73.38	25.5	37.5	94.8	65.19	68.33	25.75	29.4	95.25
<b>C2</b>	74.57	77.81	19.3	37.5	98.6	72.56	69.57	19.59	28.2	94.24
<b>C3</b>	76.3	79.78	20.8	4.0	96.54	76.73	83.43	18.74	9.7	94.89
<b>PTAP-B</b>	93.61	94.3	4.4	84.9	97.97	91.87	92.58	4.91	82.2	97.2

Fuente: Elaboración propia

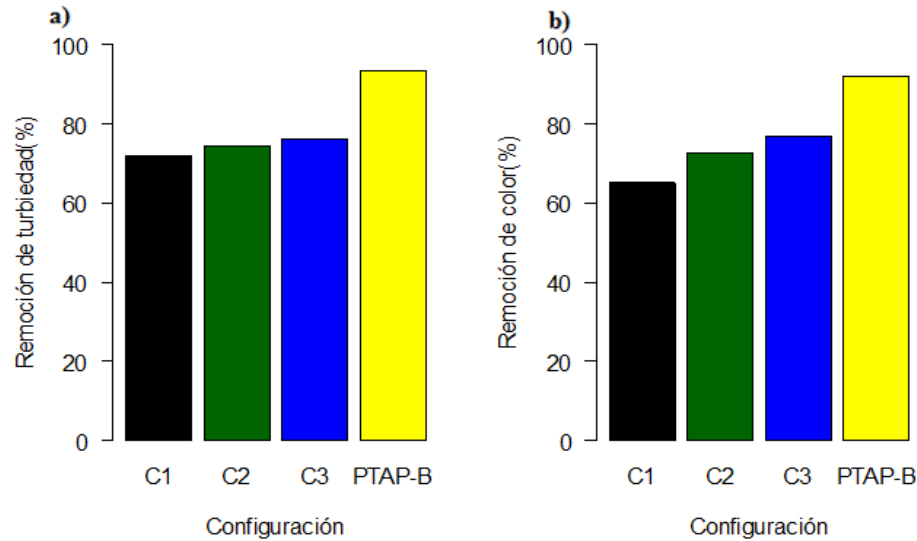


**Figura 24.** Diagrama de cajas de eficiencia de turbiedad y color del sedimentador con previo uso del FTFH vs el sistema convencional PTAP-B.

Fuente: Elaboración propia

En la figura 25 se visualiza que el sistema convencional de la PTAP-B presentó una mejor eficiencia tanto de turbiedad (figura 25 a) como de color (figura 25 b) medido en el sedimentador al comparar con las configuraciones del sistema piloto. También, se aprecia en el sistema piloto que a medida que la longitud incrementa, también aumenta la eficiencia de turbiedad y color, siendo mayor la configuración C3 seguido de C2 y C1. Estas eficiencias se encuentran por arriba del 71%, lo que indicó que el sedimentador piloto no es muy eficiente puesto que debe tener como mínimo un 85% para la separación de sólidos sedimentables (Guerrero, Salazar, & Paredes, 2018) , además que presenta una diferencia del 20% respecto al sedimentador de la PTAP-B.

Una de las razones por las que el sedimentador piloto no se encuentra por arriba del porcentaje recomendado, es la característica del diseño del sedimentador. Esto se puede comprobar con el estudio realizado por Guerrero, Salazar & Paredes (2018), en el que determinaron la eficiencia a la salida de un sedimentador laminar con el mismo tipo y dosis de coagulante del presente estudio, señalando de esta manera que el sedimentador laminar al presentar placas inclinadas paralelas, estos son capaces de incentivar a la precipitación de los flóculos y sólidos suspendidos aclarando el agua rápidamente, por lo que reflejó una mejor eficiencia de 93.5% en remoción de turbiedad, mientras que en el presente estudio la mejor eficiencia de turbiedad fue de 76.3%.



**Figura 25.** Diagrama de barras que representa las medias de la eficiencia de turbiedad y color del sedimentador con previo uso del FTFH vs el sistema convencional PTAP-B.

**Fuente:** Elaboración propia

#### 4.5.2 Eficiencia del filtro piloto con previo uso del sedimentador y FTFH vs eficiencia del filtro previo uso del decantador y floculador de pantallas de la PTAP-B

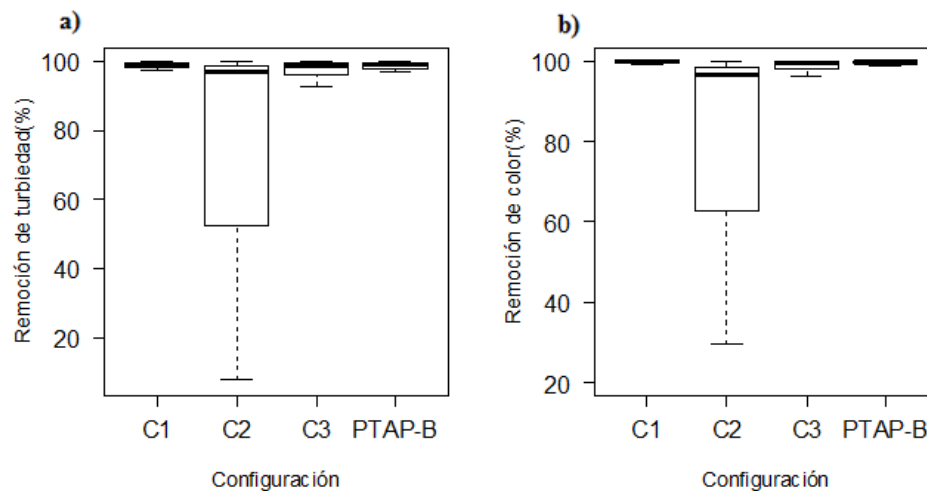
Las medianas de las eficiencias de remoción de turbiedad de todas las configuraciones C1, C2 y C3 (98.99, 96.62, 98.93% respectivamente) fueron similares a los valores de la PTAP-B (98.78%) (Tabla 22). Así mismo, las medianas de las eficiencias de remoción de color de todas las configuraciones C1, C2 y C3 (99.91, 96.47, 99.72% respectivamente) fueron similares a los valores de la PTAP-B (99.94%) (Tabla 22).

También se observó en la tabla 22 y figura 26 que los valores máximos de remoción de turbiedad y color se encontraron cercanos a los de la PTAP-B, pues se registraron valores mayores a 99.84% para la turbiedad y 100% para el color. De igual manera, los valores mínimos de la remoción de turbiedad y color fueron similares a excepción de la configuración C2.

**Tabla 21.** Estadística descriptiva de la eficiencia de remoción de turbiedad y color obtenida en el filtro del sistema piloto y de la planta convencional.

Config	TURBIEDAD (NTU)					COLOR (Pt-Co)				
	Media	Me	DS	Mín	Máx	Media	Me	DS	Mín	Máx
<b>C1</b>	98.81	98.99	0.8	97.4	99.85	99.86	99.91	0.18	99.31	100
<b>C2</b>	90.28	96.62	15.1	7.7	99.98	92.36	96.47	11.09	29.55	100
<b>C3</b>	98.3	98.93	1.8	92.8	99.84	99.39	99.72	0.87	96.36	100
<b>PTAP-B</b>	98.78	99.11	1.0	96.6	99.86	99.79	99.94	0.35	98.9	100

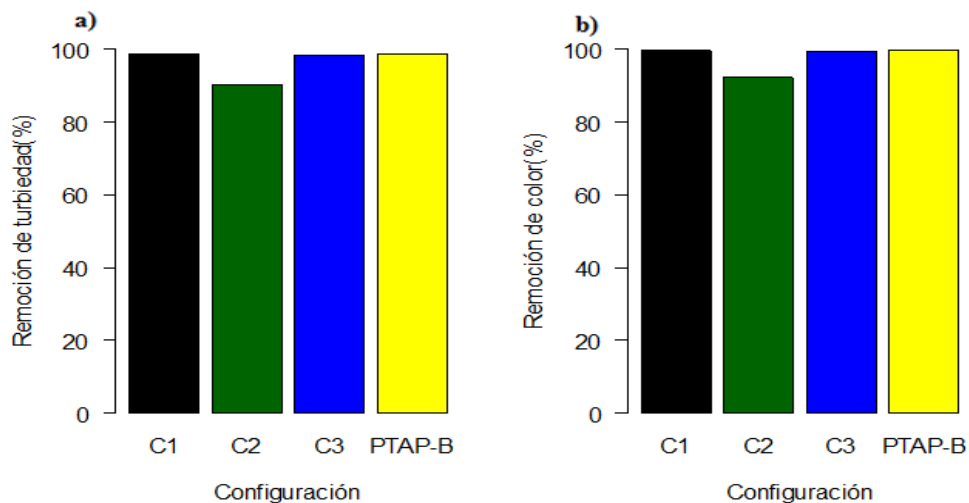
Fuente: Elaboración propia



**Figura 26.** Diagrama de cajas de eficiencia de turbiedad y color obtenida en el piloto y el filtro de la planta convencional PTAP-B.

Fuente: Elaboración propia

En la figura 27, los valores de las medias tanto para la eficiencia de remoción de turbiedad figura 27 a) y de color figura 27 b) fueron similares entre las tres configuraciones y la PTAP-B, excepto para la configuración C2 puesto que presentó una menor eficiencia de 90.28% y 92.36% para turbiedad y color respectivamente. Aunque C2 presento una menor eficiencia de turbiedad y color, la remoción de turbiedad y color fue eficiente, pues todas las medias de eficiencia de remoción de la turbiedad y color fueron superiores a 90% y 92% respectivamente.



**Figura 27.** Diagrama de barras que representa las medias de la eficiencia de turbiedad y color obtenidas en el filtro piloto y filtro de la planta convencional PTAP-B.

**Fuente:** Elaboración propia

En la PTAP de la ciudad de Chambo, la cual opera a través de los procesos de coagulación, floculación, prefiltración y filtración se obtuvo una remoción de turbiedad del 80% usando PAC como coagulante (Uvidía, 2013). Esta eficiencia de 80% difiere del sistema piloto ya que estas se encontraron por encima del 90% de remoción de turbiedad a la salida del filtro piloto. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la PTAP de la ciudad de Chambo los sedimentadores presentaron deficiencia, pues la distribución de la grava en los prefiltros se encontraron en forma incorrecta y existió algas en las paredes de los filtros, razón por la que presento ese porcentaje de remoción. Además, que la PTAP-Chambo opera con un caudal de 53 L/s mientras que el sistema piloto y la PTAP-B es de 1 L/s y 20 L/s respectivamente.

### 4.5.3 Eficiencia del sedimentador experimental con previo uso del FTFV vs eficiencia del decantador con previo uso del floculador de pantallas de la PTAP-B

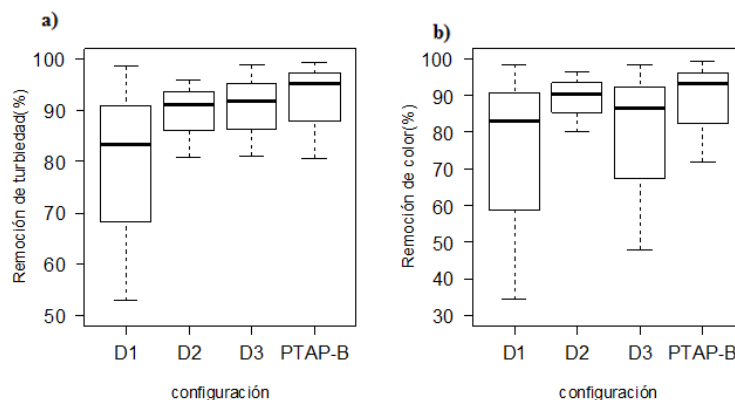
En la tabla 23 se presentó los valores de las medias, medianas y desviación estándar y en la figura 28 se visualizó gráficamente los máximos y mínimos de las eficiencias de remoción de turbiedad y color de las configuraciones y de la PTAP-B.

**Tabla 22.** Estadística descriptiva de la turbiedad y color aplicada al sedimentador con previo uso del FTFV y a la planta convencional

Config	TURBIEDAD (NTU)					COLOR (Pt-Co)				
	Media	Me	DS	Mín	Máx	Media	Me	DS	Mín	Máx
D1	79.61	83.38	19.67	52.91	98.6	77.38	83.17	23.6	34.3	98.4
D2	89.53	91.23	5.35	80.77	95.98	89.89	90.52	4.77	80.13	96.5
D3	90.54	91.71	7.72	81.01	98.71	83.81	86.58	15.72	47.89	98.4
PTAP-B	93.4	95.19	6.7	80.65	99.30	89.87	93.12	10.83	71.68	99.27

**Fuente:** Elaboración propia

Se observó en la figura 28 a) y 28 b) que las medianas y máximos fueron semejantes en los cuatro sistemas. Pero no se pudo decir lo mismo de los valores mínimos de la eficiencia de remoción de turbiedad y color. Es decir, en la figura 28 a) el valor mínimo de remoción de turbiedad entre los 4 sistemas pertenece a la configuración D1 (52.91%), mientras que en la figura 28 b) el valor mínimo entre los 4 sistemas fue D1 (34.3%) seguido por D3 (47.89%). Sin embargo, en D2, D3 y la PTAP-B presentaron medianas por arriba del 90% para la eficiencia de turbiedad y color.

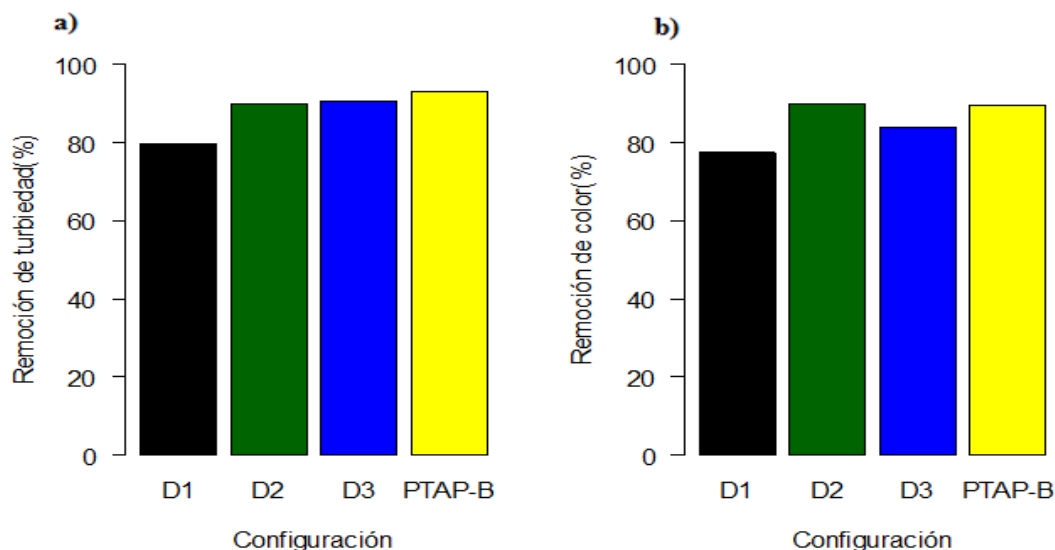


**Figura 28.** Diagrama de cajas de eficiencia de turbiedad y color del sedimentador con previo uso del FTFV vs el sistema convencional PTAP-B.

