

Optimización del Sistema de Floculación Planta de Tratamiento de Agua Potable – PTAP

Florida del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga SA ESP

Oscar Javier Naranjo Estupiñán

Monografía para Optar al Título de Especialista en Química Ambiental

Director

Gonzalo Peña Ortiz

Especialista en Ingeniería Ambiental

Codirector

Yolanda Otero Rodríguez

Especialista en Química Ambiental

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Química

Especialización en Química Ambiental

Bucaramanga

2025

### **Dedicatoria**

Este trabajo está dedicado a Dios, por darme la oportunidad de adelantar este posgrado y sapiencia necesaria para culminarlo satisfactoriamente.

A mi padre que está en el cielo y que siempre anheló verme progresar y triunfar con esfuerzo, dedicación y alegría.

A mi madre quien día a día hace oración, para que esté bien en donde quiera que me encuentre y nunca me falte nada.

A la Ingeniera Yolanda Arboleda Tovar, a quien llevo en mi corazón, a ella debo una gran escuela, ya que durante varios años de trabajo en el amb SA ESP, fue como una madre para mí, fue mi mentora y gracias a su apoyo pude adquirir el conocimiento y experiencia que hoy me permiten finalizar este posgrado a satisfacción y me abre puertas para seguir forjando un mejor futuro.

A mis hijas Marieth Sofia, Maria Fernanda e Isabella Naranjo Mora, quienes son la motivación más grande para seguir aprovechando oportunidades en pro de mejorar su bienestar.

### **Agradecimientos**

Al Ingeniero Jairo Fabián Jaimes Rojas, quien me dio la oportunidad de vincularme al amb SA ESP para mejorar el bienestar de mi familia y de seguir creciendo como persona y como profesional.

Especial agradecimiento a la Doctora Yolanda Otero Rodríguez, Líder de Proceso 3 de la Planta Florida del amb SA ESP hasta el año 2024, quien con seguridad se alegra mucho que haya finalizado este posgrado; aportó su experiencia al frente de esta PTAP y conocimiento técnico, facilitó personal de apoyo y espacio físico para adelantar este trabajo.

Agradezco profundamente, al Ingeniero Gonzalo Peña Ortiz, por ser mi director de proyecto y aportar su conocimiento, experiencia y dedicación para llegar al cumplimiento satisfactorio de los objetivos de este proyecto de investigación.

Al Acueducto Metropolitano De Bucaramanga amb SA ESP, por todo el apoyo que a diario me da oportunidad para continuar creciendo como persona y como profesional.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	18
1. Objetivos.....	20
1.1 Objetivos General .....	20
1.2 Objetivos Específicos.....	20
2. Marco Contextual.....	21
2.1 Descripción del Proceso de Potabilización.....	23
3. Marco Teórico.....	26
3.1 Floculación.....	26
3.2 Mecanismos de Transporte .....	26
3.2.1 Floculación Pericinético o Browniana.....	27
3.2.2 Floculación Ortocinética o en Cizalladura Laminar .....	28
3.2.3 Sedimentación Diferencial.....	29
3.2.4 Transporte Turbulento .....	30
3.3 Parámetros de Operación en la Mezcla Lenta.....	31
3.3.1 Gradiente de Velocidad.....	31
3.3.2 Tiempo de Mezcla.....	37
3.3.3 Variación del Caudal.....	37
3.4 Tipos de Floculadores .....	38
3.5 Tipos de Flujo .....	42
3.5.1 Flujo Intermitente o Discontinuo .....	42
3.5.2 Flujo Continuo .....	42

3.5.3 Flujo de Pistón .....	42
3.5.4 Flujo Mezclado .....	43
3.5.5 Flujo No Ideal .....	43
3.6 Análisis de las Características Hidráulicas de un Floculador .....	43
3.6.1 Ensayo de Trazadores .....	44
3.6.2 Sustancias Trazadoras Empleadas .....	44
3.6.3 Modo de Aplicación del Trazador .....	45
3.6.4 Análisis de Datos .....	46
3.6.5 Modelo de Wolf y Resnick .....	47
3.6.6 Método Para el Análisis de la Curva de Tendencia de Gauss.....	48
3.6.7 Índice de Morrill .....	51
3.6.8 Modelo de Reactores Completamente Mezclados en Serie RCM.....	52
4. Metodología .....	54
4.1 Fase No. 1. Revisión Estudios Previos .....	54
4.1.1 Estudio 1 .....	54
4.1.2 Estudio 2 .....	55
4.1.3 Estudio 3 .....	55
4.1.4 Estudio 4 .....	56
4.2 Fase No. 2. Revisión de la Estructura Existente .....	57
4.3 Fase No. 3. Diseño del Modelo.....	63
4.3.1 Cálculos Hidráulicos Para el Dimensionamiento de Equipos Electromecánicos y de Agitación del Modelo .....	70
4.4 Fase No. 4. Construcción del Modelo.....	84

4.5 Fase No. 5. Pruebas de Proceso .....	85
5. Resultados Obtenidos.....	97
5.1 Prueba con Anilina.....	97
5.2 Prueba de Trazadores .....	98
5.2.1 Prueba con Configuración de la Estructura Existente.....	98
5.2.2 Método de Wolf-Resnick.....	101
5.3 Análisis de la Curva de Tendencia del Trazador .....	102
5.3.1 Índice de Morrill .....	104
5.4 Prueba con Configuración de la Estructura Propuesta en el Proyecto.....	105
5.4.1 Método de Wolf-Resnick.....	108
5.5 Análisis de la Curva de Tendencia del Trazador .....	109
5.5.1 Índice de Morrill .....	111
5.5.2 Pruebas con Valores Altos de Turbiedad y Color.....	117
5.5.3 Pruebas con Valores Bajos de Turbiedad y Color .....	119
6. Conclusiones .....	131
7. Recomendaciones .....	134
Referencias Bibliográficas .....	135
Apéndices.....	139

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Tipos de Floculadores.....	38
Tabla 2. Formas de Aplicar o Dosificar el Trazador .....	45
Tabla 3. Parámetros Principales Para el Análisis gráfico de la curva del trazador.....	50
Tabla 4. Análisis de la Curva de Gauss .....	51
Tabla 5. Índice de Morrill .....	52
Tabla 6. Dimensiones del Tanque Floculador de la Sección Antigua - PTAP Florida .....	58
Tabla 7. Relación de las Diferentes Variables de Flujo del Floculador Mecánico - PTAP Florida.....	64
Tabla 8. Variables .....	65
Tabla 9. Dimensiones del Modelo en Centímetros (cm) .....	66
Tabla 10. Parámetros Operativos a Escala Para el Modelo .....	68
Tabla 11. Parámetros de Diseño de Elementos de Agitación.....	71
Tabla 12. Criterios de diseño RAS .....	71
Tabla 13. Diseño 2 Aspas, 1 Paleta / Aspa (2 Paletas / Eje).....	73
Tabla 14. Diseño 2 Aspas, 2 Paletas / Aspa (4 Paletas / Eje) .....	74
Tabla 15. Diseño 2 Aspas, 3 Paletas / Aspa (6 Paletas / Eje) .....	75
Tabla 16. Diseño 4 Aspas, 1 Paleta / Aspa (4 Paletas / Eje).....	76
Tabla 17. Diseño 4 Aspas, 2 Paletas / Aspa (8 Paletas / Eje) .....	77
Tabla 18. Diseño 4 Aspas, 3 Paletas / Aspa (12 Paletas / Eje) .....	78
Tabla 19. Velocidades de Giro de los Ejes (RPM) y Potencia (N.m).....	80
Tabla 20. Secciones de la Cámara .....	87

Tabla 21. Cantidad de Trazador Requerido .....	90
Tabla 22. Tiempo de Retención Prueba de Anilina .....	97
Tabla 23. Resultado Prueba Trazadores Configuración de la Estructura Existente .....	98
Tabla 24. Resultado Prueba Trazadores Configuración de la Estructura Existente .....	101
Tabla 25. Resultados de la Curva de Tendencia Configuración de la Estructura Existente .....	103
Tabla 26. Resultado Prueba Trazadores Configuración de la Estructura Propuesta en el Proyecto .....	105
Tabla 27. Resultado Prueba Trazadores Configuración de la Estructura Propuesta en el Proyecto .....	108
Tabla 28. Resultados de la Curva de Tendencia Configuración de la Estructura Propuesta en el Proyecto .....	110
Tabla 29. Resultados Prueba Eficiencia - 2 Aspas, 1 Paleta / Aspa (2 Paletas / Eje).....	112
Tabla 30. Resultados Prueba Eficiencia - 2 Aspas, 2 Paletas / Aspa (4 Paletas / Eje) .....	112
Tabla 31. Resultados Prueba Eficiencia - 2 Aspas, 3 Paletas / Aspa (6 Paletas / Eje) .....	113
Tabla 32. Resultados Prueba Eficiencia - 4 Aspas, 1 Paleta / Aspa (4 Paletas / Eje).....	113
Tabla 33. Resultados Prueba Eficiencia - 4 Aspas, 2 Paletas / Aspa (8 Paletas / Eje) .....	114
Tabla 34. Resultados Prueba Eficiencia - 4 Aspas, 3 Paletas / Aspa (12 Paletas / Eje) .....	114
Tabla 35. Resumen Resultados Prueba de Eficiencia.....	115
Tabla 36. Resultados Prueba Eficiencia – Gradientes 40,45 - 33,11 - 19,99 - 14,31 S <sup>-1</sup> .....	117
Tabla 37. Resultados Prueba Eficiencia – Gradientes 33,11 - 19,99 - 14,31 - 10,00 S <sup>-1</sup> .....	117
Tabla 38. Resultados Prueba Eficiencia – Gradientes 19,99 - 14,31 - 10,00 - 6,00 S <sup>-1</sup> .....	118
Tabla 39. Resultados Prueba Eficiencia – Gradientes 40,45 - 33,11 - 19,99 - 14,31 S <sup>-1</sup> .....	119
Tabla 40. Resultados Prueba Eficiencia – Gradientes 50 - 40 - 20 - 10 S <sup>-1</sup> .....	120

Tabla 41. Resultados Prueba Eficiencia – Gradientes 60 - 40 - 20 - 10S <sup>-1</sup> .....	120
Tabla 42. Gasto por Exceso en Aplicación de Insumos Químico.....	122
Tabla 43. Costos Estimado del Proyecto .....	123
Tabla 44. Reducción Costos por Consumo de Energía.....	124
Tabla 45. Recuperación de la Inversión.....	125
Tabla 46. Dimensionamiento del Tanque de Floculación .....	125
Tabla 47. Dimensionamiento Para una Línea de Agitación del 50% .....	126
Tabla 48. Cálculos Hidráulicos Sistema Propuesto .....	127
Tabla 49. Verificación Gradientes de Paso Entre Cámaras .....	129

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Ubicación PTAP Florida .....	21
Figura 2. Planta Antigua (400 L/s) .....	22
Figura 3. Sección Nueva (200 L/s) .....	22
Figura 4. Agitador de Paletas.....	33
Figura 5. Distancia del Eje a la Paleta .....	35
Figura 6. Floculador Mecánico de Eje Horizontal.....	40
Figura 7. Floculador Mecánico de Eje Vertical .....	41
Figura 8. Esquema de un Floculador Mecánico Reciprocante (Walking Beam).....	41
Figura 9. Curva Cantidad de Trazador que Permanece en el Reactor .....	48
Figura 10. Concentración del Trazador en el Efluente de un Reactor .....	49
Figura 11. Distribución de Tiempos de Residencia E (t) Experimental y Teóricas .....	53
Figura 12. Floculador Reciprocante PTAP Florida amb SA ESP .....	60
Figura 13. Cámara de Entrada y Canastas de Agitación Entre Secciones Floculador Reciprocante PTAP Florida amb SA ESP .....	61
Figura 14. Tabiques o Pantallas Divisorias Entre Secciones Floculador Reciprocante PTAP Florida amb SA ESP.....	61
Figura 15. Cámara de Salida Floculador Reciprocante PTAP Florida amb SA ESP. ....	62
Figura 16. Configuración de la Estructura Existente .....	63
Figura 17. Dimensiones de Tanque Floculador .....	69
Figura 18. Dimensiones Estructuras Internas de Tanque Floculador .....	70
Figura 19. Eje con 4 Aspas, 3 Paletas / Aspa (12 Paletas / Eje) .....	79

OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE FLOCULACIÓN PTAP	11
Figura 20. Motorreductor de Metal 6V 15RPM N20 .....	82
Figura 21. Controlador PWM de Velocidad de Motor DC 6V-28V/3A 13khz.....	83
Figura 22. Modelo de Floculador a Escala 1:25 .....	84
Figura 23. Modelo de Floculador (Software Solid Edge).....	84
Figura 24. Modelo Construido Ubicado en Sitio de Trabajo.....	85
Figura 25. Configuración de la Estructura Existente .....	87
Figura 26. Configuración de la Estructura Propuesta en el Proyecto .....	87
Figura 27. Entrada Anilina. Configuración actual .....	89
Figura 28. Salida Anilina. Configuración actual .....	89
Figura 29. Entrada Anilina. Propuesta.....	90
Figura 30. Salida Anilina. Propuesta .....	90
Figura 31. Aplicación Trazador .....	91
Figura 32. Toma de Muestras Salida del Modelo.....	92
Figura 33. Conductímetro HQ14d – HACH.....	93
Figura 34. Propuesta 2 Aspas, 1 Paleta / Aspa (2 Paletas / Eje).....	93
Figura 35. Propuesta 2 Aspas, 2 Paletas / Aspa (4 Paletas / Eje) .....	94
Figura 36. Propuesta 2 Aspas, 3 Paletas / Aspa (6 Paletas / Eje) .....	94
Figura 37. Propuesta 4 Aspas, 1 Paleta / Aspa (4 Paletas / Eje).....	94
Figura 38. Propuesta 4 Aspas, 2 Paletas / Aspa (8 Paletas / Eje) .....	95
Figura 39. Propuesta 4 Aspas, 3 Paletas / Aspa (12 Paletas / Eje) .....	95
Figura 40. Método de Wolf – Resnick Configuración de la Estructura Existente.....	101
Figura 41. Análisis de la Curva de Tendencia del Trazador Configuración de la Estructura Existente.....	103

Figura 42. Índice de Morrill Configuración de la Estructura Existente.....	104
Figura 43. Método de Wolf – Resnick Configuración de la Estructura Propuesta en el Proyecto .....	108
Figura 44. Análisis de la Curva de Tendencia del Trazador Configuración de la Estructura Propuesta en el Proyecto.....	110
Figura 45. Índice de Morrill Configuración de la Estructura Propuesta en el Proyecto .....	111
Figura 46. Resumen Pruebas de Eficiencia.....	116
Figura 47. Resumen Pruebas de Eficiencia con Alta Turbiedad y Color .....	119
Figura 48. Resumen Pruebas de Eficiencia con Baja Turbiedad y Color.....	121

**Lista de Apéndices**

	<b>Pág.</b>
Apéndice A. Dosis de Coagulantes Líquidos Aplicada en Planta Floridablanca .....	139
Apéndice B. Caudal Tratado en la Planta Floridablanca .....	140

## Resumen

**Título:** Optimización del sistema de floculación planta de tratamiento de agua potable – PTAP Florida del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga SA ESP\*.

**Autor:** Oscar Javier Naranjo Estupiñán\*\*

**Palabras Clave:** Trazador, floculación, calidad del agua, tabiques, retención hidráulica.

**Descripción:** El trabajo de grado se realizó con el objetivo de proponer al Acueducto Metropolitano de Bucaramanga - amb SA ESP, una nueva alternativa de agitación en el proceso de floculación de las Plantas de Potabilización, que permita mejorar la hidráulica de este proceso y eficiencia de procesos posteriores, reduciendo costos operativos por consumo de energía, aplicación de insumos químicos y consumo de agua para lavado de unidades de filtración.

Se consultaron estudios realizados al proceso de floculación en los últimos 20 años, en los cuales, se determinaron parámetros óptimos de operación para diferentes calidades de agua y diferentes coagulantes utilizados. Se realizó el escalamiento de la estructura existente para construir un modelo, garantizando el tiempo de retención y configuración del tanque de floculación existente, separación entre secciones internas y estructuras de entrada y salida.

Se realizaron pruebas con anilina de color rojo y prueba de trazadores con cloruro de sodio (NaCl), para la configuración actual de los tabiques divisorios y la propuesta en el proyecto, con ello se observó el recorrido del agua, comportamiento de la mezcla al interior la estructura y se determinó el mayor tiempo de retención hidráulico para las dos configuraciones de tabiques,

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ciencias. Escuela de Química. Director: Gonzalo Peña Ortiz. Especialista en Ingeniería Ambiental. Codirector: Yolanda Otero Rodríguez. Especialista en Química Ambiental.

siendo el mayor tiempo de retención experimental 3,13 minutos con la configuración propuesta en este proyecto.

Se desarrollaron pruebas de trazadores con aplicación instantánea de Cloruro de Sodio (NaCl) como sustancia trazadora, y se estudiaron los modelos matemáticos como Wolf-Resnick, análisis de la curva de tendencia del trazador e índice de Morrill para la configuración de tabiques divisorios existente y la propuesta en este proyecto; de estas pruebas se determinó que la configuración de tabiques propuesta, presentó los mejores resultados del comportamiento del trazador al eliminar las zonas muertas en el floculador; el valor obtenido para flujo pistón es 59% y 41% para flujo mezclado.

Alcanzado el mayor tiempo de retención y mejores resultados de las pruebas de trazadores, se realizaron pruebas de eficiencia del sistema con la configuración de tabiques divisorios propuesta, midiendo los parámetros de turbiedad, color, conductividad y pH, a la entrada y salida del modelo, para los diferentes juegos de paletas propuestos con valores altos y bajos de turbiedad. Adicionalmente, se midió el consumo de energía del sistema actual y se calculó el consumo del sistema propuesto para evaluar los costos operativos por esta variable.

Finalmente, se realizó los cálculos hidráulicos para dimensionar las paletas y potencia de los motores para la optimización del proceso de floculación para la Sección Antigua de la Planta Florida y se calcularon los costos de las mejoras y tiempo de recuperación de la inversión.

**Abstract**

**Title:** Optimization of the flocculation system – drinking water treatment plant (PTAP) Florida of the Metropolitan Aqueduct of Bucaramanga S.A. E.S.P. \*

**Author:** Oscar Javier Naranjo Estupiñán \*\*

**Keywords:** Tracer, flocculation, water quality, baffles, hydraulic retention.

**Description:** This graduate thesis was conducted with the objective of proposing to the Metropolitan Aqueduct of Bucaramanga – AMB S.A. E.S.P., a new agitation alternative for the flocculation process in the drinking water treatment plants. The proposed system aims to improve the hydraulic performance of the flocculation process and enhance the efficiency of subsequent treatment stages, while reducing operational costs related to energy consumption, chemical usage, and water consumption for filter unit backwashing.

A review of studies on flocculation processes from the past 20 years was carried out to determine optimal operational parameters for various water qualities and coagulant types. A scale-up of the existing flocculation structure was performed to build a model that replicates the retention time and configuration of the current flocculation tank, including the spacing between internal sections and inlet/outlet structures.

Tests using red-colored aniline and sodium chloride (NaCl) as tracers were performed on both the current configuration of baffle walls and the proposed configuration. These tests allowed for observation of water flow paths, mixing behavior inside the structure, and determination of

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Sciences. School of Chemistry. Advisor: Gonzalo Peña Ortiz, Specialist in Environmental Engineering. Co-advisor: Yolanda Otero Rodríguez, Specialist in Environmental Chemistry.

hydraulic retention time. The highest experimental retention time obtained was 3.13 minutes with the proposed configuration.

Tracer tests were developed using an instantaneous application of sodium chloride (NaCl) as the tracer substance. Mathematical models such as Wolf-Resnick, tracer curve trend analysis, and the Morrill Dispersion Index were employed to evaluate the performance of both the current and proposed baffle configurations. Results indicated that the proposed configuration yielded the best tracer behavior, effectively eliminating dead zones within the flocculator. The piston flow percentage was 59%, while mixed flow was 41%.

Upon achieving higher retention time and better tracer test performance, the flocculation system's efficiency was evaluated using the proposed baffle configuration. Parameters such as turbidity, color, conductivity, and pH were measured at the inlet and outlet of the model under varying turbidity conditions with different paddle sets. Additionally, the energy consumption of the current system was measured, and the consumption of the proposed system was estimated to assess operational costs due to this variable.

Finally, hydraulic calculations were performed to size the paddles and motor power requirements for optimizing the flocculation process in the Old Section of the Florida Plant. The improvement costs and investment payback period were also calculated.

## Introducción

El Área metropolitana de Bucaramanga es una conurbación colombiana, ubicada en el departamento de Santander, en el valle del Río de Oro. El municipio de Bucaramanga es la capital del departamento y los demás municipios integrantes son Floridablanca, Piedecuesta y Girón; se encuentra ubicada entre cotas topográficas 925 y 1.005 m.s.n.m., con clima cálido con rango de temperaturas entre 23<sup>0</sup>C y 28<sup>0</sup>C; su población para el año 2025 es de 1'411.000 habitantes aproximadamente.

El sistema de acueducto que abastece los municipios de Bucaramanga, Floridablanca y Girón, toma aguas de los ríos Tona, Frio y Suratá, la cual, es potabilizada en las Plantas de Tratamiento La Flora, Morrорico, Floridablanca, Bosconia y Angelinos, con capacidad instalada de tratamiento de 4.600 L/s al año 2025.

El desarrollo urbanístico y crecimiento poblacional de los municipios atendidos por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga - amb SA ESP. conlleva al amb SA ESP a desarrollar proyectos dirigidos a la ampliación de su área de prestación de servicio – APS, asegurando el cumplimiento de los estándares del servicio: continuidad, calidad y cobertura. Por tal motivo, es necesario estudiar los aspectos técnicos y de funcionamiento de los procesos unitarios de tratamiento de las plantas de potabilización, a fin de identificar fallas y obtener oportunidades de mejora que conlleven a su optimización y modernización, actualizando su tecnología e incrementando su capacidad y de esta manera, satisfacer la demanda de la población.

La planta de tratamiento de agua potable – PTAP Florida del amb SA ESP, está localizada al oriente del municipio de Floridablanca, hace parte del sistema de producción que integran las PTAP La Flora, Morrорico y Bosconia; es responsable de abastecer principalmente a todo el

municipio de Floridablanca, adicionalmente, suministra agua a parte del sur de los Municipios de Bucaramanga y Girón, a través, de la interconexión de redes de distribución con que cuenta el amb SA ESP. Su construcción inicial se realizó en los años setenta y posteriormente, en los años ochenta fue ampliada su capacidad.

Actualmente, la planta cuenta con dos secciones cuyo proceso de floculación se realiza en unidades de agitación mecánica e hidráulica; para el proceso de coagulación se cuenta con infraestructura para aplicar sulfato de aluminio en estado sólido y líquido, así como, policloruro de aluminio en estado líquido.

El desarrollo de este proyecto busca evaluar y plantear una nueva alternativa de mezcla lenta en la sección antigua de la PTAP Florida, con el fin de que, a futuro esta se replique en las demás plantas de tratamiento del amb SA ESP., se garantice el cumplimiento de los parámetros internos operativos del proceso de potabilización y normatividad legal vigente en Colombia, se reduzcan los costos operativos por consumo de energía en las plantas y pérdidas de agua por lavado de filtros.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivos General**

Construir un modelo de floculador mecánico de eje vertical y evaluar las condiciones hidráulicas de operación, con el fin de optimizar el proceso de mezcla lenta en la sección antigua de la Planta de Tratamiento de Agua Potable – PTAP Florida del amb SA ESP.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Construir un modelo de floculador mecánico de eje vertical con dos juegos de paletas por sección.

Determinar la mayor eficiencia del proceso de floculación para diferentes juegos de paletas y diferente configuración de recorrido del agua en el tanque.