**Fuente:** Elaboración propia

En la figura 29 a) que representa la eficiencia de remoción de turbiedad se observó que las medias aumentan a medida que aumenta la longitud, es así, que D3 (90.74%) es el que presentó una mayor eficiencia seguido por D2 (89.53%) y D1 (79.61%), esto porque los tiempos de retención aumentan a medida que incrementa la longitud, permitiendo que el floculo se estructure adecuadamente.

En la figura 29 b) que representa la eficiencia del color sucede lo mismo que en la eficiencia de remoción de turbiedad a excepción de la configuración D2, una de las razones podría ser un error en la lectura del color al tener turbiedades altas y se tuvo que hacer diluciones. En la figura 29 a) y figura 29 b), se aprecia claramente que la remoción de turbiedad y color del sistema convencional de la PTAP-B fue mayor al del sistema piloto.



**Figura 29.** Diagrama de barras que representa las medias de la eficiencia de turbiedad y color del sedimentador con previo uso del FTFV vs el sistema convencional PTAP-B.

**Fuente:** Elaboración propia

En el estudio de Agudelo, Mejía, & Pinzón (2015) se puede comprobar que al tener una mayor longitud en el floculador piloto, realizado a base de tuberías de PVC, mayor es su eficiencia, en este estudio se obtuvieron eficiencias de remoción de turbiedad mayores al 80% a la salida del sedimentador con un tiempo de retención

de 10 min para caudales menores a 1 L/s, al igual que el presente estudio se obtuvo eficiencias mayores a 80% pero con un tiempo de retención de 20min, indicando de esta manera que el sedimentador con FTFV es eficiente.

#### 4.5.4 Eficiencia del filtro piloto con previo uso del sedimentador y FTFV vs eficiencia del filtro previo uso del decantador y floculador de pantallas de la PTAP-B

En la tabla 24 se comparó los valores de las medianas, mínimos y máximos de las configuraciones (D1, D2 y D3) con los valores de la PTAP-B y se observó que ambos sistemas presentaron valores similares, pues se encontraron por arriba del 90% tanto para la remoción de turbiedad y color. Sin embargo, al tomar los valores de la mediana, la configuración D3 con 98.95% de remoción de turbiedad y 100% de color fue la configuración que superó, pero no con mucha significancia al valor de la PTAP-B (99.1% para turbiedad y 99.98% para color).

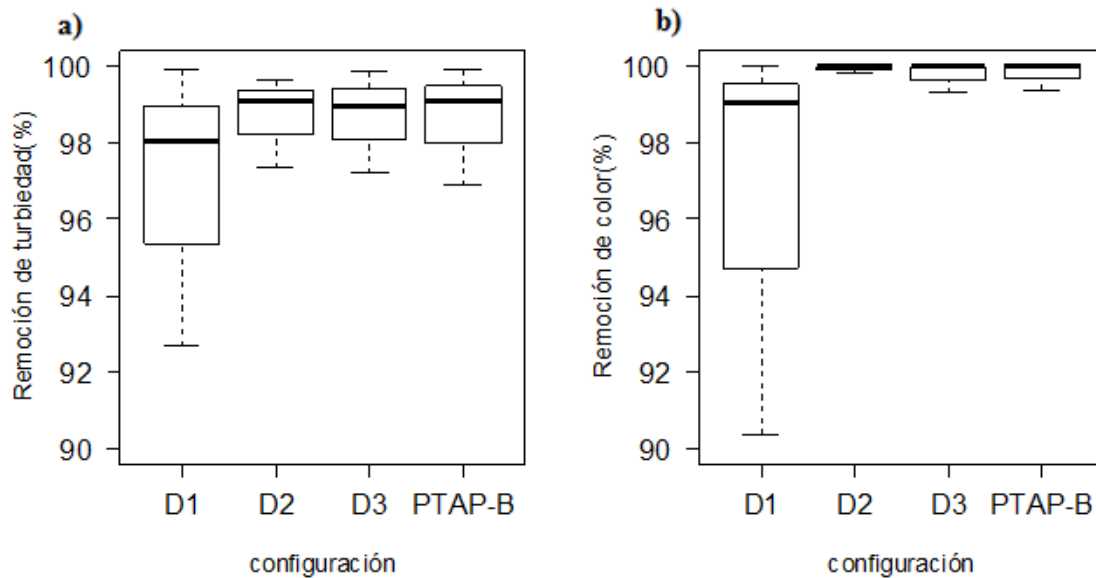
Además, se observó que D1 fue la configuración que presentó una menor eficiencia al resto de configuraciones con un valor mínimo de 92.6% de eficiencia de turbiedad y 90.34% de eficiencia de color, razón por lo que su desviación estándar también encontró levemente mayor con respecto a D2, D3 y la PTAP-B. Esto se describe detalladamente en la tabla 24 y de manera gráfica en la figura 30.

**Tabla 23.** Estadística descriptiva de la turbiedad y color aplicada al filtro con previo uso del sedimentador del sistema con FTFV y a la planta convencional

Config	TURBIEDAD (NTU)					COLOR (Pt-Co)				
	Media	Me	DS	Mín	Máx	Media	Me	DS	Mín	Máx
D1	97.7	98.04	2.21	92.6	99.89	98.3	99.05	2.25	90.3	100
D2	98.93	99.12	0.86	97.3	99.66	99.98	100	0.04	99.8	100
D3	98.81	98.95	0.98	97.2	99.89	99.91	100	0.17	99.31	100
PTAP-B	98.78	99.1	1.23	96.8	99.91	99.89	99.98	0.18	99.37	100

Fuente: Elaboración propia



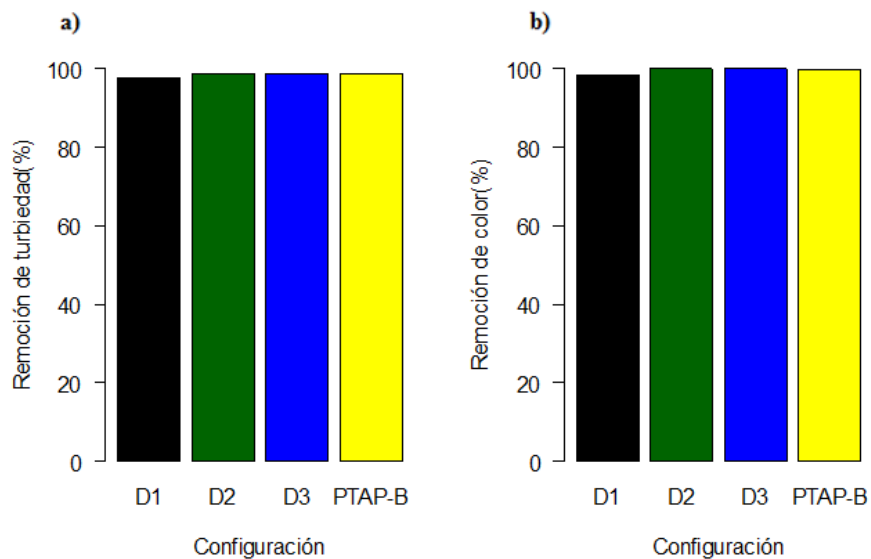


**Figura 30.** Diagrama de cajas de eficiencia de turbiedad y color del filtro con previo uso del sedimentador vs el sistema convencional PTAP-B.

**Fuente:** Elaboración propia

En la figura 31 a) que representa las medias de remoción de turbiedad, se observó que el filtro piloto presentó una mayor eficiencia en la configuración D2 (98.93%) seguido por D3 (98.81%), y D1 (97.7%). También las medias de la eficiencia de remoción de turbiedad presentaron valores superiores al 97.7%, demostrando así que las configuraciones D1, D2 y D3 tuvieron eficiencias cercanas a las pruebas obtenidas en la PTAP-B (98.78%). Estos valores de remoción de turbiedad fueron similares a las eficiencias de un estudio realizado por Al-Rawi (2017), pues en ese estudio se obtuvo eficiencias mayores al 90% con filtros de arena y antracita similares a la composición del filtro piloto del presente estudio.

En la figura 31 b) los valores de las medias de remoción de color fueron similares a la remoción de turbiedad, siendo D2(99.98%) el que presentó una mayor eficiencia seguido por D3(99.91%) y D1(98.3%). Todos estos valores del filtro piloto como el de la PTAP-B se encontraron por encima del 98%.



**Figura 31.** Diagrama de barras que representa las medias de la eficiencia de turbiedad y color del filtro con previo uso del sedimentador vs el sistema convencional PTAP-B.

**Fuente:** Elaboración propia

## 4.6 Eficiencia de remoción de turbiedad y color del sedimentador y filtro de los sistemas pilotos utilizando sulfato de aluminio y PAC como coagulantes.

### 4.6.1 Eficiencia en el sedimentador y filtro con previo uso del FTFH al utilizar los dos coagulantes.

En la tabla 25, se registró las medias de las eficiencias de turbiedad y color que se obtuvo a partir de las pruebas realizadas a la salida del sedimentador y del filtro, para caudales de 0.5, 1.0 y 2 L/s en la configuración C2 del FTFH. Estos valores registrados en la tabla, fueron pruebas obtenidas de un estudio realizado por Méndez & Trelles (2021) utilizando Sulfato de Aluminio como coagulante y se comparó con pruebas realizadas con el coagulante PAC, que es el caso del presente estudio.

**Tabla 24.** Media de la eficiencia de remoción de turbiedad y color del sedimentador y filtro de los sistemas pilotos utilizando sulfato de aluminio y PAC como coagulantes para diferentes caudales en C2.

Sistema Floculador Tubular Horizontal (FTFH) con un diámetro de 110mm								
SULFATO DE ALUMINIO					POLICLORURO DE ALUMINIO			
	Sedimentador		Filtro		Sedimentador		Filtro	
	Turbiedad (NTU)	Color (Pt-Co)	Turbiedad (NTU)	Color (Pt-Co)	Turbiedad (NTU)	Color (Pt-Co)	Turbiedad (NTU)	Color (Pt-Co)
Q (L/s)	Media	Media	Media	Media	Media	Media	Media	Media
0.5	82.03	78.63	98.91	100	86.3	85.86	99.37	100
1	74.02	71.46	98.79	100	76.6	74.46	98.83	99.97
2	70.23	65.2	97.88	99.56	60.8	57.35	72.64	77.1

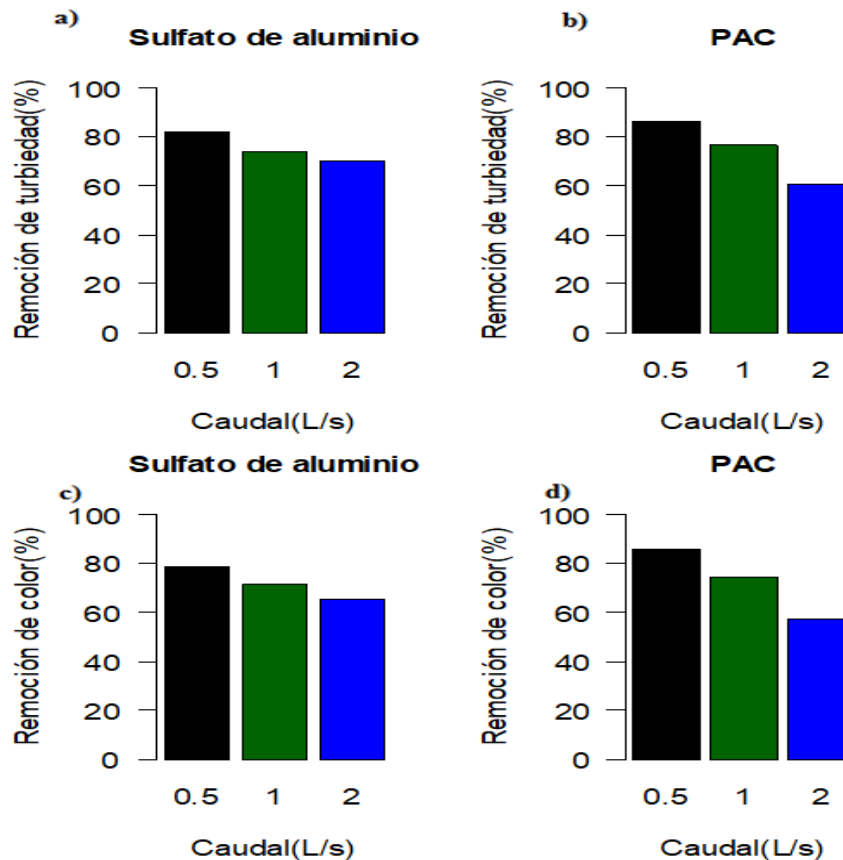
**Fuente:** Elaboración propia

Se comparó la figura 32 a) que indicó la remoción de turbiedad con sulfato de aluminio con la figura 32 b) que señaló la remoción de turbiedad con PAC a la salida del sedimentador, se observó que el PAC con valores de 86.3% para 0.5 L/s y 76.6% para 1 L/s, es más eficiente pero no con mucha diferencia al sulfato de aluminio que presentó valores de 82.03% y 74.02%, esto para caudales de 0.5 L/s y 1L/s respectivamente. Pero no sucedió lo mismo para el caudal de 2L/s, en el cual el sulfato de aluminio (70.23%) fue mayor al coagulante PAC (60.8%) con una diferencia de 10%.

De la misma manera, al comparar la figura 32 c) remoción de color con sulfato de aluminio con la figura 32 d) remoción de color con PAC, este último es el que presentó una mejor eficiencia para caudales de 0.5 L/s con un 85.86% y 1 L/s con 74.46% a diferencia del sulfato de aluminio que registró valores de 78.63% y 71.46% para 0.5 y 1L/s respectivamente. Pero no sucedió lo mismo para caudales mayores a 1 L/s donde el coagulante sulfato de aluminio (65.2%) fue mejor con un 10% al PAC (57.35%).

Por lo expuesto anteriormente, tanto para la remoción de turbiedad y color se observó que el PAC es muy eficiente para caudales menores a 0.5 L/s, puesto que se encuentra por encima del 80%, pero no con caudales mayores a 2 L/s puesto

que está por debajo del 60%. Una de las razones pudo ser la aplicación de dosis bajas de PAC en el caudal de 2 L/s, por tanto, no se neutralizó totalmente las cargas de las partículas, lo que permitió que la formación de los flóculos no se forme adecuadamente y fuera escasa, por consiguiente, la turbiedad fuera elevada para el posterior tratamiento que pertenece a la sedimentación y filtración (Alvarado et al., 2014).