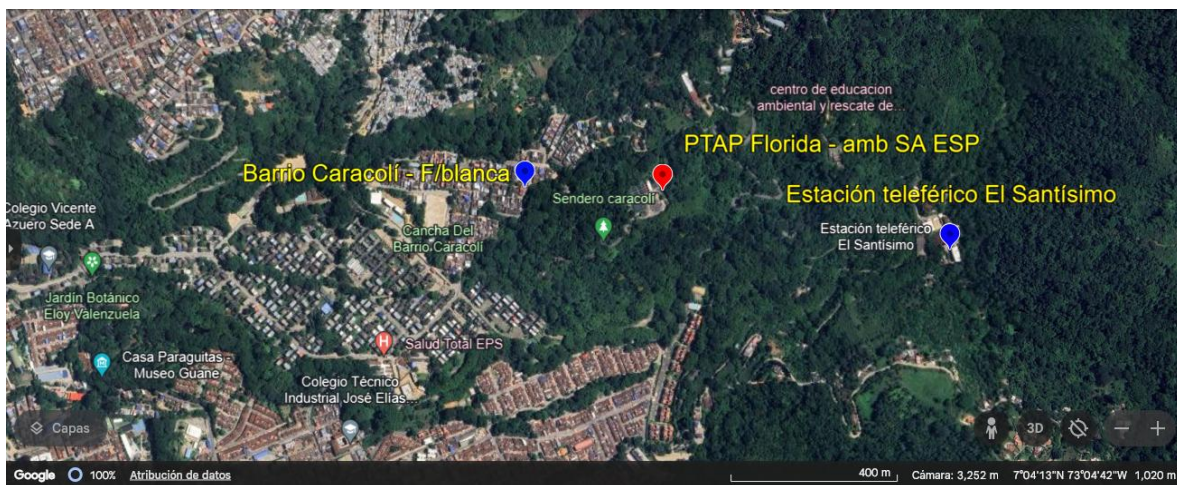
Elaborar los cálculos hidráulicos para el dimensionamiento del floculador mecánico propuesto para la Sección Antigua de la Planta Florida, con base en los resultados obtenidos en el estudio.

## 2. Marco Contextual

La Planta Florida está localizada en la zona Suroriental del Área Metropolitana de Bucaramanga, en la parte alta de los barrios Bucarica y Caracolí del municipio de Floridablanca, a una altura media de 1.042 m.s.n.m.

### Figura 1

#### *Ubicación PTAP Florida*



*Nota.* Adaptado de “Google Maps”. Ubicación PTAP Florida. Bucaramanga: Google; 2024

Su construcción inicial se hizo entre los años 1970-1971, con unidades de tipo convencional, las cuales se optimizaron, en los años 1976-1977; entre los años 1982 y 1983, fue ampliada para tratar el 55% adicional de su capacidad inicial. La planta en la sección antigua (Optimizada), tiene una capacidad de tratamiento para 400 L/s y la sección de ampliación (Nueva) 200 L/s, para una capacidad total de tratamiento de 600 L/s. Abastece principalmente a todo el municipio de Floridablanca, adicionalmente, suministra agua a la parte sur de los Municipios de Bucaramanga y Girón, a través, de la interconexión de redes de distribución con que cuenta el amb SA ESP.

**Figura 2**

*Planta Antigua (400 L/s)*



*Nota.* Tomado del archivo fotográfico de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) Florida del amb SA ESP., Bucaramanga; 2024.

**Figura 3**

*Sección Nueva (200 L/s)*



*Nota.* Tomado del archivo fotográfico de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) Florida del amb SA ESP., Bucaramanga; 2024.

## 2.1 Descripción del Proceso de Potabilización

El proceso es descrito por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga ES (2014) de la siguiente forma:

**Captación:** Conformada por una bocatoma mixta (Fondo y Lateral).

**Aducción:** El agua captada se conduce hasta la planta de tratamiento, por medio de un (1) canal rectangular de concreto de 800 m de longitud.

**Desarenador:** El sistema cuenta con tres (3) tanques de sección irregular, en los cuales se sedimentan las arenas y sólidos gruesos.

**Conducción:** Conformada por tres (3) tuberías en Hierro Dúctil que transportan el agua desde el desarenador No. 3 hasta las secciones antigua y nueva de la planta de tratamiento, estas se ubican en forma paralela y tienen una longitud aproximada de 965 m, así: dos (2) tuberías de Ø 14" con capacidad de transporte aproximada de 199 L/s, 226 L/s a la planta antigua y una (1) tubería de Ø 16" con capacidad de transporte aproximada de 220 L/s a la sección nueva.

**Mezcla Rápida:** En la sección antigua, la mezcla rápida se realiza en un vertedero rectangular (retromezclador hidráulico) y en la sección nueva en la canaleta Parshall de 1 pie.

**Floculación:** El proceso de floculación de la planta antigua tiene un tanque de floculación con un volumen aproximado de 305 m<sup>3</sup>, el cual está dividido en 4 cámaras, la agitación es causada por 4 motores Siemens de 12 HP, girando hasta 1700 RPM, cada motor consta de un reductor de velocidad. Este floculador consta de un sistema de parrillas las cuales soportan paletas de madera, el tanque tiene un total de 48 paletas cada una de 2,75 metros de longitud y de 0,12 metros de ancho. En cada cámara hay 12 paletas. Los gradientes de floculación de esta unidad son 40.5, 33.1, 20.0 y 14.3 Seg<sup>-1</sup>.

En la sección 2 de la planta, está localizado el floculador hidráulico el cual está dividido en tres zonas con distintas velocidades de agitación. La primera zona comprende 7 canales separados por placas de concreto y tiene una longitud de 5,46 m, 6,71 m de ancho y altura de lámina de agua de 1,65 m. La segunda zona consta de 12 canales y tiene longitud, ancho y altura de lámina de agua de 10,70 m, 8,30 m y 1,65 m respectivamente. La tercera zona, formada por 15 canales, tiene una longitud de 15,90 m, 5,89 m de ancho y altura de lámina de agua de 1,65; el espesor de las placas de concreto es de 9 cm aproximadamente en las tres zonas del floculador. Los gradientes de floculación de esta unidad son 67,78, 51,22 y 41,16  $\text{Seg}^{-1}$ .

**Sedimentación:** Este proceso en la planta antigua está conformado por (4) tanques de sedimentación, cada uno compuesto de (2) sectores, así: Primer sector: Sedimentador convencional con tasa máxima de sedimentación en cada tanque de 468.38  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-dia}$ . Segundo sector: Sedimentador de alta tasa con tasa máxima de sedimentación en cada tanque de 196.72  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-dia}$ . El proceso en la sección nueva se realiza en un sedimentador de alta tasa dividido en (2) compartimientos con tasa máxima de sedimentación en cada tanque de 142.92  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-dia}$  por compartimento.

**Filtración:** En la planta antigua el sistema lo componen (4) unidades de filtración con tasa de filtración de 286.66  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-dia}$  por unidad; en la sección nueva, (2) unidades de filtración con tasa de filtración de 2479.36  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-dia}$  por unidad.

**Proceso de desinfección y Almacenamiento:** La desinfección del agua clarificada se realiza con Oxidantes Mixtos el cual, es generado en un equipo de electrólisis de capacidad 300 Lb/día aplicado directamente en la cámara de cloración, que a su vez distribuye el agua a los tanques de almacenamiento.

**Almacenamiento:** La planta dispone de (3) tanques de almacenamiento, así: (2) tanques rectangulares antiguos con capacidad de almacenamiento de 3.200 m<sup>3</sup> y (1) tanque circular nuevo con capacidad de 2.400 m<sup>3</sup>. En total, la planta cuenta con una capacidad de almacenamiento de 5.600 m<sup>3</sup>.

**Controles de salida a las redes:** La casa de válvulas está localizada al lado sur del tanque sobre la vía de acceso a la planta, en donde se encuentra el conjunto de válvulas que regulan el suministro de aguas a las redes de distribución, mediante conducciones de 10" y 12" a cada uno de los diferentes sectores hidráulicos, así: Bucarica, Girón, Florida, Panorama, El Carmen y Malpaso.

La Planta Florida dispone de las siguientes instalaciones y equipos:

**Edificio de operación, bodegas y laboratorio:** La Planta cuenta con un edificio en donde se ubica la bodega de almacenamiento de sulfato sólido y equipos de dosificación de coagulantes sólido y líquido, cal y polímero ayudante de coagulación, tableros de control de parámetros de calidad, oficina administrativa y laboratorio para el control de calidad del agua en proceso, el cual está dotado de equipos para medición de pH, conductividad, turbiedad, color, cloro residual, aluminio residual, alcalinidad y dureza; adicionalmente, dispone de bodegas de almacenamiento de sal, cal hidratada, sulfato sólido y cloro gaseoso el cual es usado en contingencias generadas por fallas o actividades de mantenimiento del generador de oxidantes mixtos, y tanques para almacenamiento de sulfato de aluminio tipo b líquido y policloruro de aluminio – PAC.

**Dosificación de insumos químicos:** La Planta cuenta con sistemas de dosificación de insumos químicos: Sulfato de Aluminio Tipo B Sólido y Líquido, Policloruro de Aluminio Líquido-PAC, Cal Apagada, Oxidantes Mixtos y Cloro Líquido.

### **3. Marco Teórico**

#### **3.1 Floculación**

En los procesos de potabilización, la floculación es el proceso unitario que sigue inmediatamente a la coagulación, en el cual, se realiza la mezcla lenta del agua que ha sido mezclada con el coagulante para la desestabilización y aglutinación de partículas suspendidas generadoras de la turbiedad y color del agua (Organización Panamericana de la Salud [OPS], 1973).

De cierta manera la coagulación y floculación son semejantes por ser básicamente operaciones de mezcla, diferenciadas únicamente por la intensidad de agitación, así, la potencia disipada por unidad de volumen en la mezcla lenta que efectúa la floculación es normalmente inferior al 25% de la potencia disipada en un mezclador rápido. (Empresa Ibaguereña de Acueducto y Alcantarillado [IBAL], 2020, p. 19)

El objetivo principal de la floculación es reunir las partículas desestabilizadas para formar aglomeraciones de mayor peso y tamaño que sedimenten con mayor eficiencia (Cánepa de Vargas, 2004). Dicho proceso puede ser afectado por factores físico-químicos e hidráulicos que influyen en la eficiencia del proceso. La concentración de partículas en el agua, la naturaleza de la fuente, el gradiente de velocidad, el tiempo de mezcla, las variaciones de caudal y número de compartimientos, son factores que determinan la formación de flóculos para su posterior sedimentación.

#### **3.2 Mecanismos de Transporte**

Los principales mecanismos de transporte que se presentan en la floculación son:

Transporte Pericinético

Transporte ortocinético

Sedimentación diferencial

Transporte turbulento

Los modelos matemáticos que representan cada tipo de transporte se desarrollaron a partir de la ecuación 1. En estos modelos se tiene como supuesto que el proceso de agregación de las partículas es de segundo orden de tamaño, donde la tasa de colisión ( $N_{ij}$ ) entre partículas ( $i$  y  $j$ ) es proporcional al producto de las concentraciones de las dos unidades colisionantes ( $n_i$  y  $n_j$ ), el resultado de la forma general de esta relación, está dada por la siguiente ecuación:

$$N_{ij} = (\alpha_{ij})(K_{ij})(n_i)(n_j) \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde:

$N_{ij}$  = Tasa de colisión entre las partículas  $i$  y  $j$ .

$\alpha_{ij}$  = Factor de corrección de la tasa de floculación, se denomina factor de eficiencia.

$K_{ij}$  = Constante de segundo grado que depende del mecanismo de transporte y del tamaño de partícula  $i$ .

$(n_i, n_j)$  = Concentración de las unidades colisionantes.

### **3.2.1 Floculación Pericinético o Browniana**

Se presenta en forma espontánea, debido al desplazamiento continuo de las moléculas de agua, producido por el movimiento browniano y por la gravedad o peso de las partículas que al caer tienden a aglomerarse (Pérez, 1987).

Este tipo de transporte se origina por el movimiento natural de las moléculas del agua y está inducida por la energía térmica, los flocs alcanzan tamaños menores a una micra. La

utilidad de este movimiento es función de la energía térmica del fluido,  $KBT$ , donde  $KB$  es la constante de Boltzmann y  $T$  es la temperatura absoluta. Este proceso se puede expresar mediante la ecuación 2, en donde la tasa de floculación pericinética es proporcional a la temperatura absoluta, para partículas de igual diámetro ( $d_1=d_2$ ) es independiente del tamaño de las partículas AWWA (2002). (Angarita, 2015, p. 17)

$$K_p T \left( \frac{2}{3} \right) = \left( \frac{KBT}{\mu} \right) \left( \frac{(d_1+d_2)^2}{d_1 d_2} \right) \quad \text{Ecuación 2}$$

Dónde:

$KBT$ = Energía térmica del fluido.  $KB$  es la constante de Boltzmann.

$T$ = Temperatura absoluta.

$K_p$  = Tasa de floculación pericinética o en cizalladora laminar.

$(d_1$  y  $d_2)$  = Diámetros de partículas 1 y 2 en (m)

$\mu$  = Viscosidad absoluta del agua en ( $\text{kg}\cdot\text{f}\cdot\text{m}/\text{s}\cdot\text{m}^3$ )

### ***3.2.2 Floculación Ortocinética o en Cizalladura Laminar***

Se basa en las colisiones de las partículas debido al movimiento del agua inducido por una energía exterior a la masa de agua y que puede ser de origen mecánico o hidráulico (Andia, 2000). Si las partículas están lo suficientemente cerca, sus diferentes velocidades producirán eventualmente que entren en contacto. La constante de velocidad que describe este proceso está dada por la ecuación 3. (Angarita, 2015, p. 18)

$$K_o = \left[ \frac{(d_1+d_2)^3}{6} \right] \left( \frac{du}{dz} \right) \quad \text{Ecuación 3}$$

Dónde

$\frac{du}{dz}$  = Es la magnitud del gradiente de velocidad y  $K_{ij} = K_o$

La ecuación 4, se utiliza cuando la atracción de Van der Waals y retardo hidrodinámico son las fuerzas débiles que controlan el proceso y se tiene que el tamaño de las dos partículas que interactúan tiene el mismo diámetro

$$\alpha = 0,8 \left[ \frac{A}{[4,5 \pi \mu d^3 (du/dz)]} \right]^{0,18} \quad \text{Ecuación 4}$$

Dónde

A = Es la constante de Hamaker (López, 2011, como se citó en Angarita, 2015, p. 18).

“Entre mayor sea la tasa de cizalladura y tamaño de las partículas, mayor será la influencia del tipo de transporte ortocinético o en cizalladura laminar” (Angarita, 2015, p. 18).

### 3.2.3 Sedimentación Diferencial

Se debe a las partículas grandes que al precipitarse colisionan con las más pequeñas que van descendiendo lentamente y ambas se aglomeran (Cánepa de Vargas, 2004). La constante de velocidad de la floculación  $K_{ij} = K_d$  está dada por la siguiente expresión. (Angarita, 2015, p. 18)

$$Kd = \frac{\pi g (s-1)}{72 v} (d1 + d2)^3 (d1 - d2) \quad \text{Ecuación 5}$$

Dónde

s = Es el peso específico de las partículas

v = Viscosidad cinemática

g = Fuerza de gravedad

“Esta expresión se basa en la hipótesis de que las partículas son esféricas y tienen la misma densidad y además cumplen las condiciones de la ley de Stokes” (Angarita, 2015, p. 19).

### 3.2.4 Transporte Turbulento

Este transporte se da cuando se forman remolinos de distintos tamaños a causa del movimiento de la floculación, la energía cinética de los remolinos grandes se trasfiere a los remolinos pequeños, los remolinos del flujo turbulento varían con el tiempo dependiendo de los gradientes de velocidad. Para este mecanismo, la constante de velocidad de floculación está dada por la siguiente expresión, en donde ( $K_{ij} = K_t$ ). (Angarita, 2015, p. 19)

$$Kt = \left[ \frac{(d_1+d_2)^3}{6,18} \right]^2 \sqrt{\frac{\varepsilon}{\nu}} \quad \text{Ecuación 6}$$

$\varepsilon$  = Velocidad local de disipación de energía por unidad de masa de fluido.

$\nu$  = Viscosidad cinemática.

“La velocidad de choque de las partículas por la acción turbulenta, se incrementa a mayor diámetro de las partículas y mayor energía del fluido. El factor de corrección está dado por la ecuación 7, donde ( $\alpha t = \alpha_{ij}$ ).” (American Water Works Association, 2002, como se citó en Angarita, 2015, p. 19)

$$\alpha t = 0,8 \left[ \frac{A}{[4,5 \pi \mu d^3 \sqrt{\varepsilon/\nu}]} \right]^{0,18} \quad \text{Ecuación 7}$$

$\varepsilon$  = Velocidad local de disipación de energía por unidad de masa de fluido.

$\nu$  = Viscosidad cinemática.

A = Constante de Hamaker

$\mu$  = Viscosidad absoluta del agua.

d = Diámetro de la partícula.

### 3.3 Parámetros de Operación en la Mezcla Lenta

Son las condiciones de funcionamiento que proporcionan las características hidráulicas y mecánicas en cada tipo de unidad de floculación, representadas por el gradiente de velocidad ( $G$ , en  $s^{-1}$ ) y tiempo de mezcla ( $T$ , en min), donde dichos parámetros varían con el diseño del floculador y caudal de agua coagulada con que trabaja la PTAP. (Angarita, 2015, p. 21)

Los parámetros de operación de floculación en una PTAP, deben corresponder a los parámetros óptimos obtenidos en la prueba de jarras, de esta manera, se garantiza mayor eficiencia en el proceso. Es necesario monitorear y realizar pruebas de jarras continuamente, a fin de evaluar los parámetros de calidad del agua del afluente (pH, turbidez, color, alcalinidad, temperatura), frente a los parámetros de operación, con los cuales, se está trabajando y así decidir, si el proceso de floculación opera adecuadamente. (Angarita, 2015, p. 21)

#### 3.3.1 Gradiente de Velocidad

El gradiente de velocidad es un factor de proporcionalidad. Cuanto mayor es el gradiente de velocidad, más rápida es la velocidad de aglomeración de las partículas. Mientras tanto, a medida que los flóculos aumentan de tamaño, se incrementa las fuerzas de cizallamiento hidrodinámico, inducidas por el gradiente de velocidad. Los flóculos crecerán hasta un tamaño máximo, por encima del cual las fuerzas de cizallamiento alcanzan una intensidad que los rompe en partículas menores. En la ecuación 8 el diferencial  $du/dz$  corresponde al gradiente de velocidad (American Water Works Association, 2002). (Angarita, 2015, p. 22)

$$K_o = \left[ \frac{(d_1 + d_2)^3}{6} \right] \left( \frac{du}{dz} \right)$$

Ecuación 8

Dónde:

$\frac{du}{dz}$  = Es la magnitud del gradiente de velocidad.

( $d_1$  y  $d_2$ ) = diámetros de partículas 1 y 2 en (m)

$K_o = K_{ij}$

Hay diversas expresiones para calcular el gradiente de velocidad, estas dependen del tipo de floculador. Para el caso de los floculadores mecánicos de eje vertical, la expresión general más utilizada del gradiente de velocidad, se define en función de la potencia específica entregada al fluido (potencia P / volumen V) y la viscosidad dinámica del fluido  $\mu$ , como se ilustra en la ecuación 9. (Ministerio de Vivienda, 2010, como se citó en Angarita, 2015, p. 22)

$$G = \sqrt[2]{\frac{P}{\mu V}}$$

Ecuación 9

Dónde:

P = Es la entrada de energía (potencia) al fluido, Kg-f\*m/seg.

V = Volumen del reactor, m<sup>3</sup>

$\mu$  = Viscosidad dinámica del fluido en kg-f\*s/m<sup>2</sup>.

**Figura 4***Agitador de Paletas*

*Nota.* Tomado de Pérez. Manual de Potabilización del Agua. Universidad Nacional de Colombia Medellín; 1987.

En este caso es necesario saber la resistencia que pone el agua, para poder conocer la potencia que se debe aplicar al eje. La fuerza de arrastre ( $F_a$ ) que origina el movimiento de una paleta que se desplaza a una velocidad relativa ( $V_r$ ) al líquido en movimiento, en torno al eje, a una distancia ( $r$ ) del mismo, está dada por la ecuación 10.

$$F_a = \frac{1}{2 * g} * C_d * A * \gamma * v r^2$$

Ecuación 10

Dónde:

$F_a$  = Fuerza de arrastre

$C_d$  = Coeficiente de arrastre

$A$  = Área normal o transversal al movimiento del flujo,  $m^2$ .

La potencia está dada por la ecuación 11.

$$P = F_a * v r$$

Ecuación 11

Reemplazando ecuación 10 en la ecuación 11, se obtiene la ecuación 12.

$$P = \frac{1}{2 * g} * Cd * A * \gamma * vr^3$$

Ecuación 12

Iniciada la agitación, la velocidad del agua se hace igual a una fracción de la velocidad de la paleta, en donde la velocidad relativa se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$va = K * vp \quad \text{dónde: } K < 1,0$$

$$vr = vp - va = vp - K * vp$$

$$vr = vp (1 - K)$$

Ecuación 13

$$vp = \frac{2 * \pi * r * n}{60}$$

Ecuación 14

Reemplazando la ecuación 14 en la ecuación 13, se obtiene la ecuación 15.

$$vp = \frac{2 * \pi * r * n}{60} * (1 - K)$$

Ecuación 15

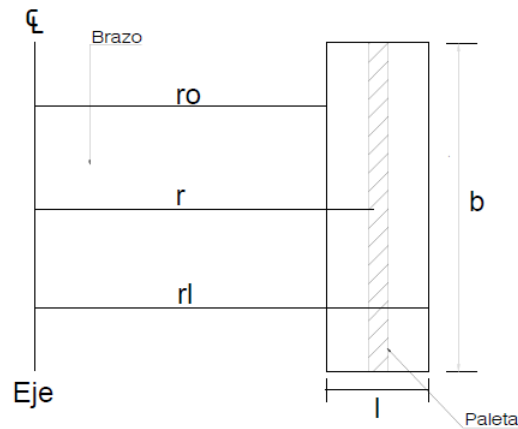
Reemplazando la ecuación 15 en la ecuación 12, se obtiene la ecuación 16.

$$P = \frac{1}{2 * g} * Cd * A * \gamma * \left[ \frac{2 * \pi * r * n}{60} * (1 - K) \right]^3$$

$$P = 5,85 \times 10^{-5} * Cd * \gamma * [(1 - K) * n]^3 * r^3 * A$$

Ecuación 16

Dado que la distancia (r) desde la paleta hasta el centro del eje es variable, como se muestra en la figura 5, se determina el valor de  $r^3 * A$ , así:

**Figura 5***Distancia del Eje a la Paleta*

*Nota.* Tomado de Pérez. Manual de Potabilización del Agua. Universidad Nacional de Colombia Medellín; 1987.

$$r^3 * A = \int_{r_0}^{r_1} r^3 * dA = \int_{r_0}^{r_1} r^3 * b * dr$$

$$r^3 * A = b \int_{r_0}^{r_1} r^3 * dr = \frac{b}{4} * r^4 \Big|_{r_0}^{r_1}$$

$$r^3 * A = \frac{b}{4} (r_1^4 - r_0^4)$$

Ecuación 17

Reemplazando la ecuación 17 en la ecuación 16, se obtiene la ecuación 18 la cual, representa la potencia útil introducida al agua por una sola paleta y un solo brazo.

$$P = 1,46 \times 10^{-5} * Cd * \gamma [(1 - K) * n]^3 * b (r_1^4 - r_0^4)$$

Ecuación 18

Dado que los floculadores se diseñan con varios juegos de paletas (j) y varios brazos (B), la ecuación 18, queda como se muestra en la siguiente ecuación:

$$P = 1,46 \times 10^{-5} * Cd * \gamma [(1 - K) * n]^3 * b * B \sum_{i=1}^j (r_{1j}^4 - r_{0j}^4) \text{ kgf.m/s}$$

Ecuación 19

En floculadores recíprocos (Walking Beam), el cálculo de gradiente de velocidad se obtiene por medio de la ecuación 20; dicha ecuación, involucra características geométricas de las paletas que agitan la masa de agua, volumen de cada compartimento del floculador y diámetro del volante que reduce las revoluciones del motor (CEPIS, 1973, como se citó en Angarita, 2015, p. 23)

$$G = 258 * 10^3 \frac{\sqrt{Cd * D^3 * n^3 \sum A}}{\mu V}$$

Ecuación 20

Donde:

$Cd$  = coeficiente de arrastre se recomienda usar un valor 3.0

$D$  = diámetro del volante (m)

$A$  = Área transversal de las paletas (m<sup>2</sup>)

$V$  = volumen del compartimento (m<sup>3</sup>)

$\mu$  = Viene expresado en Poises (g(s·cm)<sup>-1</sup>)

$n$  = Numero de revoluciones (rps)