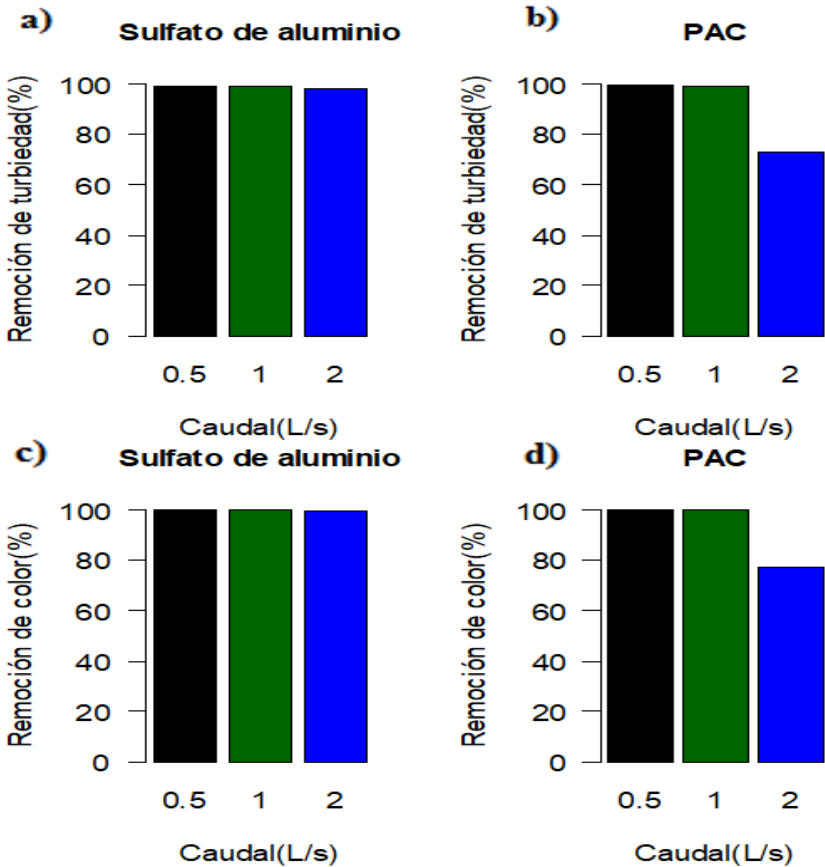
**Figura 32.** Diagrama de barras de turbiedad y color en el sedimentador para la configuración de 110 mm con pruebas realizadas en el FTFH con sulfato de aluminio y con PAC como coagulantes.

**Fuente:** Elaboración propia

A continuación, en la figura 33, la remoción de turbiedad a la salida del filtro con sulfato de aluminio (figura 33 a) fue menor, pero no significativa a la remoción de turbiedad obtenida con PAC (figura 33 b). Esto para caudales de 0.5 y 1 L/s, pues se registró valores de 99.37% con 0.5 L/s y 98.83% con 1 L/s, estos con PAC;

mientras que, para el sulfato de aluminio se encontró valores de remoción de 98.91% con 0.5 L/s y 98.79% con 1 L/s. De igual manera, en la figura 33 c) y figura 33 d) se presentó la remoción de color con sulfato de aluminio y PAC respectivamente. Se observó que hay una cercanía entre los valores al usar los dos coagulantes para caudales menores a 1 L/s, puesto que se encontró el 100% para la remoción de color.

Al aumentar el caudal a 2 L/s, se observó que el sulfato de aluminio presentó una mejor eficiencia 97.88% para turbiedad y 99.56% para color a diferencia de 72.64% para turbiedad y 77.1% para color con el coagulante PAC.



**Figura 33.** Diagrama de barras de turbiedad y color en el filtro para la configuración de 110mm con pruebas realizadas en el FTFH con sulfato de aluminio y con PAC como coagulantes.

**Fuente:** Elaboración propia

## 4.6.2 Eficiencia en el sedimentador y filtro con previo uso del FTFV utilizando los dos coagulantes

Como se puede apreciar en la tabla 26, se registró las medias de las eficiencias de turbiedad y color a la salida del sedimentador y filtro piloto para ambos caudales (0.5 y 1 L/s) y utilizando el FTFV. Los valores que se observan en esta tabla fueron de un estudio previo con sulfato de aluminio realizado por Novoa & Tenezaca (2021) y los valores de las pruebas que se obtuvieron con el presente estudio realizado con el coagulante PAC.

**Tabla 25.** Media de eficiencia de remoción de la turbiedad y color del sedimentador y filtro de los sistemas pilotos de flujo vertical utilizando sulfato de aluminio y PAC como coagulantes para diferentes caudales.

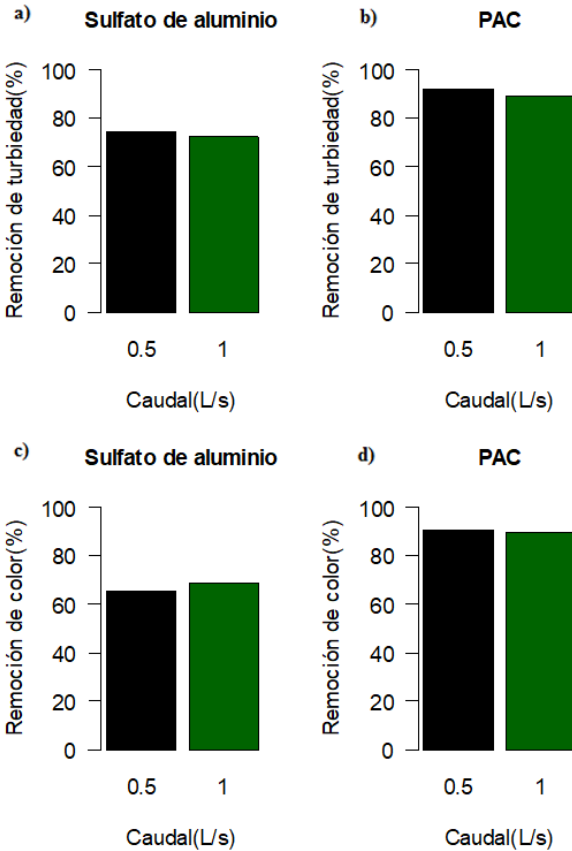
Sistema Floculador Tubular Vertical (FTFV) con tubos de diámetro de 110mm								
SULFATO DE ALUMINIO					POLICLORURO DE ALUMINIO			
	Sedimentador		Filtro		Sedimentador		Filtro	
	Turbiedad (NTU)	Color (Pt-Co)	Turbiedad (NTU)	Color (Pt-Co)	Turbiedad (NTU)	Color (Pt-Co)	Turbiedad (NTU)	Color (Pt-Co)
Q (L/s)	Media	Media	Media	Media	Media	Media	Media	Media
0.5	74.35	65.57	98.71	99.9	92.05	90.54	98.94	99.96
1	72.52	68.40	98.96	100	89.00	89.24	98.99	100

Fuente: Elaboración propia

En la figura 34 se registraron los valores de la media tanto de remoción de turbiedad y color a la salida del sedimentador con ambos coagulantes. En la figura 34 a) que representó la eficiencia de remoción de turbiedad con sulfato de aluminio y figura 34 b) la remoción de turbiedad con PAC, se observó que este último presentó una mejor eficiencia para ambos caudales, registrándose valores del 89% para un caudal de 1 L/s y 92.05% para 0.5 L/s, resultando este caudal de 0.5 L/s el que presentó una mejor eficiencia.

En la figura 34 c) se presenta la remoción de color con sulfato de aluminio y la figura 34 d) la remoción de color con PAC a la salida del sedimentador, este último (coagulante PAC) demostró una vez más ser el más eficiente para ambos caudales, pero presentando una mejor eficiencia para un caudal de 0.5 L/s con un 90.54%.

Las pruebas realizadas con sulfato de aluminio no presentaron una buena eficiencia para este FTFV, puesto que se registraron valores por debajo del 74.35% para turbiedad y 68.4% para color. Una de las razones como menciona Alvarado et al., (2014) podría ser que los flóculos al utilizar el coagulante sulfato de aluminio presentan estructuras porosas y esponjosas con un tamaño entre 25 a 100  $\mu\text{m}$ . A diferencia del coagulante PAC, donde sus flóculos presentan una estructura tipo cadena en forma de pequeñas esferas con un tamaño menor a 25  $\mu\text{m}$ . Esta diferencia estructural del flóculo hace que el sulfato de aluminio produzca una mayor turbiedad en suspensión en el siguiente proceso que el PAC.

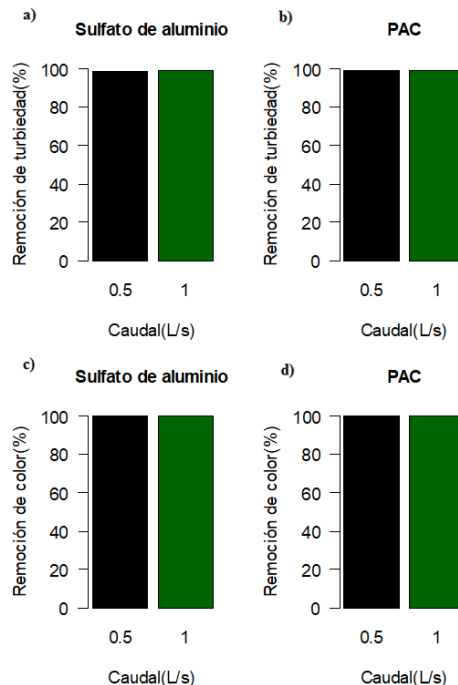


**Figura 34.** Diagrama de barras de turbiedad y color en el sedimentador para la configuración de 110mm con pruebas realizadas en el FTFV con sulfato de aluminio y con PAC como coagulantes.

**Fuente:** Elaboración propia

En la figura 35 a) que representa la remoción de turbiedad a la salida del filtro con sulfato de aluminio y figura 35 b) con PAC, indica que las eficiencias entre los dos coagulantes no fueron significativas, sin embargo, por una diferencia mínima el PAC fue el que presentó mejores resultados. El PAC presentó valores de 98.94% para 0.5 L/s y 98.99% para 1 L/s, mientras el coagulante sulfato de aluminio se registró valores de 98.71% y 98.96% para 0.5 y 1 L/s respectivamente.

En la figura 35 c) se indica la remoción de color con sulfato de aluminio y figura 35 d) remoción de color con PAC, se evidencia que fue mejor con PAC para caudales de 0.5 L/s con un 99.96% de eficiencia respecto al sulfato de aluminio con un 99.9%, sin embargo, como se puede ver no hay una diferencia significativa. Pero con 1 L/s ambos coagulantes presentaron buenas eficiencias de 100%. Por tanto, se indicó que la remoción de turbiedad y color con ambos coagulantes en el filtro presentó una buena eficiencia de remoción, pues se encontró por encima del 98%.



**Figura 35.** Diagrama de barras de turbiedad y color en el filtro para la configuración de 110mm con pruebas realizadas en el FTFV con sulfato de aluminio y con PAC como coagulantes.

**Fuente:** Elaboración propia



Finalmente, para ambos sistemas experimentales que usaron el FTFH y FTFV, la utilización del coagulante PAC fue más eficiente que el sulfato de aluminio, debido a que el PAC proporciona el peso específico de los flocs para su posterior suspensión, mientras que el sulfato de aluminio no genera la fuerza de atracción necesaria para su formación y posterior sedimentación, por esa razón en el sedimentador piloto se observó que para caudales de 0.5 y 1 L/s en ambos sistemas (FTFH y FTFV) el PAC es mejor. Esto se pudo corroborar con el estudio de Sierra & Guatame (2016), en donde de tuvieron como objetivo comparar la efectividad que tiene el PAC con el sulfato de aluminio, este último era el coagulante actualmente usado en la PTAP Francisco Wiesner, ubicada en Bogotá. Para llevar a cabo ese estudio tomaron muestras de agua cruda y al final de la filtración y realizaron un análisis de turbiedad y color. Los resultados demostraron que el PAC presentó una mayor remoción de turbiedad del 87% frente al sulfato de aluminio con un 82% y remoción de color del 86% frente al 84% de sulfato de aluminio.

## **4.7 Análisis estadístico**

### **4.7.1 Correlación de variables**

La matriz de correlación de Spearman es una prueba no paramétrica que mide la intensidad de relación entre dos o más variables, en este caso se analizó con este modelo la eficiencia de turbiedad del sedimentador (ETS), número de Reynolds (Re), tiempo de retención real (Tr), gradiente real (Gr), caudal (Q), turbiedad del agua cruda (TAC), diámetro (D) y longitud (L); todas estas variables tanto para el sistema con FTFH como para el sistema con FTFV se puede observar en el anexo 9.

En la tabla 27 se puede observar las variables que más se relacionan entre sí, el Re con el Gr y el Q son las variables que presentan una correlación 0.89 y 0.96 respectivamente lo que indica una correlación fuerte y muy fuerte. Esto indica que, si aumenta el valor del Q o G, lo hará de la misma manera Re, presentándose una correlación positiva. La segunda variable que presenta una correlación fue el Gr con el Q, obteniéndose una correlación fuerte 0.72. Ahora bien, para la ETS las variables

que intervienen son la TAC por lo que se obtuvo una correlación fuerte de 0.72, así como con el Tr indicando una correlación de 0.42. Los rangos de correlación utilizados para el análisis se presentaron en la tabla 5.

**Tabla 26.** Matriz de correlación de Spearman para el sistema FTFH piloto

	ETS	Re	Tr	Gr	Q	TAC	L	D
ETS	1							
Re	-0.45	1						
Tr	0.42	-1	1					
Gr	-0.35	0.89	-0.89	1				
Q	-0.44	0.96	-0.84	0.72	1			
TAC	0.72	-0.10	0.05	-0.05	-0.09	1		
L	0.09	-0.29	0.53	-0.68	0	-0.06	1	
D	-0.04	-0.29	-0.26	-0.68	0	0.04	-0.5	1

**Fuente:** Elaboración propia

En tabla 28 se puede observar que las variables que más se correlacionaron fueron: La ETS con la TAC teniendo una correlación 0.91 clasificándose como muy fuerte, de igual manera el Re con el Q tuvieron una correlación de 0.89 clasificándose como una correlación fuerte. El Re y el Gr tuvieron una correlación de 0.45 y 0.36 respectivamente con la longitud de cada configuración. Así mismo se puede observar en la tabla 5, donde señala los rangos de correlación utilizados para el análisis.

**Tabla 27.** Matriz de correlación de Spearman para el sistema FTFV piloto

	ETS	Re	Tr	Gr	Q	TAC	L	D
ETS	1							
Re	-0.04	1						
Tr	0.04	-1	1					
Gr	-0.15	0.8	-0.8	1				
Q	0.05	0.89	-0.68	0.45	1			
TAC	0.91	-0.07	0.07	-0.04	-0.08	1		
L	-0.19	0.45	0.36	0.89	0	0	1	
D	0.19	-0.45	-0.36	-0.89	0	0	-1	1

**Fuente:** Elaboración propia

## 4.7.2 Análisis de varianza

Con la finalidad de conocer que configuración presenta una mejor eficiencia dentro de cada uno de los sistemas pilotos tubulares, se realizó en InfoStat la prueba de ANOVA de una vía, pues los datos presentaron una distribución normal a través de la prueba de Shapiro Wilk y se analizó en base a la hipótesis nula. En este caso la hipótesis nula ( $H_0$ ): no hay diferencia en la eficiencia de remoción de turbiedad a la salida del sedimentador y del filtro al incrementar la longitud piloto del FTFH y del FTFV. Los resultados se presentan en el anexo 10.