En los floculadores hidráulicos, la ecuación 21 permite calcular el gradiente de velocidad, la cual, relaciona la pérdida de carga por el tiempo de retención en cada compartimento de la estructura. Los valores del peso específico ( $\gamma$ ) y viscosidad ( $\mu$ ) del agua dependen de la temperatura. (Capacho y Uribe, 2005, como se citaron en Angarita, 2015, p. 22)

$$G = \sqrt{\frac{\gamma * hf}{\mu * t_0}}$$

Ecuación 21

Dónde:

$h_f$  = Pérdida de carga en el compartimiento, m

$t_o$  = Tiempo de retención en el compartimiento, s

$\gamma$  = Peso específico del agua, N/m<sup>3</sup>

$\mu$  = Viscosidad dinámica del agua (N\*s/m<sup>2</sup>)

### ***3.3.2 Tiempo de Mezcla***

En todos los modelos propuestos para la floculación, la velocidad de aglomeración de las partículas es proporcional al tiempo. Bajo determinadas condiciones existe un tiempo óptimo de floculación, el cual, normalmente se encuentra entre 10 y 40 minutos; este tiempo es posible determinarlo mediante ensayos de jarras. Tiempos de retención del agua en el floculador inferiores o superiores al óptimo, reducen la eficiencia de la floculación; esta pérdida de eficiencia es proporcional a la desviación entre el tiempo de retención real de operación y el óptimo obtenido en ensayo de jarras. (Cánepa de Vargas, 2004). Se debe garantizar que el tiempo de contacto en la unidad de floculación sea el suficiente, para permitir que los flóculos alcancen el tamaño y peso adecuado, lo cual, es función de la dosis, gradiente de velocidad y tiempo de agitación. (Ministerio de Vivienda, 2010). (Angarita, 2015, p. 24)

### ***3.3.3 Variación del Caudal***

Variaciones de caudal de operación en una PTAP, alteran el gradiente velocidad y tiempo de mezcla.

Para un floculador hidráulico, es recomendable variar el caudal de acuerdo a la turbiedad que llega a la PTAP. En estos floculadores, al disminuir el caudal aumenta el tiempo de retención y disminuye el gradiente de velocidad (Cánepa de Vargas, 2004). El floculador mecánico no es flexible, ya que la velocidad permanece constante y el tiempo de residencia aumenta o disminuye de acuerdo con la variación del caudal (Cánepa de Vargas, 2004). (Angarita, 2015, p. 24)

### 3.4 Tipos de Floculadores

Según la energía usada para producir la agitación, los floculadores se clasifican en floculadores hidráulicos, mecánicos e hidromecánicos. La tabla 1 muestra la descripción de cada sistema.

**Tabla 1**

*Tipos de Floculadores*

Según la energía de agitación	Según el sentido de flujo	Descripción	Nombre
<b>Hidráulicos</b>	Flujo horizontal	Con tabiques de ida y regreso	De tabiques
	Flujo vertical	Con tabiques arriba y abajo del tanque	
Con codos en el fondo que proyectan el agua hacia arriba.		Alabama	

---

		Con entrada lateral al tanque	Cox
<b>Mecánicos</b>	Rotatorios	De paletas de eje horizontal o vertical	De paletas
		De turbinas horizontales o verticales	De turbinas
		Reciprocantes	Reciprocantes
<b>Hidromecánicos</b>	Flujo horizontal	De turbina pelton y paletas horizontales	Hidromecánicos

---

*Nota.* Tomado de Arboleda. Teoría y práctica de la purificación del agua. Editorial Acodal. Colombia; 1992.

La PTAP Florida realiza la floculación en unidades de tipo hidráulica y mecánica. Los floculadores hidráulicos utilizan el cambio de dirección del flujo del agua, inducido por la cabeza hidráulica existentes, para producir la turbulencia necesaria y promover la formación del floc. Derivan su energía de la carga de velocidad que el líquido adquiere en su tránsito por un conducto. (Ministerio de Vivienda, 2010, como se citó en Angarita, 2015, p. 20)

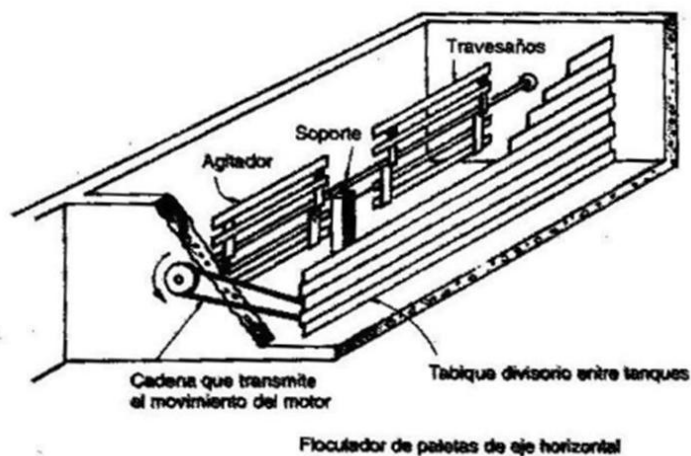
Los floculadores hidráulicos, son de gran utilidad en países en desarrollo debido a su bajo costo operativo, ya que no requieren energía eléctrica en comparación con las unidades mecánicas, una particularidad es la pérdida de carga hidráulica presente en este tipo floculadores, que los convierte en estructuras de gran tamaño, requiriendo grandes áreas para su construcción. (Angarita, 2015, p. 20)

Los floculadores mecánicos son aquellos que requieren una fuente de energía externa que mueve un agitador en un tanque o una serie de tanques, en donde el agua permanece determinado tiempo. Los floculadores mecánicos se clasifican según el sentido del movimiento del agitador, en giratorios y alternativos (balancín, reciprocante / Walking Beam).

Floculadores giratorios: Pueden ser de baja velocidad de rotación, constan de un sistema de paletas fijadas a un eje horizontal o vertical, o de alta velocidad de rotación, conformados por una turbina. Los floculadores alternativos están constituidos por un sistema de paletas o de cintas que se desplazan alternativamente de arriba hacia abajo y viceversa, produciendo corrientes de turbulencia en la masa líquida. En las figuras 5, 6 y 7 se muestra un esquema simplificado de los principales tipos de floculadores mecánicos (Pérez, 1987).

### Figura 6

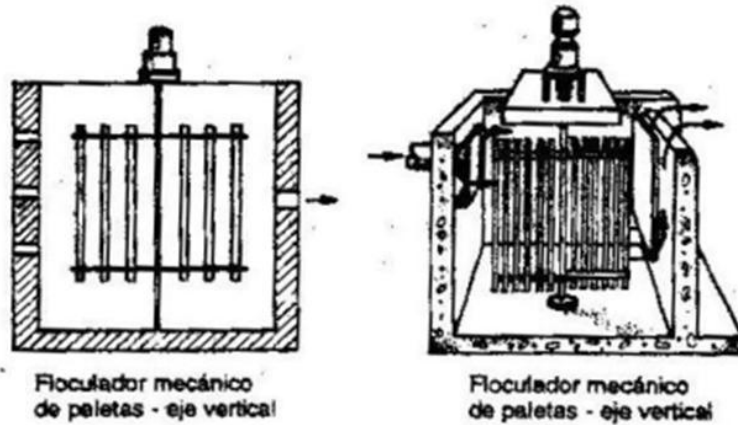
#### *Floculador Mecánico de Eje Horizontal*



*Nota.* Tomado de Pérez. Manual de Potabilización del Agua. Universidad Nacional de Colombia Medellín; 1987.

**Figura 7**

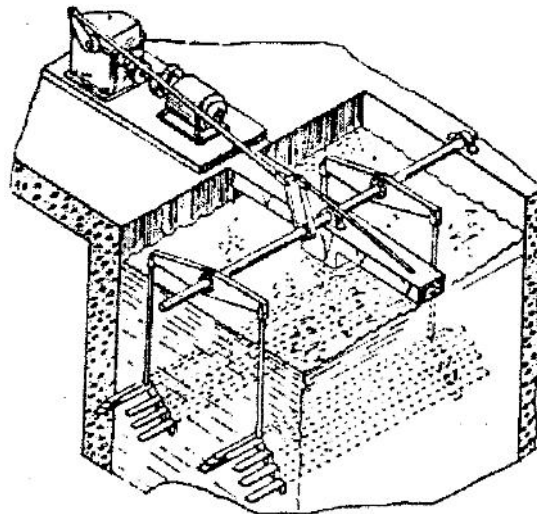
*Floculador Mecánico de Eje Vertical*



*Nota.* Tomado de Pérez. Manual de Potabilización del Agua. Universidad Nacional de Colombia Medellín; 1987.

**Figura 8**

*Esquema de un Floculador Mecánico Reciprocante (Walking Beam)*



*Nota.* Tomado de Pérez. Manual de Potabilización del Agua. Universidad Nacional de Colombia Medellín; 1987.

### **3.5 Tipos de Flujo**

En los procesos unitarios de tratamiento de agua se pueden presentar hidráulicamente dos tipos de flujo: discontinuo o continuo, dependiendo del reactor que realiza el tratamiento al agua.

#### ***3.5.1 Flujo Intermitente o Discontinuo***

El flujo discontinuo consiste en llenar una unidad con volumen (V) y dejar el agua durante un tiempo de retención (T), puede ser con o sin mezcla, finalizado el proceso de llenado se procede a vaciar el reactor y se repite el proceso. Este tipo de flujo no es común en las plantas de potabilización, únicamente se utiliza en el ensayo de jarras. (Angarita, 2015, p. 25)

#### ***3.5.2 Flujo Continuo***

“El flujo continuo se presenta cuando un fluido pasa de un reactor a otro, de forma directa o continua sin necesidad de vaciar o detener los procesos. Dentro del flujo continuo se pueden presentar los siguientes tipos de flujo” (Angarita, 2015, p. 25).

#### ***3.5.3 Flujo de Pistón***

Se presenta cuando las partículas entran y salen en la misma secuencia que fueron introducidas y permanecen en el floculador el mismo tiempo, no hay ningún tipo de mezcla entre el fluido que ingresa al floculador, ni con el fluido que está dentro de la unidad; este tipo de flujo generalmente se presenta en floculadores hidráulicos de pantallas. (Angarita, 2015, p. 25)

### ***3.5.4 Flujo Mezclado***

En un reactor con flujo mezclado, todo elemento que ingresa en él se dispersa mezclándose dentro de la unidad por efecto de la agitación. En este tipo de flujo, la concentración que se mide a la salida debe ser igual a la concentración en cualquier parte del floculador (Cánepa de Vargas, 2004, como se citó en Angarita, 2015, p. 25)

### ***3.5.5 Flujo No Ideal***

Este tipo de flujo es el intermedio entre el flujo completamente mezclado y el flujo de pistón. Por lo general en las unidades de tratamiento se pueden presentar las siguientes alteraciones: zonas muertas, cortos circuitos hidráulicos y recirculación del fluido. En los floculadores, estas fallas hidráulicas reducen drásticamente la eficiencia de formación del floc y por consiguiente, se presentan pérdida de eficiencia en etapas posteriores. (Angarita, 2015, p. 25)

## **3.6 Análisis de las Características Hidráulicas de un Floculador**

Una de las formas de analizar las condiciones hidráulicas de un floculador, es la interpretación de resultados del estudio de trazabilidad. Este ensayo permite determinar a groso modo, las falencias hidráulicas que puede presentar un floculador. Existen varios modelos que permiten interpretar los resultados obtenidos por el trazador, como el método propuesto por los ingenieros Wolf y Resnick, el análisis de la curva de tendencia del trazador y el índice de Morrill. (Pérez, 1992, como se citó en Angarita, 2015, p. 26)

### ***3.6.1 Ensayo de Trazadores***

Es un ensayo de gran utilidad y practicidad en las plantas de potabilización, ya que permite el diagnóstico del comportamiento hidráulico de una unidad de tratamiento. Consiste en verter una dosis de una sustancia trazadora antes de la entrada al floculador, con el propósito de registrar la concentración de la sustancia desde el momento en que se adiciona, hasta que sale en su totalidad del dispositivo. (Angarita, 2015, p. 25)

### ***3.6.2 Sustancias Trazadoras Empleadas***

Según Arboleda (2000) las sustancias trazadoras pueden ser, colorantes (Rodamina), Iones (cloruros), elementos radiactivos (isótopos), entre otros. Con este tipo de sustancias se debe tener precaución en la concentración que se va a utilizar en la prueba, ya que en altas concentraciones pueden ser nocivas para la salud, por tal motivo se debe escoger aquella que presente mayor estabilidad en bajas concentraciones. (Angarita, 2015, p. 26)

Se pueden usar ácidos como el clorhídrico y el benzoico y otras sustancias químicas como alizarim, sapirol, naptol. El uso de isotopos resulta de mayor precisión ya que los detectores de radiación son más sensibles, pero su gran desventaja, es que requiere de equipo y personal especializado. (Pérez, 1992, como se citó en Angarita, 2015, p. 26)

Maldonado (2000) recomienda el uso de sustancias iónicas, como cloruro de sodio (NaCl), para la prueba de trazadores en la evaluación hidráulica de unidades de tratamiento en una planta de potabilización, debido a que esta sustancia es de fácil acceso, bajo costo y estable en bajas concentraciones. (Angarita, 2015, p. 26)

### 3.6.3 *Modo de Aplicación del Trazador*

La tabla 2 describe dos formas de aplicar el trazador. En ella se indica como determinar la cantidad de trazador necesaria para preparar la solución de trabajo y dosis aplicar de acuerdo con los tipos de dosificación, así mismo, se indica la duración de la prueba.