En la tabla 27 y 28 se presentan los valores de p value de la variable de clasificación configuración, estos valores indicaron que se acepta la hipótesis nula, es decir, no hay diferencias estadísticamente significativas de la eficiencia de turbidez y color para el sedimentador y el filtro entre las configuraciones del FTFH y FTFV. De acuerdo a la tabla 27, se observó que las medias que tiene la misma letra no presentaron diferencias significativas entre ellas, por el contrario se observó una diferencia significativa al comparar las medias de turbidez entre las configuraciones del sistema piloto y la PTAP-B.

**Tabla 28.** Análisis de varianza ANNOVA a la salida del sedimentador

Congiguración	Remoción de turbidez(%)	Remoción de color(%)
<b>C1+S</b>	71.83 ± 25.58 <sup>A</sup>	65.19 ± 25.75 <sup>A</sup>
<b>C2+S</b>	74.57 ± 19.3 <sup>A</sup>	72.56 ± 19.59 <sup>A</sup>
<b>C3+S</b>	76.3 ± 20.89 <sup>A</sup>	76.73 ± 18.74 <sup>A</sup>
<b>D1+S</b>	79.61 ± 19.67 <sup>A</sup>	77.38 ± 23.6 <sup>A</sup>
<b>D2+S</b>	89.53 ± 5.35 <sup>A</sup>	89.89 ± 4.77 <sup>A</sup>
<b>D3+S</b>	90.54 ± 7.72 <sup>A</sup>	83.81 ± 15.72 <sup>A</sup>
<b>Floculador+S de PTAP-B</b>	93.51 ± 5.58 <sup>B</sup>	92.08 ± 7.72 <sup>B</sup>
<b>Pvalue efecto de la longitud</b>	0.1825	0.1782
Los valores se encuentran expresados como <i>media ± desviación estándar</i> . ( <sup>A B</sup> ) Medias en la misma columna agrupadas con la misma letra no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ). (*) Efecto significativo ( $p < 0.05$ ).		

**Fuente:** Elaboración propia

En la tabla 28 se observa que las medias no muestran una diferencias significativa entre las configuraciones del sistema piloto y la PTAP-B.

**Tabla 28.** Análisis de varianza ANNOVA a la salida del filtro

Congiguración	Remoción de turbidez(%)	Remoción de color(%)
<b>C1+S</b>	98.81 ± 0.85 <sup>A</sup>	99.86 ± 0.18 <sup>A</sup>
<b>C2+S</b>	90.28 ± 15.19 <sup>A</sup>	92.36 ± 11.09 <sup>A</sup>
<b>C3+S</b>	98.3 ± 1.83 <sup>A</sup>	99.39 ± 0.87 <sup>A</sup>
<b>D1+S</b>	97.7 ± 2.21 <sup>A</sup>	98.3 ± 2.25 <sup>A</sup>
<b>D2+S</b>	98.93 ± 0.86 <sup>A</sup>	99.98 ± 0.04 <sup>A</sup>
<b>D3+S</b>	98.81 ± 0.98 <sup>A</sup>	99.91 ± 0.17 <sup>A</sup>
<b>Floculador+S de PTAP-B</b>	98.75 ± 1.13 <sup>A</sup>	99.85 ± 0.27 <sup>A</sup>
<b>Pvalue efecto de la longitud</b>	0.7186	0.7106

Los valores se encuentran expresados como *media ± desviación estándar*.  
 (<sup>A B</sup>) Medias en la misma columna agrupadas con la misma letra no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ).  
 (\*) Efecto significativo ( $p < 0.05$ ).

**Fuente:** Elaboración propia

Para evaluar estadísticamente si entre los coagulantes PAC y sulfato de aluminio existe una diferencia significativa entre la configuración C2 y D2 del FTFH y FTFV respectivamente se realizó la prueba de normalidad, pero en este caso las variables resultaron ser no paramétricos por lo que se aplicó la prueba de Wilcoxon como se presenta en el anexo 11 y en la tabla 29.

**Tabla 29.** Análisis de varianza prueba de Wilcoxon

Diferencia en los resultados usando PAC y Sulfato de Aluminio				
Variable	p value	Resultados Sedimentador	p value	Resultados Filtro
<b>C2</b>	0.92	No hay diferencia	0.44	No hay diferencia
<b>D2</b>	0.010	Si hay diferencia	0.41	No hay diferencia

**Fuente:** Elaboracion propia

De acuerdo a los resultados de la tabla 29 se puede evidenciar a partir de la prueba de Wilcoxon que existe una diferencia significativa unicamente en la configuración D2 que corresponde a las medias de las eficiencias de remoción de turbiedad en el sedimentador del FTFV, mientras que para la configuración C2 tanto en la eficiencia de remoción de turbiedad del sedimentador y del filtro, así como de la configuración D2 en los resultados de la eficiencia de remoción de turbiedad en el filtro no hay diferencia significativa. Para la prueba de Wilcoxon se tomaron las medias de la configuración C2 del estudio realizado por Méndez & Trelles (2021) para el FTFH y de la configuración D2 del estudio previo de Novoa & Tenezaca (2021) para el FTFV.

#### **4.8 Discusion final**

Mediante este estudio se pudo determinar que la eficiencia de remoción de turbiedad y color en los dos floculadores, no presentó una diferencia significativa, al comparar los valores obtenidos a la salida del filtro piloto con el filtro de la PTAP-B. Debido a que ambos floculadores presentaron una eficiencia general de 95.8% para turbiedad y 97.2% para color en el FTFH; con el FTFV fue de 98.48% y 99.4% para turbiedad y color respectivamente; mientras que la PTAP-B fue de 98.78% de turbiedad y 99% para color.

También, se determinó que la remoción de turbiedad y color tanto en el sedimentador como en el filtro fue mejor en la configuración C3 para un caudal de 0.5 L/s comparada con las otras dos configuraciones (C1 y C2). Se obtuvo un 89.82% de remoción de turbiedad y 89.07% de remoción de color para el sedimentador (tabla 17). En tanto, se obtuvo una remoción de turbiedad de 98.8% y una remoción de color del 99.83% en el filtro (tabla 18). Esto se debe a que, al presentar una longitud mayor y un menor caudal presenta un mayor tiempo de retención en la configuración C3 (46.15 min) permitiendo una mejor formación del floculo al comparar con la configuración C2 (32 min) y C1 (14 min).

El gradiente de velocidad y el tiempo de retención son variables muy importantes para el diseño de floculadores. En este estudio se determinó que al obtener Gr

pequeños junto con un tiempo de retención prolongado se obtuvieron mejores resultados a la salida del sedimentador piloto previo uso del FTFH (89.82 %). Esto se puede verificar en el estudio realizado por Trujillo et al. (2014), en el cual se señalan que, al tener un menor gradiente de velocidad, un adecuado tiempo de retención para que se forme el floc y una dosis de coagulante correcta ayudará a tener una mejor eficiencia.

Algo similar obtuvieron Méndez & Trelles (2021), quienes registraron un 82.03% de remoción de turbiedad y 78.63% de remoción de color en el sedimentador para un caudal de 0.5 L/s y una longitud de 97.6 m del floculador tubular horizontal. De igual manera se obtuvo mayores valores de remoción en el filtro tanto de turbiedad 98.91% como de color 100%. Por lo que se puede asegurar que el sistema FTFH + sedimentador + filtro es muy eficiente para estos caudales.

Se analizó estadísticamente si existió una diferencia significativa en la eficiencia obtenida al usar como coagulantes PAC y Sulfato de Aluminio aplicados en la configuración C2. Para ello se utilizó la prueba de Wilcoxon, en este análisis estadístico (Anexo 11) se obtuvo un p value mayor a 0.05 como resultado tanto para el sedimentador como para el filtro, por lo tanto, se aceptó la hipótesis nula de que no existe una diferencia significativa entre los datos de PAC y Sulfato de Aluminio. Por tanto, no existe diferencia importante en la remoción de turbiedad y color al usar estos dos coagulantes. Existen estudios que comparan PAC y Sulfato de Aluminio, tal como el de Oré Solier (2014), dicho autor menciona que es mejor usar el PAC que el sulfato de aluminio, pero no tiene una diferencia significativa, por ejemplo, con una turbiedad inicial de 27 NTU, se obtuvo una turbiedad residual de 3.19 NTU y 2.06 NTU para sulfato de aluminio y PAC respectivamente después del filtro.

En el sistema piloto con FTFV, la configuración D3 para un caudal de 0.5 L/s presentó los mejores resultados en cuanto a la remoción de turbiedad y color en el sedimentador 92.05%, 91.46% respectivamente. Para caudales de 0.5 y 1 L/s no hubo diferencia significativa en la remoción de turbidez y color en el filtro, por lo que

se puede asegurar que el sistema FTFV + sedimentador + filtro es muy eficiente para estos caudales.

Los resultados de alta eficiencia están ligados a los tiempos de retención presentados en la tabla 9, dichos tiempos están dentro del rango mencionado por los autores en la tabla 10. Así mismo, las altas eficiencias obtenidas están ligadas a los gradientes presentados en la tabla 11, dichos gradientes están dentro del rango recomendado por los autores en la tabla 12.

En la configuración D3 al estar compuesto por dos diámetros de tubería (63 mm y 110 mm) presentaron dos gradientes de velocidad, uno mayor y otro menor, que ayudó a disminuir la velocidad en el interior del reactor, evitando de esta manera que se fraccione el floc. Esto se pudo corroborar con el estudio realizado por Novoa & Tenezaca (2021), quienes concluyeron que a menor gradiente de velocidad existe mayor eficiencia en la remoción de turbiedad (74.35%) y una remoción de color de 65.57% para un caudal de 0.5 L/s usando un FTFV para una longitud de 80 m.

Se empleó el método de Wilcoxon para evaluar si existe una diferencia significativa entre las eficiencias obtenidas al aplicar PAC y Sulfato de Aluminio tanto en el sistema FTFV + S como en el sistema FTFV + S + F. Se obtuvo como resultado un p value menor a 0.05 en los datos de remoción de turbiedad en el sedimentador y un p value mayor a 0.05 en los datos de remoción de turbiedad del filtro. Señalando con estos resultados que se puede rechazar la hipótesis nula y afirmar que, si existe una diferencia significativa entre las eficiencias del sedimentador al usar PAC y Sulfato de Aluminio. Pero para los datos del filtro se aceptó la hipótesis nula, afirmando que no existe una diferencia significativa entre las eficiencias del filtro al usar PAC y Sulfato de Aluminio (Anexo 11). Por lo tanto, se puede usar PAC o sulfato de aluminio en este tipo de sistemas de tratamiento si al final del proceso se cuenta con filtros, ya que la turbiedad residual está dentro de la normativa INEN 1108 con los dos coagulantes analizados y las eficiencias son similares, pero desde el punto de vista económico es más conveniente usar sulfato de aluminio.

Finalmente, en la prueba estadística ANNOVA realizada para saber si existe una diferencia significativa entre los datos obtenidos en las diferentes configuraciones tanto del FTFH como del FTFV, se obtuvo como resultado en las dos pruebas un p valúe mayor a 0.05 (Anexo 10). Por lo tanto, se puede aceptar la hipótesis nula de que no existe una diferencia significativa entre los datos analizados. Es decir, no existe un rango significativo de diferencia entre los valores de turbiedad y color entre las configuraciones C1, C2, C3 y D1, D2, D3 en el sedimentador y en el filtro.

El presente estudio permite afirmar que tanto el FTFH como del FTFV se puede usar para potabilizar el agua usando pequeños caudales, tal como los aplicados en este estudio y que bien podrían ser aplicados en comunidades en desarrollo debido a su alta eficiencia, fácil implementación y baja inversión económica. El costo económico para construir un sistema con FTFH o FTFV con diámetros de tubería 75mm y 110mm o 63mm y 110mm es de 3200\$ y 3100\$ respectivamente, mientras que la construcción de una planta convencional es de aproximadamente 42.000\$ (Méndez & Trelles, 2021).



## CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

- Se determinó la remoción de turbidez y color aplicando como coagulante policloruro de aluminio en dos sistemas de potabilización piloto que utilizaron el FTFH y el FTFV. Encontrándose que, el sistema conformado por el sistema FTFV + sedimentador + filtro fue el más eficiente, llegando a obtener remociones de 98.48% de turbiedad y 99.4% de color. A pesar de ello, ambos sistemas pilotos cumplieron con la Normativa vigente INEN 1108.
- Entre las diferentes configuraciones probadas experimentalmente, se pudo determinar que el sistema conformado por un floculador tubular de flujo vertical de diámetro 110 mm y de longitud 80 m, complementado por un sedimentador de alta tasa y un filtro rápido, sería el más idóneo para aplicarlo para la potabilización, ya que se obtendría eficiencias por encima del 98.93%, tanto para turbiedad y color. Por lo tanto, no es conveniente usar dos diámetros de tubería en la misma configuración debido a que se obtiene resultados de remoción de turbiedad y color similares a los obtenidos con un diámetro de tubería.
- La evaluación en campo de la eficiencia de los sistemas tubulares implementados vs el sistema convencional de la PTAP-B, indicó que esta última tuvo mejor eficiencia a la salida del sedimentador al presentar valores por encima del 90% en remoción de turbiedad y color, mientras que en los sistemas pilotos presentaron valores entre 80-90%. Pero al comparar el sistema convencional con el sistema piloto, a la salida de los filtros no se encontraron diferencias significativas en ambos sistemas, puesto que presentaban valores por encima del 90%.
- Al comparar la eficiencia del coagulante Sulfato de Aluminio y PAC a la salida del sedimentador con FTFH; se demostró que el PAC dio mejores resultados con caudales menores a 1 L/s, con un 76.6% y 74.46% para la eficiencia de remoción de turbiedad y color respectivamente. Mientras que, los resultados

# UCUENCA

obtenidos en el estudio previo realizado por Méndez & Trelles (2021) con Sulfato de Aluminio fueron de 74.02% y 71.46%.

- En el FTFV el mejor coagulante fue el PAC ya que las eficiencias fueron de 89% y 89.24% de turbiedad y color respectivamente; mientras que, en el estudio previo de Novoa & Tenezaca (2021) en el que utilizaron sulfato de aluminio, se obtuvo eficiencias de 72.52% y 68.4%. Sin embargo, en ambos sistemas (FTFH y FTFV) las eficiencias a la salida del filtro, no presentó diferencia significativa en la remoción de turbiedad y color entre coagulante PAC y sulfato de aluminio, pues presentaron eficiencias mayores al 98%.

## 5.2. Recomendaciones

- Realizar estudios que analicen la eliminación de carga microbiana en estos tipos de floculadores tubulares pilotos (FTFH-FTFV) y comparar con los floculadores de pantallas.
- Implementar longitudes menores a 50 m en los dos floculadores tubulares pilotos y comprobar si existen o no diferencia con las longitudes usadas en este estudio y estudios anteriores.
- Complementar con más análisis de parámetros fisicoquímicos en los dos tipos de floculadores tubulares pilotos y con los dos coagulantes (PAC y sulfato de aluminio) para conocer cuál de los dos coagulantes y cual sistema es el que genera mayor remoción de dichos parámetros.
- Se recomienda usar bombas dosificadoras de coagulante.
- Probar tres tipos de diámetros (63, 75 y 110mm) para tener tres diferentes gradientes de velocidad.
- Realizar un mantenimiento periódico a los sistemas pilotos cuando existan TAC mayores a 50.