(Angarita, 2015, p. 27)

**Tabla 2**

*Formas de Aplicar o Dosificar el Trazador*

<b>Dosificación instantánea</b>	<b>Dosificación continua</b>
Se aplica una concentración inicial $C_0$ en la entrada del floculador en un tiempo muy corto, $(1/30)$ inferior del tiempo de retención del floculador $T_0$	Se aplica la concentración inicial $C_0$ continuamente, por un tiempo no menor de tres veces el tiempo de retención $T_0$ y luego se interrumpe bruscamente la dosificación.
Se aplica en un punto donde se mezcle instantáneamente,	La forma continua tiene la ventaja de poder establecer comparaciones entre las curvas que se presentan a la entrada, cuando se inicia la dosificación y a la salida cuando el proceso finaliza, además permite encontrar una concentración de equilibrio.

---

La cantidad de trazador P(Kg) se determina mediante la siguiente ecuación:

$$P = \frac{V * K * C_o}{I * 10^3}$$

Dónde:

P = Peso del trazador, Kg

V = Volumen Útil del Floculador,  $m^3$

K = Constante de Corrección.

$C_o$  = Concentración Inicial,  $\frac{mg}{l}$  o  $\frac{g}{m^3}$

I = Grado de Pureza del Trazador, fracción de la unidad.

$$K = \frac{\text{Peso NaCl}}{\text{peso Cl}} = \frac{23 + 35,5}{35,5} = 1,65$$

La dosis de trazador P(Kg/h) se determina mediante la siguiente ecuación:

$$P = \frac{Q * K * C_o}{I * 10^3}$$

Dónde:

P = Dosis del trazador, Kg/h

Q = Caudal de la unidad por evaluar,  $\frac{m^3}{seg}$

K = Constante de Corrección.

$C_o$  = Concentración Inicial,  $\frac{mg}{l}$  o  $\frac{g}{m^3}$

I = Grado de Pureza del Trazador, fracción de la unidad.

---

*Nota.* Tomado de Angarita. Evaluación técnica del proceso de floculación con los coagulantes empleados en la planta de tratamiento de agua potable de Floridablanca; Universidad Pontificia Bolivariana; Bucaramanga; 2015.

### 3.6.4 Análisis de Datos

El análisis de datos obtenidos de un ensayo de trazadores, es posible realizarlo aplicando el método propuesto por los ingenieros Wolf y Resnick, el análisis de la curva de tendencia del trazador y el índice de Morrill, los cuales se describen a continuación. (Angarita, 2015, pp. 27-28)

### 3.6.5 Modelo de Wolf y Resnick

El modelo de Wolf y Resnick es un modelo empírico, utilizado para determinar de manera objetiva y sencilla el porcentaje de espacios muertos en el sistema, el porcentaje del flujo que presenta una característica de pistón, así como la zona de mezcla completa. En el modelo de Wolf y Resnick se procesan los datos experimentales con el fin de calcular las fracciones  $I-F(t)$  y  $t/t_0$ , donde  $t_0$  corresponde al Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) teórico al cual se opera el floculador y  $I-F(t)$  se calcula con la ecuación 22. (Angarita, 2015, p. 28)

$$F(t) = \frac{\sum(C-C_0)*100}{\sum_m(C-C_0)} \quad \text{Ecuación 22}$$

Dónde:

$C$  = Concentración del trazador, medida en el tiempo  $t$

$C_0$  = Concentración de trazador en el tiempo cero (inicio del ensayo)

$\sum_m(C - C_0)$  = Sumatoria de todos los valores  $(C-C_0)$

Los valores de  $I-F(t)$  y  $t/t_0$  se grafican en escala semilogaritmica y permiten determinar las variables  $\theta$  y  $\alpha$  que facilitan el cálculo de las fracciones de flujo a pistón (P), mezcla completa (M) y zonas muertas (m) de acuerdo a las ecuaciones 23 a la 26. (Angarita, 2015, p. 28)

$$p = \frac{\theta \tan \alpha}{0.435 + \theta \tan \alpha} \quad \text{Ecuación 23}$$

$$P = p(1 - m) \quad \text{Ecuación 24}$$

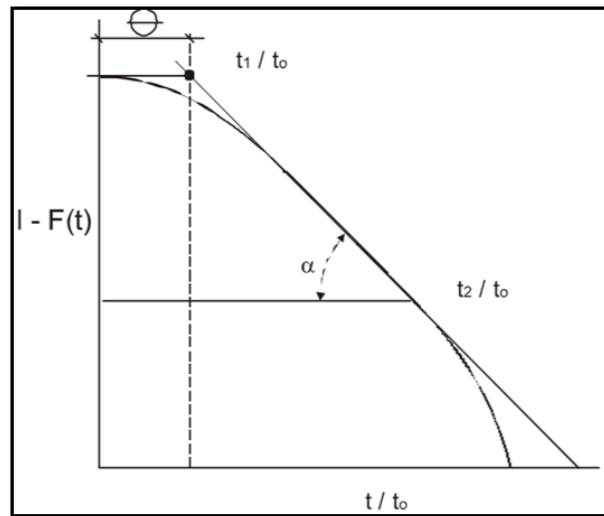
$$M = (1 - p) * (1 - m) \quad \text{Ecuación 25}$$

$$m = 1 - (\theta/p) \quad \text{Ecuación 26}$$

“Los valores de las incógnitas  $\theta$  y  $\tan \alpha$  se obtienen de la curva  $t/t_0$  vs  $I-F(t)$  en escala semilogarítmica, como se muestra en la figura 8” (Angarita, 2015, p. 28).

### Figura 9

*Curva Cantidad de Trazador que Permanece en el Reactor*



*Nota.* Tomado de Maldonado (citado en Angarita). Evaluación técnica del proceso de floculación con los coagulantes empleados en la planta de tratamiento de agua potable de Floridablanca; Universidad Pontificia Bolivariana; Bucaramanga; 2015. En la curva,  $\theta$  es igual a  $t_1/t_0$ ,  $\tan \alpha$  se determina con la siguiente ecuación:

$$\tan \alpha = \frac{1}{\frac{t_2}{t_0} - \frac{t_1}{t_0}} \quad \text{Ecuación 27}$$

“El método de Wolf y Resnick permite diagnosticar las fracciones de flujo presentes en las unidades de mezcla de tratamiento en una planta de potabilización” (Angarita, 2015, p. 29).

#### 3.6.6 Método Para el Análisis de la Curva de Tendencia de Gauss

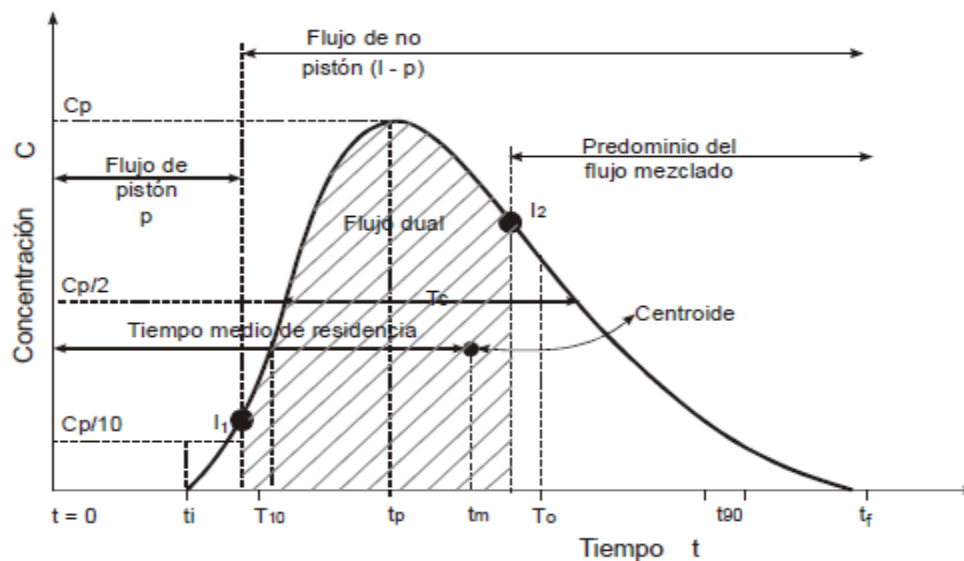
Es común evaluar un reactor analizando la tendencia de la curva de concentración de trazador y relacionar sus diferentes parámetros con las condiciones de flujo; generalmente,

la forma que toma la curva de concentración da una primera indicación del comportamiento hidrodinámico del reactor. A partir de esta curva se puede obtener la función de distribución del tiempo de residencia conocida como  $E(t)$  y determinar el TRH real del reactor (Galvis, 1984). (Angarita, 2015, p. 29)

Capacho y Uribe (2005) usaron la curva de tendencia de Gauss para analizar hidráulicamente los floculadores de una planta de potabilización, el modelo les permitió determinar la eficiencia en el sistema y relacionar distintos parámetros con las condiciones de flujo que se presentan en un floculador. Básicamente, en la prueba de trazadores de las muestras de agua tomadas en todo el ensayo, se obtienen valores de concentración que aumentan con el tiempo hasta un punto máximo y luego disminuye hasta un punto en que la concentración deja de estar en el sistema. (Véase figura 9). (Angarita, 2015, p. 30)

### Figura 10

*Concentración del Trazador en el Efluente de un Reactor*



*Nota.* Tomado de Pérez (citado en Angarita). Evaluación técnica del proceso de floculación con los coagulantes empleados en la planta de tratamiento de agua potable de Floridablanca; Universidad Pontificia Bolivariana; Bucaramanga; 2015.

La curva se elabora graficando el tiempo de muestreo versus la concentración de trazador en la salida de la unidad de tratamiento ( $C-C_0$ ). Con esta grafica se obtienen los tiempos de aparición del trazador, de máxima concentración, el tiempo en que atraviesa la totalidad trazador y tiempo de concentración ( $T_c$ ) máxima de la sustancia. (Angarita, 2015, p. 30)

La tabla 3 presenta los parámetros principales a tener cuenta para el análisis de la curva de tendencia del trazador.

**Tabla 3**

*Parámetros Principales Para el Análisis gráfico de la curva del trazador*

<b>Parámetros Principales</b>	<b>Definición</b>
$t_i$	Tiempo inicial desde que se aplica el trazador hasta que aparece en el efluente
$t_{10}$	Tiempo correspondiente al paso del 10% del trazador
$t_p$	Tiempo correspondiente a la máxima concentración
$t_m$	Tiempo correspondiente al paso de 50% del trazador
$t_o$	Tiempo de retención teórico $t_o=V/Q$
$t_{90}$	Tiempo correspondiente al paso del 90% del trazador
$t_f$	Tiempo que transcurre hasta que atraviesa la totalidad del trazador
$C_o$	Concentración inicial.
$C_p$	Concentración pico (máxima) a la salida.

*Nota.* Tomado de Angarita. Evaluación técnica del proceso de floculación con los coagulantes empleados en la planta de tratamiento de agua potable de Floridablanca; Universidad Pontificia Bolivariana; Bucaramanga; 2015.

La tabla 4 presenta el análisis de la curva de la tendencia del trazador:

**Tabla 4***Análisis de la Curva de Gauss*

<b>Análisis de la curva de tendencia del trazador</b>	
$t_p/t_o \approx 0$	Predominio flujo mezcla completa
$t_p/t_o \approx 1$ y $t_i/t_o > 0.5$	Predominio flujo pistón
$t_i/t_o = 0$	Flujo mezcla completa
$t_i/t_o = 1$	Flujo pistón
$t_i/t_o < 0.3$	Corto circuito
$t_c/t_o = 0.693$	Flujo mezcla completa
$t_b/t_o \approx 2.3$	Flujo mezcla completa
$t_m/t_o < 1$	Cortos circuitos y/o zonas muertas
$t_m/t_o > 1$	Acumulación indeseada de trazador o error de ensayo
$e \geq 2.3$	Flujo mezcla completa
$e = 0$	Flujo pistón

*Nota.* Tomado de Angarita. Evaluación técnica del proceso de floculación con los coagulantes empleados en la planta de tratamiento de agua potable de Floridablanca; Universidad Pontificia Bolivariana; Bucaramanga; 2015.

### 3.6.7 Índice de Morrill

Del estudio de trazabilidad se puede obtener el índice de Morrill, al graficar el porcentaje de trazador que sale del reactor versus el tiempo de duración de la prueba (Ver figura 10). El índice de Morrill está dado por la relación del tiempo en que atraviesa el 90% de la

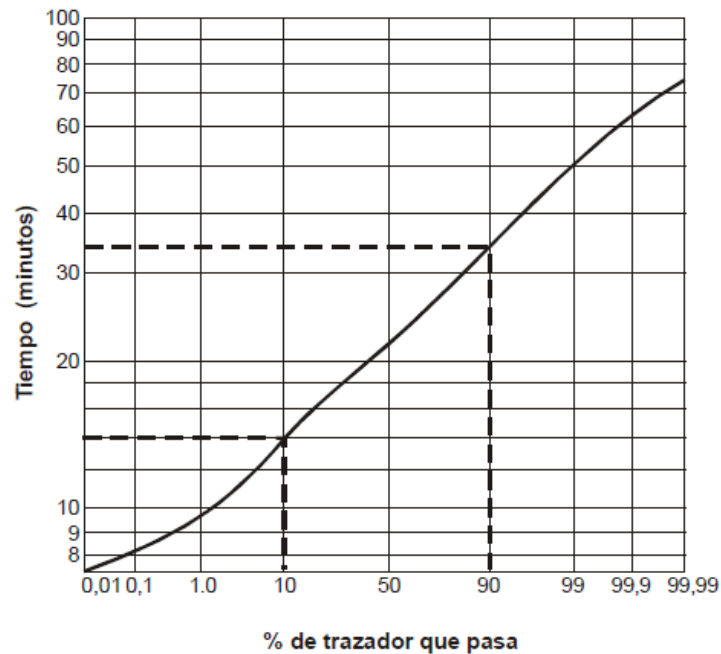
totalidad del trazador y tiempo que pasa el 10% de trazador por el dispositivo, como se presenta en la ecuación 28. (Angarita, 2015, pp. 31-32)

$$\text{Índice de Morrill} = \frac{\text{tiempo en que pasa el 90\%}}{\text{tiempo en que pasa el 10\%}}$$

Ecuación 28

**Tabla 5**

*Índice de Morrill*



*Nota.* Tomado de Angarita. Evaluación técnica del proceso de floculación con los coagulantes empleados en la planta de tratamiento de agua potable de Floridablanca; Universidad Pontificia Bolivariana; Bucaramanga; 2015.

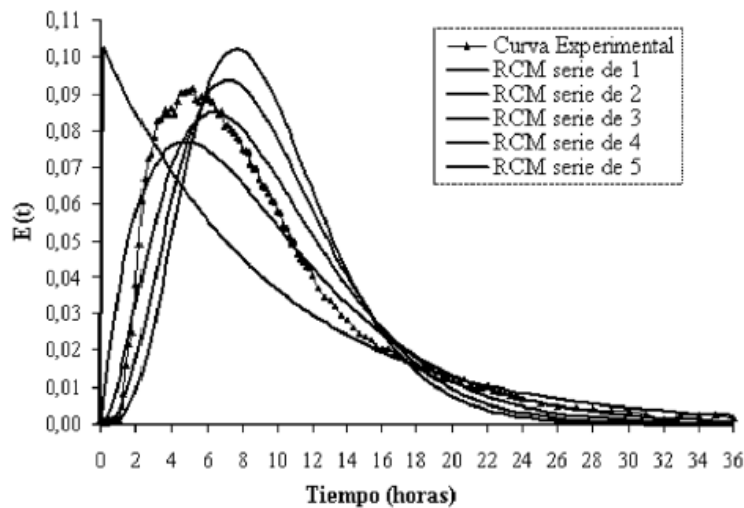
### 3.6.8 Modelo de Reactores Completamente Mezclados en Serie RCM

Este modelo matemático tiene como objeto determinar el comportamiento de los procesos, en donde la curva experimental  $E(t)$  obtenida en el ensayo es comparada con las curvas  $E(t)$  teóricas del modelo de reactores completamente mezclados - RCM en serie de 1 a 5 cámaras. El

dominio del régimen hidráulico con flujo a pistón se aumenta a medida que crece el número de RCM en serie. Es decir que si la curva experimental tiene mayor correlación con el RCM-5, el comportamiento del proceso tiende a pistón y si la correlación es mayor con el RCM-1, el proceso predomina la mezcla completa (ver Figura 11).

**Figura 11**

*Distribución de Tiempos de Residencia  $E(t)$  Experimental y Teóricas*



Fuente: Pérez y Torres (2008) *Nota*. Tomado de Pérez y Torres. Evaluación del comportamiento hidrodinámico como herramienta para optimización de reactores anaerobios de crecimiento en medio fijo; Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia; Medellín; 2008.

## 4. Metodología

La metodología de este proyecto se realizó en cinco fases:

### 4.1 Fase No. 1. Revisión Estudios Previos

Se realizó la revisión de estudios realizados en años anteriores en la planta, con el fin de disponer de información técnica especialmente los parámetros óptimos de operación para el diseño del modelo, igualmente, conocer los parámetros de operación actuales de la estructura existente. De dicha revisión se obtuvo lo siguiente:

#### 4.1.1 Estudio 1

Evaluación y diagnóstico de la planta de tratamiento de agua potable de Floridablanca y actualización del manual de operaciones de la planta. Universidad Pontificia Bolivariana, realizada por Ortiz (2003)

La evaluación de los procesos se realizó mediante prueba de trazadores con Cloruro de Sodio (NaCl) y análisis de resultados aplicando los modelos matemáticos de Wolf y Resnick e Índice de Morrill. Los resultados del estudio concluyeron, que en la sección antigua de la PTAP la mezcla rápida es deficiente al presentar un gradiente de mezcla de  $503 \text{ s}^{-1}$  y tiempo de contacto de 7,7 s; se sugirió poner en funcionamiento los agitadores mecánicos existentes en esta época o reubicar el punto de mezcla sobre la cámara de entrada, para reducir el tiempo de contacto e incrementar la agitación. Actualmente, el punto de mezcla se ubica sobre la cámara de entrada (retromezclador hidráulico), como se sugirió en el estudio.

Por otra parte, el estudio concluyó que el floculador mecánico de eje horizontal de la época presentaba flujo pistón ( $P = 65\%$ ) y flujo mezclado ( $M = 35\%$ ), el índice de Morrill indicó la presencia y predominio de un alto flujo mezclado, adicionalmente, un alto porcentaje de espacios muertos y cortocircuitos ( $m = 60\%$ ), lo que originaba que la masa de agua no tuviera tiempo de contacto suficiente con el coagulante y adecuada formación de floc. Actualmente, el floculador es de tipo Walking Beam, con el cual, se mejoró la mezcla en el proceso.

#### ***4.1.2 Estudio 2***

Análisis del comportamiento hidráulico de los floculadores mecánicos, llevado a cabo por Otero (2008), Líder de Proceso 3 Planta Florida amb SA ESP.

El análisis se realizó aplicando una prueba de trazadores (NaCl) y análisis de resultados mediante la teoría de Wolf-Resnick. De esta prueba se concluyó:

En el tanque de floculación no presenta cortos circuitos, indicando que no hay paso directo del trazador desde la entrada del agua al tanque, hasta la salida

Existen zonas de baja agitación, el trazador se acumula y posteriormente sale.

Predomina el flujo a pistón con un 72%; el flujo mezclado es solo de 28%

#### ***4.1.3 Estudio 3***

Valoración técnico – económica del proceso coagulación en la planta de tratamiento de agua potable de Floridablanca (Acueducto Metropolitano de Bucaramanga amb SA ESP), Universidad Pontificia Bolivariana, Facultad de Ingeniería Ambiental, Escuela de Ingeniería. Realizado por Pérez (2015).

El estudio se realizó aplicando prueba de trazadores (NaCl), con el fin de determinar las condiciones hidráulicas de funcionamiento de los sistemas de coagulación o mezcla rápida en las dos secciones de la planta Florida; así mismo, se determinó la eficiencia de los coagulantes utilizados con diferentes niveles de turbiedad del agua cruda y se evaluó los costos operativos de la aplicación de cada uno de estos insumos para los diferentes niveles de turbiedad analizados. Del estudio se concluyó lo siguiente:

En la sección antigua, el mezclador hidráulico (retromezclador) presenta un gradiente de mezcla de  $979 \text{ s}^{-1}$  y tiempo de mezcla de aproximadamente 3.5 s, considerado adecuado para la mezcla rápida en procesos de coagulación adsorción-desestabilización. Según Amirtharajah y Trussler (1986), el tiempo de mezcla para este tipo de coagulación debe encontrarse en el rango entre 1 y 5 s.

En la sección nueva, se obtuvo gradientes de mezcla adecuados, ya que para los diferentes caudales analizados (150 y 300 L/s), la canaleta Parshall presenta gradientes de alrededor de los  $1.039 \text{ s}^{-1}$ . Sin embargo, el tiempo de mezcla obtenido fue entre 0,7 y 0,84 segundos, el cual, es bajo para procesos de coagulación por adsorción-desestabilización Amirtharajah y Trussler (1986). El número de Froude obtenido para los diferentes caudales, se encuentra en el rango entre 2,5 y 2,8, indicando que el resalto es inestable.

#### ***4.1.4 Estudio 4***

Evaluación técnica del proceso de floculación con los coagulantes empleados en la planta de tratamiento de agua potable de Floridablanca, de Angarita (2015).

El estudio tuvo como fin realizar la evaluación hidráulica de las unidades de floculación de la PTAP Florida, en función de los coagulantes usados para el tratamiento. Los ensayos de

jarras se realizaron con diferentes calidades de agua, velocidades de agitación y tiempos de mezcla, con el fin de determinar el gradiente de mezcla y tiempo óptimos para la obtención de mayor eficiencia en la remoción de color y turbiedad en la operación del floculador. Igualmente, se realizó prueba de trazadores, aplicándose de forma instantánea cloruro de sodio, para diagnosticar el comportamiento hidráulico del floculador a partir del análisis de datos por modelos matemáticos como el de Wolf y Resnick y análisis de la curva de tendencia. Del estudio se concluyó lo siguiente:

El floculador hidráulico en la sección nueva (ampliación), presenta 74,20% de flujo pistón y 25,80% de flujo mezclado.

El floculador reciprocante (Walking Beam) de la sección antigua, presenta 54,90% de flujo pistón y 45,10% flujo mezclado.

Los gradientes de velocidad con mayor eficiencia en la remoción de turbiedad y color, están para turbiedades altas en el rango de 25,10 a 10,6  $s^{-1}$  y para turbiedades bajas entre 41,7 y 33,2  $s^{-1}$ .

En el floculador hidráulico predomina el flujo a pistón, no presenta zonas muertas y tiene un tiempo de retención real del floculador de 20 minutos.

El floculador reciprocante presenta flujo mezclado (índice de dispersión de Morrill de 3,19), no presenta zonas muertas y presenta un tiempo de retención hidráulica de 20 minutos.

#### **4.2 Fase No. 2. Revisión de la Estructura Existente**

En razón a que el proyecto tiene como objetivo modelar un sistema de agitación mecánica de paletas, tomando como referencia las condiciones operativas y estructura de floculación de la sección antigua de la PTAP Florida, en la revisión estructural no se consideró el floculador hidráulico de la sección nueva (ampliación).