## CAPITULO VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, M. (2002). Tratamiento físico-químico de aguas residuales coagulación-floculación. EDITUM.
- Agudelo, S., Mejía, J., & Pinzón, L. (2015). Elaboración y mejoramiento de un prototipo de floculador hidráulico de tubos de PVC para caudales menores o iguales a 10 L.P.S. Universidad Cooperativa de Colombia.
- Alvarado, C., Pérez, H., & Saba, C. (2014). Evaluación del uso del policloruro de aluminio en conjunto con sulfato de aluminio en el proceso de coagulación de una planta de potabilización de agua en el estado Carabobo. 10(1), 46.
- Al-Rawi, S. M. (2017). Introducing sand filter capping for turbidity removal for potable water treatment plants of Mosul/Iraq. African Journal of Water Conservation and Sustainability, 5(1), 167-175.
- American Water Works Association. (2002). Calidad y tratamiento del agua. McGraw-Hill.
- Arboleda, J. (2000). Teoría y práctica de la purificación del agua. En Colombia: Ed. Mc Graw Hill. <http://fing.uncu.edu.ar/catedras/sanitaria/archivos/libros-arboleda-valencia/Teoria y Practica de la Purificacion del H2O - Tomo 1 - Arboleda Valencia.pdf>
- Azizi, N., Homayoon, R., & Hojjati, M. (2019). Predicting the colebrook-white friction factor in the pipe flow by new explicit correlations. Journal of Fluids Engineering. Transactions of the ASME, 141(5). doi:<https://doi.org/10.1115/1.4041232>
- Baque-Mite, R., Simba-Ochoa, L., Gonzáles-Ozorío, B., Díaz-Ocampo, E., & Cadme-Arevalo, L. (2016). Quality of water intended for human consumption in a canton of Ecuador. 9, 109–117.

- Barreto, J. (2015). Potabilización del agua: Principios de diseño, control de procesos y laboratorio. Universidad Piloto de Colombia.
- Bolaños-Alfaro, J. D., Cordero-castro, G., & Segura-araya, G. (2017). Determination of nitrites , nitrates , sulfates and contamination caused by human activities , in two cantons of Alajuela , province of Costa Rica. 13. <https://doi.org/10.18845/tm.v30i4.3408>
- Bouyer, D., Coufort, C., Liné, A., & Do-quang, Z. (2005). Experimental analysis of floc size distributions in a 1-L jar under different hydrodynamics and physicochemical conditions. 292, 413–428. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.06.011>
- Brandt, M., Johnson, M., Elphinston, A., & Ratnayaka, D. D. (2017). Storage, Clarification and Chemical Treatment. ScienceDirect. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100025-0.00008-9>
- Calle, L., & Zambrano, C. (2015). Optimizacion del proceso de floculacion y coagulacion de la planta potabilizadora de la junta de agua potable de bayas. Cuenca.
- Cano Marin, C. (2015). Evaluación de un tratamiento de floculación-flotación para el agua residual generada en el procesamiento de subproductos avícolas. Universidad Libre.
- CEPIS/OPS. (2004). Plantas de Filtracion Rápida Tratamiento de agua para consumo humano Plantas de filtración rápida Manual I (L. Vargas (ed.); Priemra, Número 1). Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
- CINARA. (1991). Seminario internacional sobre mejoramiento de la calidad de agua para consumo humano. Centro Inter-Regional de Abastecimiento y Remocion de Agua.

Córdoba, J., & Dueñas, J. (2016). Análisis comparativo de la eficiencia de la filtración con material vítreo frente al uso de antracita-arena para remoción de hierro y manganeso, en las aguas subterráneas del acueducto de Funza.

Cortés, H., & Mora, L. (2015). Diseño de un sistema compacto de potabilización de agua para consumo humano en la granja la fortaleza ubicada en el municipio de melgar-tolim. Bogotá. Obtenido de <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/11285/INFORME%2021.101.023.pdf?sequence=1>

Di Rienzo, J., Balzarini, M., Robledo, C., Casanoves, F., Gonzales, L., & Tablada, E. (2008). InfoStat Software manual del usuario. FCA Universidad Nacional de Córdoba, November 2015, 334.

Domínguez, A., Rivera, M., Piña, M., & Pérez, S. (2008). Incidencia del gradiente de velocidad en la eficiencia de la electrocoagulación para remover arsénico en un reactor a flujo pistón. Scielo. Obtenido de [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0378-18442008000700007](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442008000700007)

Domínguez, M. (2010). Optimización de la coagulación-floculación en la planta de tratamiento de agua potable de la sede recreacional campoalegre-cajasan. Bucaramanga.

Du, P., Li, X., Yang, Y., Fan, X., Zhang, T., Wang, N., . . . Zhou, Z. (2020). Effect of rapid-mixing conditions on the evolution of micro-flocs to final aggregates during two-stage alum addition. Review Environmental Technology. doi: <https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1723710>

Floculadores y Clasificación (p. 12). (1982). <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/913/Capitulo3.pdf>

- Flores, E., Miranda, M., & Villasis, M. (2017). El protocolo de investigación VI: cómo elegir la prueba estadística adecuada. *Estadística inferencial. Revista Alergia México*. doi: <https://doi.org/10.29262/ram.v64i3.304>
- García, L., & Iannacone, J. (2014). *Pseudomonas aeruginosa* an additional indicator of drinking water. 19.
- Gil Solano, J. C., & López, W. A. (2009). Estudio de factibilidad de implementación del policloruro de aluminio como sustituto del sulfato de aluminio tipo b, en la planta de tratamiento “el tablazo” de Popayán. 31, 106.
- Guerrero, T., Salazar, J., & Paredes, J. (2018). Eficiencia de un sedimentador laminar y convencional para eliminar sólidos. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 84 no.3 . Obtenido de [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1810-634X2018000300007&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2018000300007&lng=es&tlng=es)
- INEN. (2020). NTE INEN 1108-Agua Para Consumo Humano.Requisitos. INEN.
- Inf. Agro. (2018). Conductividad Eléctrica. Inf. Agro. [https://www.infoagro.com/instrumentos\\_medida/doc\\_conductividad\\_electrica.asp?k=53](https://www.infoagro.com/instrumentos_medida/doc_conductividad_electrica.asp?k=53)
- Jiao, R., Fabris, R., Chow, C. W., Drikas, M., Leeuwen, J. v., Wang, D., & Xu, Z. (2017). Influence of coagulation mechanisms and floc formation on filterability. *ScienceDirect*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.01.006>
- L.Cleasby, J., & S.Logsdon, G. (1999). Granular Bed and Precoat Filtration. En A. W. Association, *Water Quality & Treatment: A Handbook of Community Water Supplies, Fifth Edition*. McGraw-Hill Professional.
- Lastra, T. (2010). Estudio de la floculación con energía cinética en un reactor tubular. Quito.
- Loaiza, J. (1987). Estudio del salto hidraulico como unidad de mezcla rápida. Monterrey. Obtenido de <http://eprints.uanl.mx/6854/1/1020072412.PDF>

- Lourdes, Á. (2019). Acceso a servicios de agua y saneamiento en áreas rurales dispersas (p. 98). Banco Interamericano de Desarrollo.
- Matilainen, A., Lindqvist, N., & Tuhkanen, T. (2010). Comparison of the Efficiency of Aluminium and Ferric Sulphate in the Removal of Natural Organic Matter During Drinking Water Treatment Process. Taylor y Francis Online. doi:<https://doi.org/10.1080/09593332608618502>
- Méndez, A., & Trelles, A. (2021). “Floculación tubular horizontal como una tecnología potencial sostenible para la provisión de agua potable en comunidades en desarrollo”. Cuenca.
- Moreno, R. (2021). Los Coloides. Los libros de la Catarata.
- Mott, R. L. (2006). Mecánica de fluidos (sexta edición). Pearson Educación.
- Naciones Unidas. (2018). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible Una oportunidad para América Latina y el Caribe.
- Núñez Camacho, M. (2015). Definición de opciones de mejora en una planta de agua potable. Universidad Central del Ecuador.
- Novoa, F., & Tenezaca, D. (2021). Evaluación de una tecnología sostenible para portabilización del agua en comunidades rurales: Experimentación en un floculador tubular vertical. Cuenca.
- Oliveira, D. (2019). Número de remolinos en floculadores de tubo helicoidal: análisis de modelado teórico, experimental y CFD. Springer Link. doi:<https://doi.org/10.1007/s13762-018-2027-x>
- OMS. (2006). Guías para la calidad del agua potable (Tercera Ed).
- OMS. (2019). Agua. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- Oré Solier, L. (2014). Evaluación de la eficiencia del floculante de sulfato de aluminio y policloruro de aluminio empleado en la depuración de aguas con baja



turbiedad en la planta de tratamiento de agua potable Quicapata-Ayacucho.  
Universidad Nacional de San Cristobal de Huamanga.

Patil, P. N. (2020). Physico-chemical parameters for testing of water – A review. January 2012.

Ramírez, F. (2022). La coagulación - floculación en el proceso de tratamiento. El agua potable.

Ramírez, H., & Jaramillo, J. (2016). Agentes naturales como alternativa para el tratamiento del agua. Revista Facultad de Ciencias Básicas, XI(2), 136-153. doi:<https://doi.org/10.18359/rfcb.1303>

Ríos, S., Agudelo, R., & Gutiérrez, L. (2017). Patógenos e indicadores microbiológicos de calidad del agua para consumo humano. Facultad Nacional de Salud Pública, 12. doi:10.17533/udea.rfnsp.v35n2a08

Rodier, J., Legube, B., & Merlet, N. (2010). Análisis del agua (Vol. 2). Omega.

Romero, J. (2004). Calidad del Agua. Escuela Colombiana de Ingeniería.

Romero Rojas, J. A. (1999). Potabilización del agua-3ª Edición.

Rusydi, A. (2018). Correlation between conductivity and total dissolved solid in various type of water: A review of water: A review. 7. <https://doi.org/10.1088/1755-1315>

Schober, P. M., Bóer, C. P., & Schwarte, L. A. (2018). Coeficientes de correlación: uso e interpretación apropiados. Anesthesia y Analgesia, 1763-1768. doi: 10.1213/ANE.0000000000002864

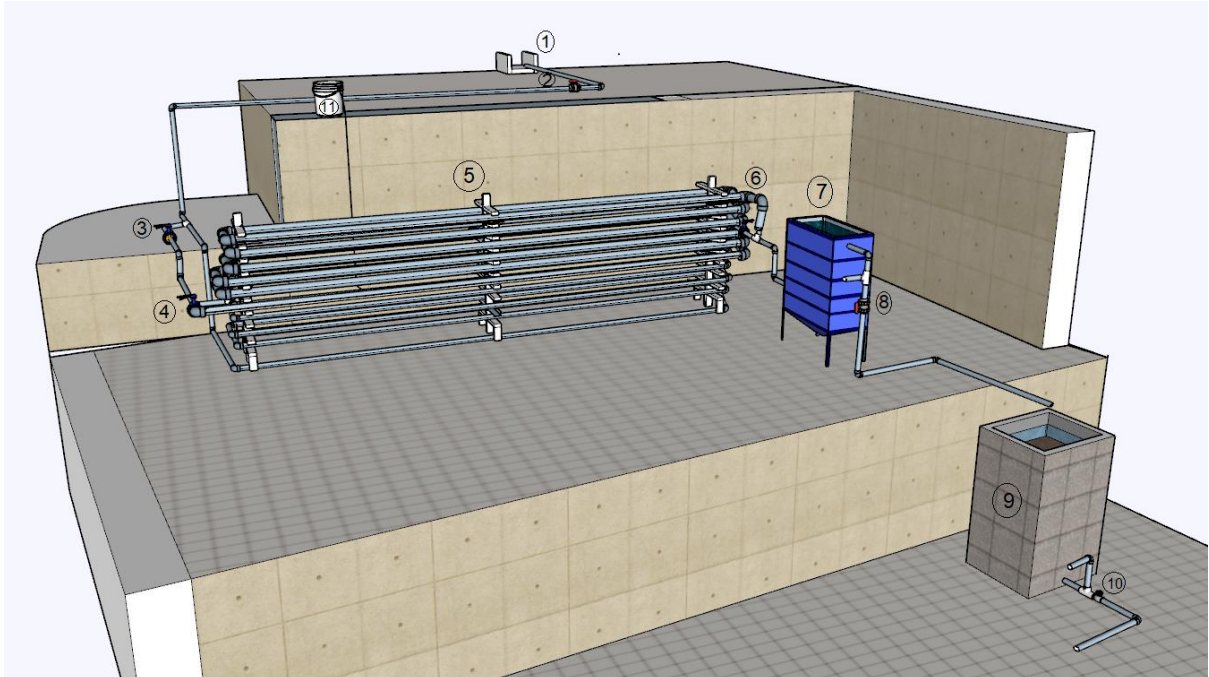
Sierra, I., & Guatame, V. (2016). Análisis comparativo del policloruro de aluminio (PAC) y sulfato de aluminio líquido (SAL) para la optimización del proceso coagulación en la planta de tratamiento de agua potable Francisco Wiesner. Bogotá.

Spellman, F., & Drinan, J. (2004). Manual del Agua. ACRIBIA, S.A.

- Srinivas, V. S. N., & Vuppala, N. V. S. (2017). Analysis and optimization of coagulation and flocculation process. *Applied Water Science*, 451–460. <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0262-y>
- Trujillo, D., Duque, L. F., Arcila, J. S., Rincón, A., Pacheco, S., & Herrera, O. F. (2014). Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano. *Scielo*. Obtenido de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-100X2014000100003](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-100X2014000100003)
- Uvidia, J. (2013). Optimización de la planta de tratamiento de agua potable de la ciudad de Chambo. *Riobamba*.
- Vásquez, L. H., Garcia, H. C., & Alvarado, D. M. (2011). Calidad del agua para consumo humano y salud: 20, 21–26.
- Watanabe, Y. (2017). Floculación y yo. 114, 88–103. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.12.035>
- Weber, W. J. (1979). Control de la Calidad Del Agua/Water Quality Control: Procesos Fisicoquimicos. Reverté, S.A.
- WWDR. (2019). NO DEJAR A NADIE ATRAS (Organización de las Naciones Unidas para la Educación la Ciencia y la Cultura (ed.)). UNESCO.

## CAPITULO VII. ANEXOS

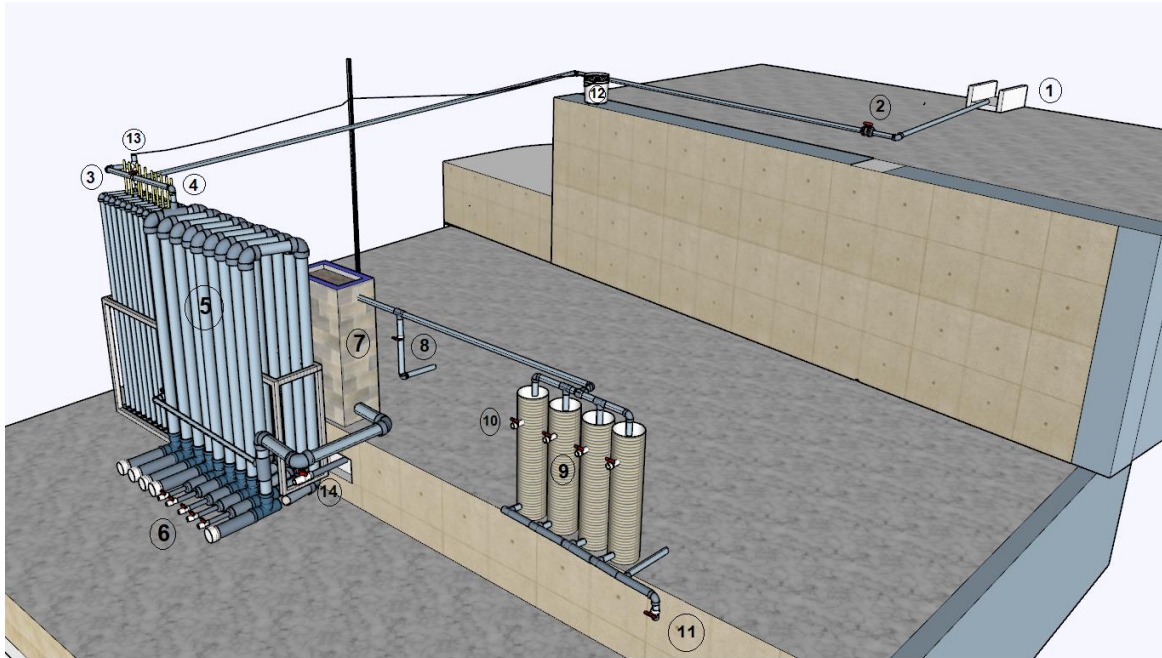
### Anexo 1. Modelación digital con Scketch Up de los sistemas tubulares pilotos implementados para el tratamiento de agua potable.



- |  |   |
|--|---|
| 1. Captación Agua cruda.                       | 7. Sedimentador.  |
| 2. Válvula reguladora de caudal.               | 8. Válvula para toma de muestra: Floculador - Sedimentador. |
| 3. Válvula de paso a la configuración 110.     | 9. Filtro de Arena.   |
| 4. Válvula de paso a la configuración 75- 110. | 10. Válvula para toma de muestra: Filtro.                   |
| 5. Sistema Floculador Tubular Horizontal.      | 11. Floculante (Polímero)                                   |
| 6. Válvula salida de configuración 63.         |   |

**Figura 36.** Sistema Floculador Tubular de Flujo Horizontal

**Fuente:** Elaboración propia.



1. Captación Agua cruda.
2. Válvula reguladora de caudal.
3. Válvula de paso a la configuración 110.
4. Mangueras de desfogado de aire.
5. Sistema Floculador Tubular Vertical.
6. Válvula de desfogado de lodos.
7. Sedimentador.
8. Válvula para toma de muestra: Floculador - Sedimentador.
9. Filtro de Arena.
10. Válvula de desfogado para retro lavado.
11. Válvula para toma de muestra: Filtro.
12. Floculante (Polímero).
13. Inyección del polímero al sistema.
14. Desfogado de lodos del Sedimentador.

**Figura 37.** Sistema Floculador Tubular de Flujo Vertical

**Fuente:** Elaboración propia.

## Anexo 2. Determinación del Tr mediante el método de trazadores con NaCl.



**Figura 38.** Muestreo de Conductividad

**Fuente:** Elaboración propia.

## Anexo 3. Determinación del G (t) y G (r)

**Tabla 29.** Gradiente teórico y gradiente real de los sistemas tubulares pilotos implementados para el tratamiento de agua potable

FTFH														
Q (L/s)	D (mm)	Velocidad (m/s)	Re	T(t)	T(r)	f	f tubería	f válvula mariposa	fválvula globo	fcodo 90°	fcodo T	K	G(t)	G(r)
2	0.075	0.45	30014.68	198	147	0.02	0.2914	0.0219		0.0291	0.0049	0.347	123.62	143.47
1	0.075	0.23	15340.84	396	327	0.03	0.0897	0.0067		0.0090	0.0015	0.107	48.51	53.38
0.5	0.075	0.11	7336.92	792	840	0.03	0.0248	0.0019		0.0025	0.0004	0.030	18.04	17.52
2	0.11	0.21	20543.38	465	315	0.03	0.0513	0.0026		0.0208		0.075	37.42	45.47
1	0.11	0.11	10760.82	930	810	0.03	0.0166	0.0008		0.0067		0.024	15.05	16.13
0.5	0.11	0.05	4891.28	1860	1920	0.04	0.0042	0.0002		0.0017		0.006	5.38	5.3
FTFV														
Q (L/s)	D (mm)	Velocidad (m/s)	Re	T(t)	T(r)	f	f tubería	fválvula mariposa	fválvula globo	fcodos 90°	fcodos T	K	G(t)	G(r)
1	0.063	0.32	17928.77	280.2	480	0.02	0.1687		0.0009	0.1842	0.0024	0.356	105.25	80.42
0.5	0.063	0.16	8964.38	559.8	738	0.03	0.0496		0.0003	0.0542	0.0007	0.105	40.39	35.18
1	0.11	0.11	10760.82	759.6	600	0.03	0.0115	0.0007		0.0190	0.0035	0.035	19.98	22.48
0.5	0.11	0.05	4891.28	1519.8	1290	0.03	0.0028	0.0002		0.0046	0.0009	0.008	6.97	7.57

Fuente: Elaboración propia

## Anexo 4. Curva de Dosificación de PAC

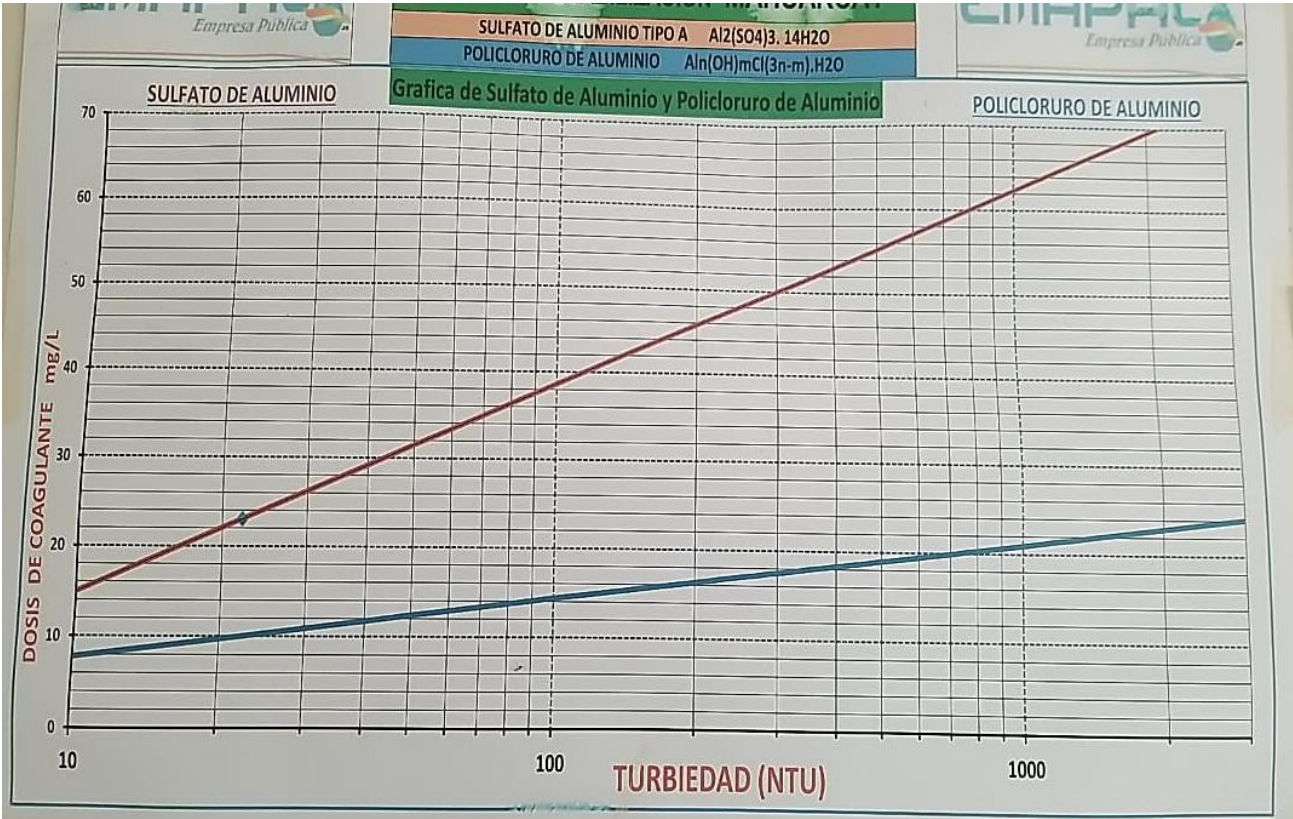


Figura 39. Curva de dosificación de PAC.

Fuente: EMAPAL.

## Anexo 5. Muestreo y análisis de parámetros físicos y químicos.



**Figura 40.** Punto de muestreo para el agua cruda



**Figura 41.** Punto de muestreo a la salida del sedimentador



**Figura 43.** Punto de muestreo a la salida del filtro



**Figura 42.** Análisis físico y químico

**Fuente:** Elaboración propia.



## Anexo 6. Eficiencia de los sistemas tubulares pilotos implementados para el tratamiento de agua potable.

**Tabla 30.** Eficiencia del sedimentador con previo uso del FTFH

Diámetro (mm)	Q (L/s)	NTU cruda	Color cruda	NTU_SPH	Color_SPH	Eficiencia_NTU	Eficiencia_color
75	0.5	14.40	164.50	10.54	108.50	26.81	34.04
75	0.5	43.20	474.50	3.39	51.00	92.15	89.25
75	0.5	90.00	855.00	25.20	235.00	72.00	72.51
75	0.5	282.00	1528.00	29.95	292.00	89.38	80.89
75	1	11.85	142.50	5.85	97.00	50.63	31.93
75	1	21.40	242.50	5.00	105.00	76.64	56.70
75	1	75.85	721.50	4.40	43.00	94.20	94.04
75	1	522.00	2847.00	46.35	370.50	91.12	86.99
75	2	13.25	127.00	8.27	62.00	37.58	51.18
75	2	16.95	158.00	10.13	111.50	40.24	29.43
75	2	74.95	661.00	21.80	253.00	70.91	61.72
75	2	376.50	1804.50	24.51	223.00	93.49	87.64
110	0.5	14.70	154.50	2.92	34.50	80.14	77.67
110	0.5	31.70	355.65	4.14	48.50	86.94	86.36
110	0.5	74.50	594.00	4.79	35.50	93.57	94.02
110	0.5	712.50	5722.50	9.96	101.00	98.60	98.24
110	1	9.24	97.50	2.43	44.50	73.70	54.36
110	1	21.35	226.00	8.75	62.50	59.02	72.35
110	1	70.50	775.50	15.55	186.00	77.94	76.02
110	1	426.00	3485.50	18.10	170.00	95.75	95.12
110	2	8.04	88.00	7.43	79.00	7.59	10.23
110	2	29.80	319.00	23.35	219.50	21.64	31.19
110	2	77.90	823.00	36.55	350.00	53.08	57.47

Bustamante Peralta Jorge Sebastián

Gómez García Natasha Estefanía

110	2	191.50	2095.50	27.60	283.00	85.59	86.49
Combinado	0.5	11.25	152.50	2.95	34.50	73.78	77.38
Combinado	0.5	26.65	240.50	5.05	52.50	81.05	78.17
Combinado	0.5	60.10	643.00	3.72	45.00	93.81	93.00
Combinado	0.5	556.50	3569.50	19.28	182.50	96.54	94.89
Combinado	1	8.03	65.50	2.62	22.50	67.37	65.65
Combinado	1	30.60	151.00	12.00	19.20	60.78	87.28
Combinado	1	77.50	641.50	16.60	83.60	78.58	86.97
Combinado	1	389.00	2557.50	28.77	203.00	92.60	92.06
Combinado	2	6.23	67.00	5.98	60.50	4.01	9.70
Combinado	2	35.10	358.00	6.37	82.50	81.85	76.96
Combinado	2	63.60	582.00	12.54	127.00	80.28	78.18
Combinado	2	170.00	1902.00	38.10	311.00	77.59	83.65
PTAP-B	0.5	13.45	157.17	1.32	13.83	90.16	91.20
PTAP-B	0.5	33.85	356.88	1.60	17.67	95.28	95.05
PTAP-B	0.5	74.87	697.33	2.21	19.50	97.05	97.20
PTAP-B	0.5	517.00	3606.67	10.51	107.67	97.97	97.02
PTAP-B	1	9.71	101.83	0.95	16.50	90.25	83.80
PTAP-B	1	24.45	206.50	1.21	18.33	95.04	91.12
PTAP-B	1	74.62	712.83	2.28	24.33	96.94	96.59
PTAP-B	1	445.67	2963.33	9.60	85.83	97.85	97.10
PTAP-B	2	9.17	94.00	1.38	9.00	84.96	90.43
PTAP-B	2	27.28	278.33	4.04	49.33	85.20	82.28
PTAP-B	2	72.15	688.67	2.68	101.17	96.28	85.31
PTAP-B	2	246.00	1934.00	8.93	90.50	96.37	95.32

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 31.** Eficiencia del filtro con previo uso del sedimentador con el sistema del FTFH piloto

<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Q (L/s)</b>	<b>NTU cruda</b>	<b>Color cruda</b>	<b>NTU_FPV</b>	<b>Color_FPV</b>	<b>Eficiencia_NTU</b>	<b>Eficiencia_color</b>
75	0.5	14.40	164.50	0.35	0.00	97.57	100.00
75	0.5	43.20	474.50	0.30	0.00	99.32	100.00
75	0.5	90.00	855.00	0.77	3.50	99.15	99.59
75	0.5	282.00	1528.00	0.78	10.50	99.73	99.31
75	1	11.85	142.50	0.30	0.00	97.47	100.00
75	1	21.40	242.50	0.25	0.50	98.83	99.79
75	1	75.85	721.50	0.54	0.00	99.29	100.00
75	1	522.00	2847.00	0.77	2.00	99.85	99.93
75	2	13.25	127.00	0.23	0.00	98.30	100.00
75	2	16.95	158.00	0.34	0.00	97.99	100.00
75	2	74.95	661.00	0.59	1.50	99.21	99.77
75	2	376.50	1804.50	3.62	1.00	99.04	99.94
110	0.5	14.70	154.50	0.13	0.00	99.12	100.00
110	0.5	31.70	355.65	0.34	0.00	98.93	100.00
110	0.5	74.50	594.00	0.40	0.00	99.46	100.00
110	0.5	712.50	5722.50	0.17	0.00	99.98	100.00
110	1	9.24	97.50	0.25	0.00	97.29	100.00
110	1	21.35	226.00	0.28	0.00	98.69	100.00
110	1	70.50	775.50	0.37	0.00	99.48	100.00
110	1	426.00	3485.50	0.56	3.50	99.87	99.90
110	2	8.04	88.00	4	16	7.71	29.55
110	2	29.80	319.00	2	1	83.32	78.84
110	2	77.90	823.00	0.25	0.00	99.68	100.00
110	2	191.50	2095.50	0.28	0.00	99.85	100.00

# UCUENCA

Combinado	0.5	11.25	152.50	0.26	0.00	97.69	100.00
Combinado	0.5	26.65	240.50	0.42	0.00	98.42	100.00
Combinado	0.5	60.10	643.00	0.37	0.00	99.38	100.00
Combinado	0.5	556.50	3569.50	2.04	24.00	99.63	99.33
Combinado	1	8.03	65.50	0.28	0.00	96.51	100.00
Combinado	1	30.60	151.00	0.17	5.50	99.44	96.36
Combinado	1	77.50	641.50	0.63	8.50	99.19	98.67
Combinado	1	389.00	2557.50	2.09	8.50	99.46	99.67
Combinado	2	6.23	67.00	0.12	0.00	98.07	100.00
Combinado	2	35.10	358.00	0.32	0.00	99.09	100.00
Combinado	2	63.60	582.00	4.55	7.50	92.85	98.71
Combinado	2	170.00	1902.00	0.27	0.00	99.84	100.00
PTAP-B	0.5	13.45	157.17	0.30	0.00	97.79	100.00
PTAP-B	0.5	33.85	356.88	0.26	0.00	99.23	100.00
PTAP-B	0.5	74.87	697.33	0.41	0.50	99.45	99.93
PTAP-B	0.5	517.00	3606.67	1.36	11.83	99.74	99.67
PTAP-B	1	9.71	101.83	0.33	0.00	96.63	100.00
PTAP-B	1	24.45	206.50	0.18	1.50	99.28	99.27
PTAP-B	1	74.62	712.83	0.33	0.17	99.55	99.98
PTAP-B	1	445.67	2963.33	0.64	7.00	99.86	99.76
PTAP-B	2	9.17	94.00	0.24	0.00	97.42	100.00
PTAP-B	2	27.28	278.33	0.42	0.00	98.45	100.00
PTAP-B	2	72.15	688.67	0.56	0.00	99.22	100.00
PTAP-B	2	246.00	1934.00	3.18	21.33	98.71	98.90

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 32.** Eficiencia del sedimentador con previo uso del FTFV

<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Q (L/s)</b>	<b>NTU cruda</b>	<b>Color cruda</b>	<b>NTU_SPV</b>	<b>Color_SPV</b>	<b>Eficiencia_NTU</b>	<b>Eficiencia_color</b>
63	0.5	10.81	103.5	5.09	68	52.91	34.3
63	0.5	34.05	381.5	4.11	62	87.93	83.75
63	0.5	59	342.5	6.76	59	88.54	82.77
63	0.5	602	5311	8.66	81	98.56	98.47
63	1	8.46	95	2.83	42	66.55	55.79
63	1	25.8	326	11.46	87	55.58	73.31
63	1	78.6	1156	7.47	82.5	90.5	92.86
63	1	355.5	3035	13.03	68.5	96.33	97.74
110	0.5	14.15	168.5	2.26	20.5	84.03	87.83
110	0.5	31.75	340.5	3.08	38.5	90.3	88.69
110	0.5	87	737.5	8.35	89.5	90.4	87.86
110	0.5	151.5	1460	11.35	108.5	92.51	92.57
110	1	14.35	158.5	2.76	31.5	80.77	80.13
110	1	25.4	300	2.78	26.5	89.06	91.17
110	1	70	772.5	3.39	43.5	95.16	94.37
110	1	119.5	1227	4.8	43	95.98	96.5
Combinado	0.5	13.85	148.5	2.56	28	81.52	81.14
Combinado	0.5	36.95	365.5	3.16	34	91.45	90.7
Combinado	0.5	85.3	895.5	2.95	39.5	96.54	95.59
Combinado	0.5	358.5	3913	4.63	62.5	98.71	98.4
Combinado	1	12.85	142	2.44	74	81.01	47.89
Combinado	1	25.9	169.5	4.21	59.5	83.75	64.9
Combinado	1	74.25	864.5	3.64	42	95.1	95.14
Combinado	1	134	1516	4.99	50	96.28	96.7
PTAP-B	0.5	12.94	140.17	2.5	32.67	80.65	76.69
PTAP-B	0.5	34.25	362.5	2.16	24.83	93.7	93.15
PTAP-B	0.5	77.1	658.5	2.72	38.33	96.47	94.18

# UCUENCA

PTAP-B	0.5	370.67	3561.33	2.58	26	99.3	99.27
PTAP-B	1	11.89	131.83	1.49	37.33	87.49	71.68
PTAP-B	1	25.7	265.17	1.78	21.17	93.09	92.02
PTAP-B	1	74.28	931	1.84	64	97.52	93.13
PTAP-B	1	203	1926	2.13	22.33	98.95	98.84

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 33.** Eficiencia del filtro con previo uso del sedimentador con el sistema del FTFV piloto

<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Q (L/s)</b>	<b>NTU cruda</b>	<b>Color cruda</b>	<b>NTU_FPV</b>	<b>Color_FPV</b>	<b>Eficiencia_NTU</b>	<b>Eficiencia_color</b>
63	0.5	10.81	103.5	0.32	0	97.04	100
63	0.5	34.05	381.5	0.58	0	98.3	100
63	0.5	59	342.5	0.71	0	98.8	100
63	0.5	602	5311	0.64	0.5	99.89	99.99
63	1	8.46	95	0.62	3.5	92.67	96.32
63	1	25.8	326	1	31.5	96.12	90.34
63	1	78.6	1156	0.84	1.5	98.93	99.87
63	1	355.5	3035	0.44	3.5	99.88	99.88
110	0.5	14.15	168.5	0.23	0	98.37	100
110	0.5	31.75	340.5	0.52	0	98.36	100
110	0.5	87	737.5	0.48	0	99.45	100
110	0.5	151.5	1460	0.63	2.5	99.58	99.83
110	1	14.35	158.5	0.38	0	97.35	100
110	1	25.4	300	0.21	0	99.17	100
110	1	70	772.5	0.24	0	99.66	100
110	1	119.5	1227	0.64	0	99.46	100
Combinado	0.5	13.85	148.5	0.27	0	98.05	100
Combinado	0.5	36.95	365.5	0.66	0	98.21	100
Combinado	0.5	85.3	895.5	0.46	0	99.46	100
Combinado	0.5	358.5	3913	0.41	.0	99.89	100
Combinado	1	12.85	142	0.36	0	97.2	100
Combinado	1	25.9	169.5	0.26	0	99	100
Combinado	1	74.25	864.5	0.66	6	99.11	99.31
Combinado	1	134	1516	0.54	0	99.6	100
PTAP-B	0.5	12.94	140.17	0.4	0	96.88	100
PTAP-B	0.5	34.25	362.5	0.37	0.33	98.93	99.91
PTAP-B	0.5	77.1	658.5	0.65	4.17	99.16	99.37

# UCUENCA

PTAP-B	0.5	370.67	3561.33	0.33	0	99.91	100
PTAP-B	1	11.89	131.83	0.33	0.17	97.22	99.87
PTAP-B	1	25.7	265.17	0.33	0	98.72	100
PTAP-B	1	74.28	931	0.3	0	99.59	100
PTAP-B	1	203	1926	0.41	0	99.8	100

Fuente: Elaboración propia



## Anexo 7. Pruebas estadísticas realizadas en el programa RStudio.

```
> shapiro.test(Datos_para_el_programa_R_completo1$NTU)

      Shapiro-Wilk normality test

data:  Datos_para_el_programa_R_completo1$NTU
W = 0.68492, p-value = 1.653e-07

> shapiro.test(Datos_para_el_programa_R_completo1$Dosis)

      Shapiro-Wilk normality test

data:  Datos_para_el_programa_R_completo1$Dosis
W = 0.92225, p-value = 0.01466
```

**Figura 44.** Prueba de normalidad de Shapiro Wilk para los datos de turbiedad y dosis

**Fuente:** Elaboración propia.

```
> cor(x=Datos_para_el_programa_R_completo1$NTU,y=Datos_para_el_programa_R_completo1$Dosis, method = 'spearman')
[1] 0.9412977
> library(readxl)
> Datos_para_el_programa_R_completo1 <- read_excel("D:/tesis/tesis/Datos para el programa R completo1.xlsx",
+ sheet = "vertical")
New names:
* `` -> ...1
* `` -> ...2
* `` -> ...3
> view(Datos_para_el_programa_R_completo1)
> h <- Datos_para_el_programa_R_completo1
>
> cor(x=Datos_para_el_programa_R_completo1$NTU,y=Datos_para_el_programa_R_completo1$Dosis, method = 'spearman')
[1] 0.9730435
>
```

**Figura 45.** Correlación Spearman para los datos de turbiedad y dosis en los FTFH y FTFV

**Fuente:** Elaboración propia.

## Anexo 8. Histograma y QQplot de Dosis Shapiro Wilk de los sistemas tubulares pilotos implementados para el tratamiento de agua potable.

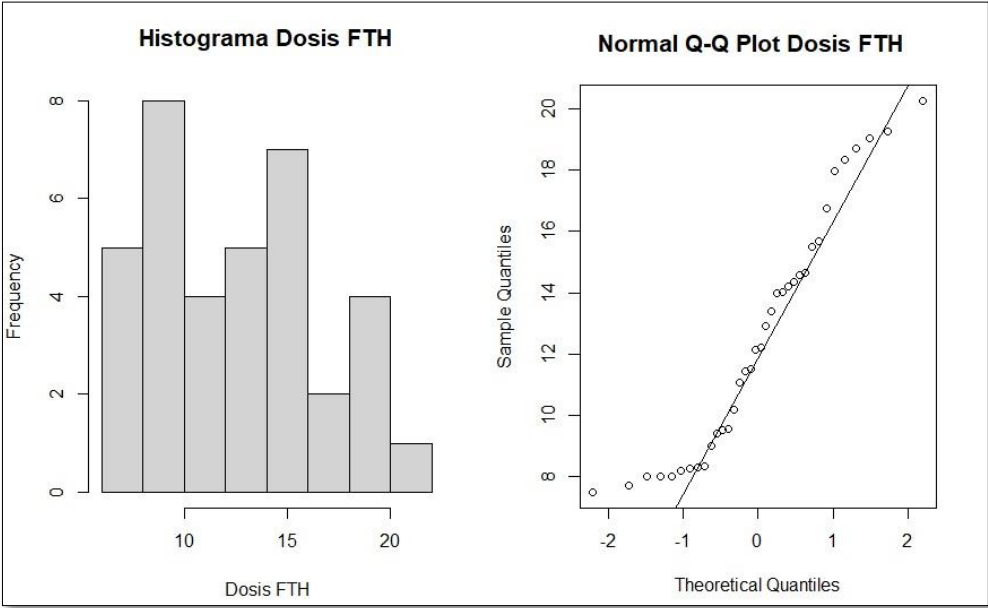


Figura 46. Histograma y QQ Plot de la dosis del FTFH, prueba de Shapiro Wilk.

Fuente: Elaboración propia

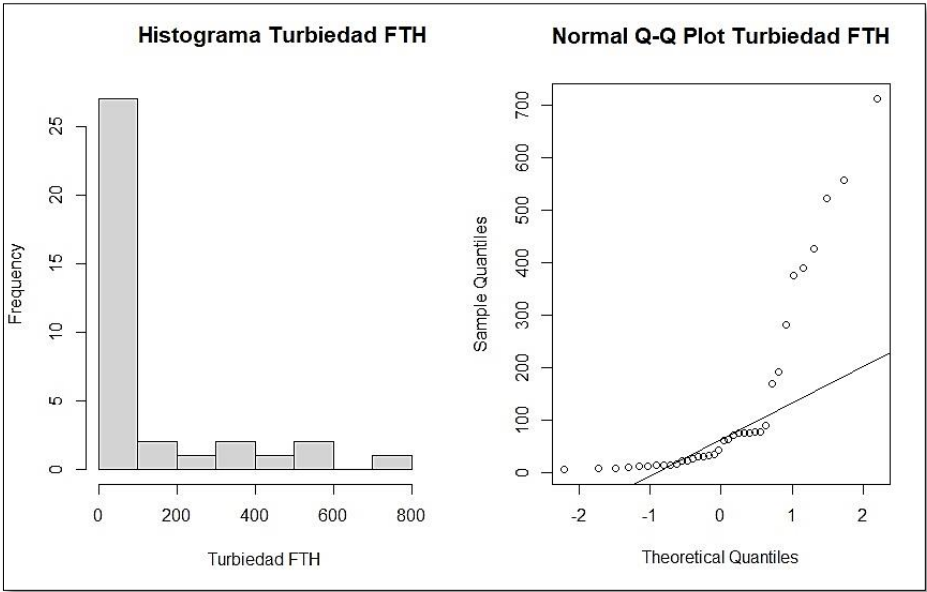


Figura 47. Histograma y QQ Plot de la turbiedad del FTFH, prueba de Shapiro Wilk.

Fuente: Elaboración propia.

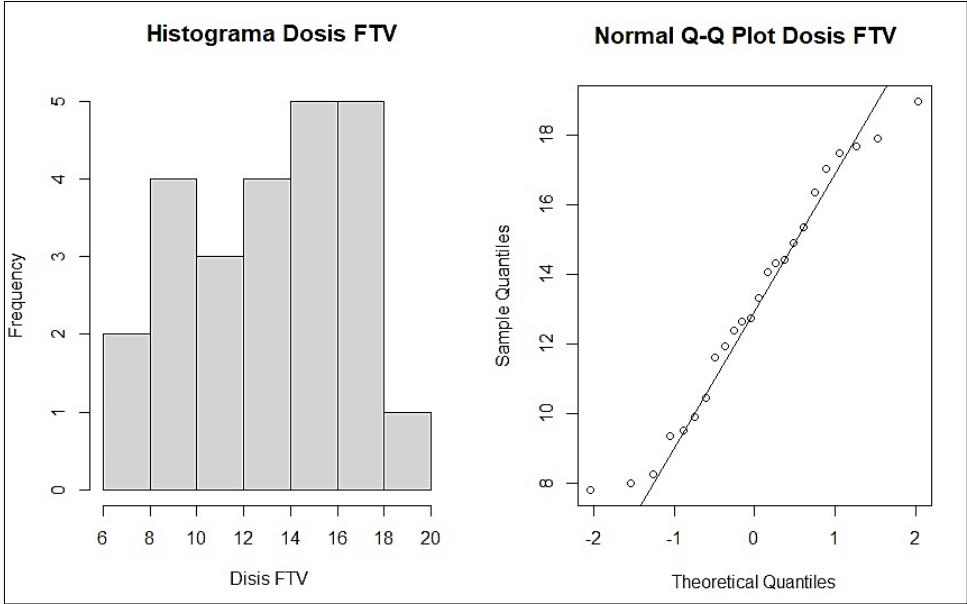


Figura 48. Histograma y QQ Plot de la dosis del FTFV, prueba de Shapiro Wilk.

Fuente: Elaboración propia

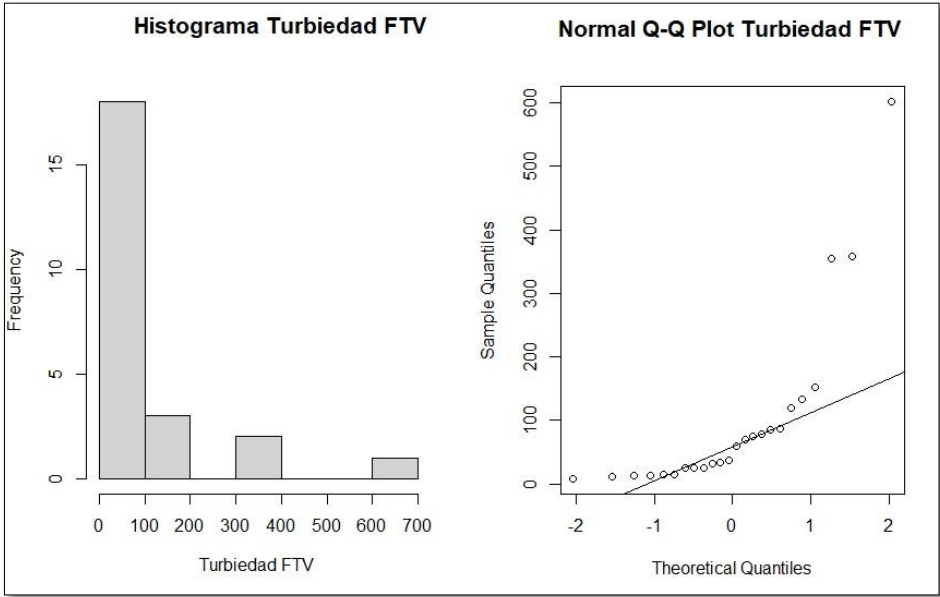


Figura 49..Histograma y QQ Plot de la turbiedad del FTFV, prueba de Shapiro Wilk.

Fuente: Elaboración propia.

## Anexo 9. Correlación de Spearman de la variables físicas e hidráulicas.

Coeficientes de correlación

Correlación de Spearman: Coeficientes\probabilidades

	ETSED	Nre	T(0)	G(0)	Caudal	NTU Cruda	L	Diametro
ETSED	1.00	0.03	0.01	0.09	0.01	1.8E-05	0.59	0.83
Nre	-0.45	1.00	0.00	8.7E-09	0.00	0.63	0.17	0.17
T(0)	0.42	-1.00	1.00	8.7E-09	1.1E-10	0.76	9.6E-04	0.12
G(0)	-0.35	0.89	-0.89	1.00	8.0E-05	0.81	2.3E-04	2.3E-04
Caudal	-0.44	0.96	-0.84	0.72	1.00	0.58	1.00	1.00
NTU Cruda	0.72	-0.10	0.05	-0.05	-0.09	1.00	0.73	0.82
L	0.09	-0.29	0.53	-0.68	0.00	-0.06	1.00	1.9E-03
Diametro	-0.04	-0.29	-0.26	-0.68	0.00	0.04	-0.50	1.00

**Figura 50.** Matriz de correlación de Spearman de las variables que intervienen en el FTFH

Fuente: Elaboración propia.

Coeficientes de correlación

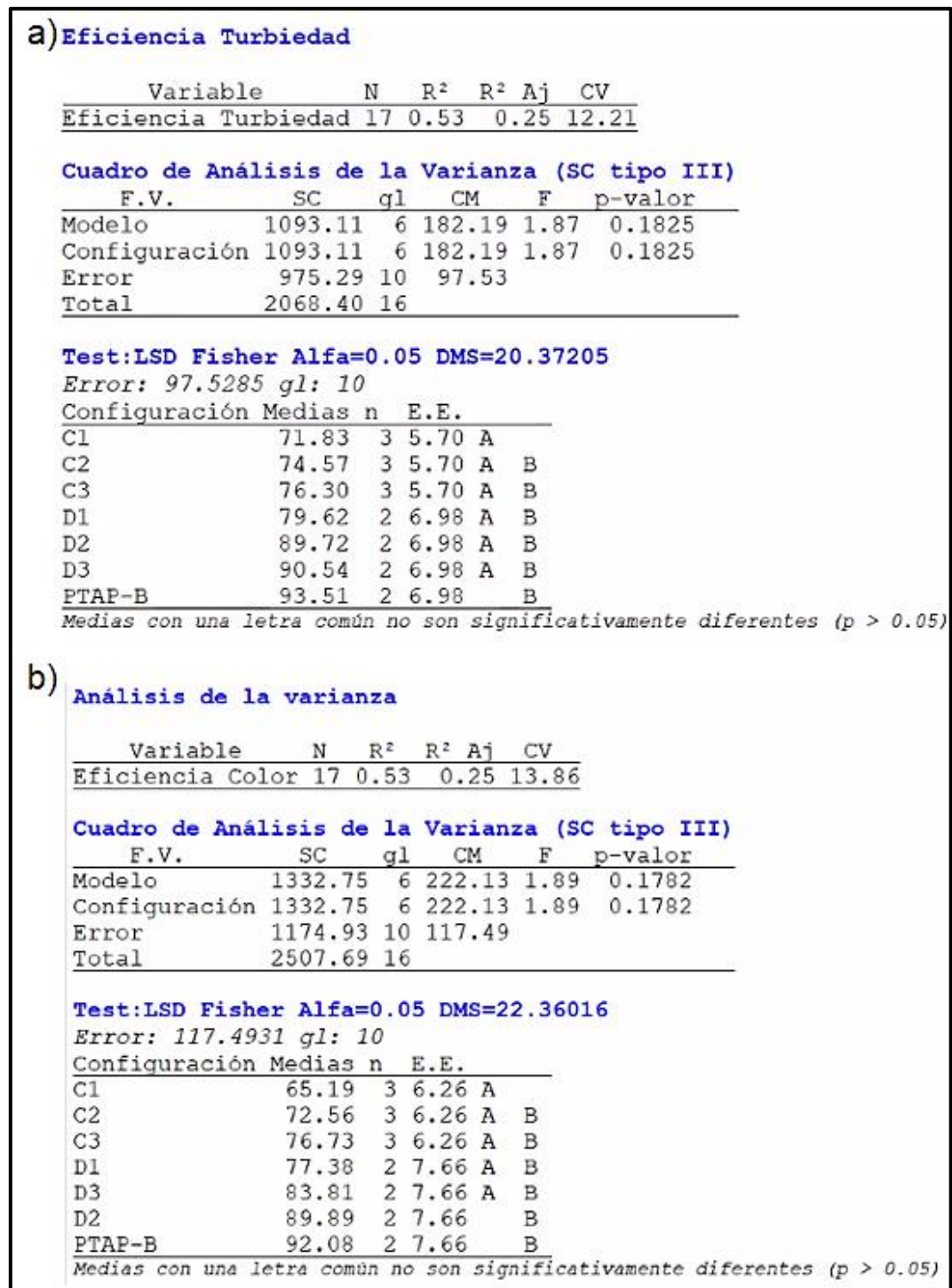
Correlación de Spearman: Coeficientes\probabilidades

	ETSED	Nre	T(0)	G(0)	Caudal	NTU Cruda	L	Diametro
ETSED	1.00	0.89	0.89	0.59	0.84	4.5E-04	0.48	0.48
Nre	-0.04	1.00	0.00	2.0E-04	3.0E-06	0.79	0.08	0.08
T(0)	0.04	-1.00	1.00	2.0E-04	2.3E-04	0.79	0.09	0.09
G(0)	-0.15	0.80	-0.80	1.00	0.08	0.89	3.0E-06	3.0E-06
Caudal	0.05	0.89	-0.68	0.45	1.00	0.76	1.00	1.00
NTU Cruda	0.91	-0.07	0.07	-0.04	-0.08	1.00	1.00	1.00
L	-0.19	0.45	0.36	0.89	0.00	0.00	1.00	0.00
Diametro	0.19	-0.45	-0.36	-0.89	0.00	0.00	-1.00	1.00

**Figura 51.** Matriz de correlación de Spearman de las variables que intervienen en el FTFV

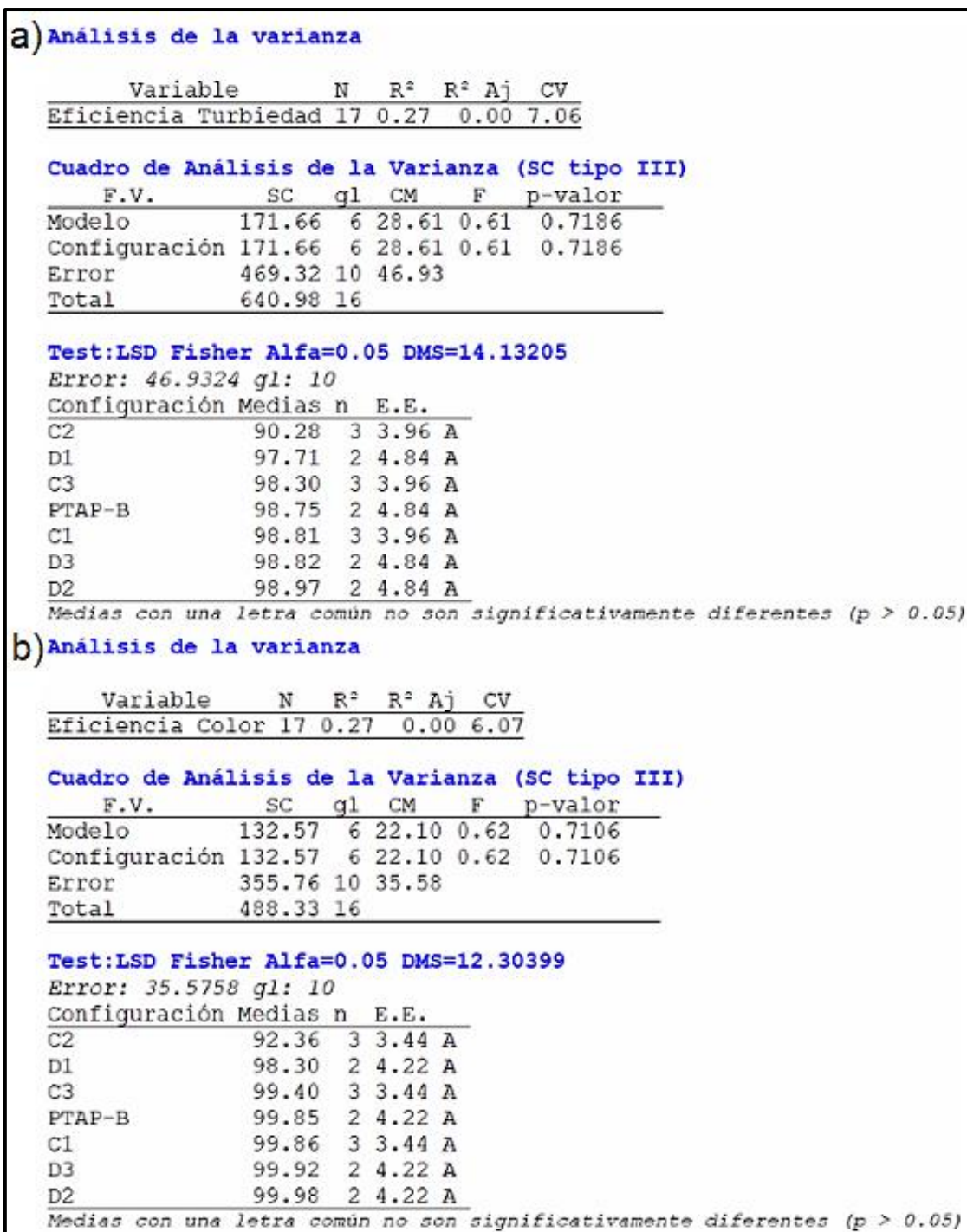
Fuente: Elaboración propia.

## Anexo 10. Análisis de varianza



**Figura 52.** ANNOVA para la turbiedad a) y color b) a la salida del sedimentador

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 53.** ANNOVA para turbiedad a) y color b) a la salida del filtro

**Fuente:** Elaboración propia.

## Anexo 11. Prueba de Wilcoxon

Prueba T para muestras Independientes

Clasific	Variable	Grupo 1	Grupo 2	n(1)	n(2)	Media(1)	Media(2)	Media(1)-Media(2)	LI(95)	LS(95)	Var(1)	Var(2)	pHomVar	T	gl	p-valor	prueba
Coagulante	Eficiencia {PAC}	{Sulfato}		3	3	74.57	75.43	-0.86	-23.64	21.92	165.66	36.29	0.3594	-0.10	4	0.9216	Bilateral

**Figura 54.** Prueba de Wilcoxon a la salida del sedimentador con previo uso del FTFH y usando como coagulantes PAC y sulfato de aluminio

Prueba T para muestras Independientes

Clasific	Variable	Grupo 1	Grupo 2	n(1)	n(2)	Media(1)	Media(2)	Media(1)-Media(2)	LI(95)	LS(95)	Var(1)	Var(2)	pHomVar	T	gl	p-valor	prueba
Coagulante	Eficiencia {PAC}	{Sulfato}		3	3	90.28	98.53	-8.25	-46.23	29.73	233.45	0.32	0.0027	-0.93	2	0.4488	Bilateral

**Figura 55.** Prueba de Wilcoxon a la salida del filtro con previo uso del sedimentador y usando como coagulantes PAC y sulfato de aluminio

Prueba T para muestras Independientes

Clasific	Variable	Grupo 1	Grupo 2	n(1)	n(2)	Media(1)	Media(2)	Media(1)-Media(2)	LI(95)	LS(95)	Var(1)	Var(2)	pHomVar	T	gl	p-valor	prueba
Coagulante	Eficiencia {PAC}	{Sulfato}		2	2	90.55	73.44	17.11	9.53	24.69	4.53	1.67	0.6955	9.71	2	0.0104	Bilateral

**Figura 56.** Prueba de Wilcoxon a la salida del sedimentador con previo uso del FTFV y usando como coagulantes PAC y sulfato de aluminio

Clasific	Variable	Grupo 1	Grupo 2	n(1)	n(2)	Media(1)	Media(2)	Media(1)-Media(2)	LI(95)	LS(95)	Var(1)	Var(2)	pHomVar	T	gl	p-valor	prueba
Coagulante	Eficiencia {PAC}	{Sulfato}		2	2	98.97	98.84	0.13	-0.42	0.68	1.2E-03	0.03	0.2513	1.02	2	0.4151	Bilateral

**Figura 57.** Prueba de Wilcoxon a la salida del filtro con previo uso del sedimentador y usando como coagulantes PAC y sulfato de aluminio.