El proceso de floculación en la sección antigua se realiza en un tanque, con las siguientes dimensiones: 16,29 m de longitud, 6,00 m de ancho, 3,12 m de altura útil y un borde libre de 0.20 m, dividido en (4) compartimientos separados por tabiques de madera, provistos de (4) agitadores reciprocantes (Walking Beam), cada uno con (2) juegos de paletas. Las dimensiones del tanque, los compartimentos, entradas y salidas y divisiones internas, son las siguientes:

**Tabla 6**

*Dimensiones del Tanque Floculador de la Sección Antigua - PTAP Florida*

Componente		Sección	Dimensión (CM)
Tanque floculador	Dimensión total del tanque	Largo Total Util ( $L_{TU}$ )	1.629,0
		Ancho Total Util ( $A_{TU}$ )	600,0
		Profundidad Total ( $H_T$ )	333,0
		Borde Libre (BL)	21,0
		Profundidad Útil ( $H_u$ )	312,0
Compartimen tos internos	Compartimento 1	Largo Compartimento 1 ( $L_1$ )	289,0
		Ancho Compartimento 1 ( $a_1$ )	600,0
		Profundidad Total Compartimento 1 ( $hc_1$ )	333,0
	Compartimento 2	Largo Compartimento 2 ( $L_2$ )	444,0
		Ancho Compartimento 2 ( $a_2$ )	600,0
		Profundidad Total Compartimento 2 ( $hc_2$ )	334,0
	Compartimento 3	Largo Compartimento 3 ( $L_3$ )	444,0
		Ancho Compartimento 3 ( $a_3$ )	600,0
		Profundidad Total Compartimento 3 ( $hc_3$ )	334,0

		Largo Compartimento 4 (L <sub>4</sub> )	446,0
	Compartimento 4	Ancho Compartimento 4 (a <sub>4</sub> )	600,0
		Profundidad Total Compartimento 4 (hc <sub>4</sub> )	333,0
		Largo de la cámara de entrada (lce)	30,0
Entrada de agua	Cámara de entrada	Altura pantalla entrada (hpe)	270,0
		Paso inferior pantalla entrada (hpe)	302,0
		Espesor de pared pantalla de entrada (epe)	20,0
		Pantalla divisoria	Altura pantalla divisoria 1 (hp <sub>1-2</sub> )
	# 1 (Paso entre	Ancho pantalla divisoria 1 (a <sub>1-2</sub> )	444,0
	compartimentos 1 -	Espesor de pared pantalla divisoria 1 (ep <sub>1-2</sub> )	2,0
	2)	Paso inferior pantalla divisoria 1 (hpi <sub>1-2</sub> )	47,0
Pantallas divisorias internas	Pantalla divisoria	Altura pantalla divisoria 2 (hp <sub>2-3</sub> )	261,0
	# 2 (Paso entre	Ancho pantalla divisoria 2 (a <sub>2-3</sub> )	600,0
	compartimentos 2 -	Espesor de pared pantalla divisoria 2 (ep <sub>2-3</sub> )	2,00
	3)	Paso superior pantalla divisoria 2 (hpi <sub>2-3</sub> )	72,0
	Pantalla divisoria	Altura pantalla divisoria 3 (hp <sub>3-4</sub> )	291,0
	# 3 (Paso entre	Ancho pantalla divisoria 3 (a <sub>3-4</sub> )	600,0
	compartimentos 3 -	Espesor de pared pantalla divisoria 3 (ep <sub>3-4</sub> )	2,0
	4)	Paso superior pantalla divisoria 3 (hpi <sub>3-4</sub> )	42,0
		Largo de la cámara de salida (lcs)	40,0
Salida de agua	Cámara de salida	Altura pantalla salida (hps)	254,0
		Paso inferior pantalla salida (hps)	79,0
		Espesor de pared pantalla de salida (eps)	20,0

---

Lado ventanas cuadradas de paso pantalla de salida (l)	24,0
Número de ventanas en pantalla de salida ( $N_v$ )	28,0
Número de columnas ventanas en pantalla de salida ( $N_{cvs}$ )	7,0
Número de filas ventanas en pantalla de salida ( $N_{fvs}$ )	4,0

---

En las figuras 12 a la 15 se observa la estructura de floculación y sus componentes.

### Figura 12

*Floculador Reciprocante PTAP Florida amb SA ESP*



*Nota.* Tomado del archivo fotográfico de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) Florida del amb SA ESP., Bucaramanga; 2024.

**Figura 13**

*Cámara de Entrada y Canastas de Agitación Entre Secciones Floculador Reciprocante PTAP*

*Florida amb SA ESP*



*Nota.* Tomado del archivo fotográfico de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) Florida del amb SA ESP., Bucaramanga; 2024.

**Figura 14**

*Tabiques o Pantallas Divisorias Entre Secciones Floculador Reciprocante PTAP Florida amb*

*SA ESP.*



*Nota.* Tomado del archivo fotográfico de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) Florida del amb SA ESP., Bucaramanga; 2024.

**Figura 15**

*Cámara de Salida Floculador Reciprocante PTAP Florida amb SA ESP.*



*Nota.* Tomado del archivo fotográfico de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) Florida del amb SA ESP., Bucaramanga; 2024.

En la inspección realizada se observó lo siguiente:

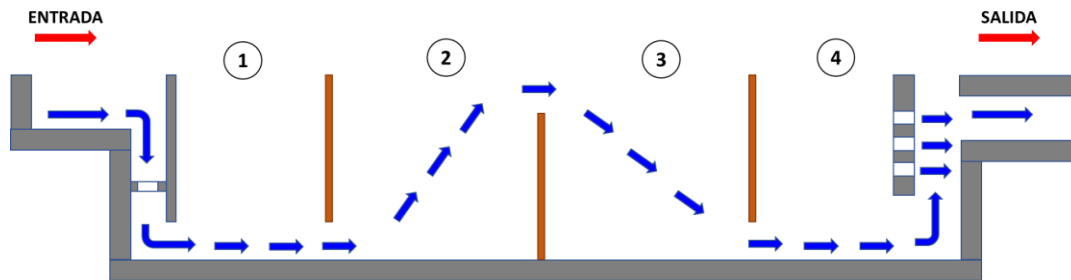
Cámara No. 1: El agua entra por el fondo del tanque y pasa a la Cámara No. 2 por el fondo del tanque.

Cámara 2: El agua entra a la Cámara No. 2 por el fondo del tanque y pasa a la Cámara No. 3 por la parte superior.

Cámara No. 3: El agua entra a la Cámara No. 3 por la parte superior del tanque y pasa a la Cámara No. 4 por el fondo del tanque.

Cámara No. 4: El agua entra a la Cámara No. 4 por el fondo del tanque y pasa a la sección de salida por una pantalla perforada y adicionalmente con abertura total en el fondo del tanque, para tomar el canal que transporta el agua floculada hacia los sedimentadores.

En la figura No. 16 se muestra la configuración actual de estructuras de entrada y salida del tanque de floculación (*Gris*), tabiques entre cámaras (*Café*) y recorrido del agua (*Azul*):

**Figura 16***Configuración de la Estructura Existente*

*Nota.* Representación gráfica de la estructura existente.

Posterior al dimensionamiento e inspección de la estructura existente y entendiendo la configuración de los tabiques divisorios y recorrido del agua, se procedió con la Fase No. 3 la cual, consiste en el diseño del modelo para su posterior fabricación:

#### 4.3 Fase No. 3. Diseño del Modelo

El cálculo del modelo se realizó por medio del análisis dimensional, el cual, trata de las relaciones matemáticas de las dimensiones de las magnitudes físicas. Todas las relaciones físicas pueden reducirse a una relación entre las magnitudes fundamentales de fuerza  $F$ , longitud  $L$  y tiempo  $T$  (o bien, masa  $M$ , longitud  $L$  y tiempo  $T$ ) (Giles, 1990).

Los modelos hidráulicos pueden ser verdaderos o distorsionados. Los modelos verdaderos tienen todas las características significativas del prototipo reproducidas a escala (Semejanza geométrica) y satisfacen todas las restricciones de diseño (semejanza cinemática y dinámica).

*Semejanza geométrica.* Entre el modelo y el prototipo existe semejanza geométrica cuando las relaciones entre las dimensiones correspondientes u homologas en modelo y prototipo son iguales (Giles, 1990).

*Semejanza cinemática.* Entre el modelo y prototipo existe semejanza cinemática si (1) las trayectorias de las partículas móviles homólogas son geoméricamente semejantes y (2) las relaciones entre las velocidades de las partículas homólogas son iguales (Giles, 1990).

*Semejanza dinámica.* Entre dos sistemas semejantes geométrica y cinemáticamente, existe semejanza dinámica si las relaciones entre las fuerzas homólogas en modelo y prototipo son las mismas (Giles, 1990).

Para realizar el escalamiento de las dimensiones del prototipo y diferentes variables operativas, se definió un factor de escala de longitudes constantes ( $L_r$ ) de 1:25, utilizando como parámetro, el número de Froude y su condición de semejanza dinámica  $Fr=1$ , es decir,  $Fr_P = Fr_M$ , dando como resultado las siguientes relaciones:

**Tabla 7**

*Relación de las Diferentes Variables de Flujo del Floculador Mecánico - PTAP Florida*

<b>Relación de variables de flujo del floculador mecánico</b>	
Relación de Longitudes ( $L_r$ )	$L_r = \frac{L_p}{L_m}$
Relación de Áreas ( $A_r$ )	$A_r = \left(\frac{L_p}{L_m}\right)^2 = L_r^2$
Relación de Volúmenes ( $V_r$ )	$V_r = \left(\frac{L_p}{L_m}\right)^3 = L_r^3$
Relación de Tiempo ( $T_r$ )	$T_r = L_r^{1/2}$
Relación de Velocidades ( $Vel_r$ )	$Vel_r = L_r^{1/2}$
Relación de Caudal ( $Q_r$ )	$Q_r = Vel_r * A_r = L_r^{1/2} * L_r^2 = (L_r)^{5/2}$

---


$$\text{Relación de Gradiente (G}_r) \quad G_r = L_r^{1/4}$$

$$\text{Relación de velocidad angular } (\omega) \quad \omega = L_r^{1/2}$$

*Nota.* En la tabla se encuentra la relación de las diferentes variables de flujo del floculador mecánico.

En la Tabla 6 se observa el escalamiento hallado para las principales variables de flujo.

**Tabla 8**

*Variables*

<b>Variable</b>	<b>Modelo (m)</b>	<b>Prototipo (p)</b>
Relación de Longitudes ( $L_r$ )	1	25
Caudal (Q)	1	3.125
Volumen (V)	1	15.625
Tiempo Retención ( $T_r$ )	1	5
Gradiente de Operación (G)	1	2
Velocidad angular ( $\omega$ )	1	5

De acuerdo con los parámetros anteriores y considerando la escala seleccionada 1:25 se obtienen las dimensiones y variables hidráulicas del modelo a partir del dimensionamiento del prototipo.

**Tabla 9***Dimensiones del Modelo en Centímetros (cm)*

Componente	Sección	Dimensiones (CM)		
		Prototipo	Modelo	
<b>Tanque floculador</b>	Largo Útil ( $L_{TU}$ )	1.629,0	65,2	
	Dimensión Ancho Útil ( $A_{TU}$ )	600,0	24,0	
	total del Profundidad Total ( $H_T$ )	333,0	13,3	
	tanque Borde Libre (BL)	21,0	0,8	
	Profundidad Útil ( $H_u$ )	312,0	12,5	
<b>Compartimentos internos</b>	Compartimento 1	Largo Compartimento 1 ( $L_1$ )	289,0	11,6
		Ancho Compartimento 1 ( $a_1$ )	600,0	24,0
		Profundidad Total Compartimento 1 ( $hc_1$ )	333,0	13,3
	Compartimento 2	Largo Compartimento 2 ( $L_2$ )	444,0	17,8
		Ancho Compartimento 2 ( $a_2$ )	600,0	24,0
		Profundidad Total Compartimento 2 ( $hc_2$ )	334,0	13,4
	Compartimento 3	Largo Compartimento 3 ( $L_3$ )	444,0	17,8
		Ancho Compartimento 3 ( $a_3$ )	600,0	24,0
		Profundidad Total Compartimento 3 ( $hc_3$ )	334,0	13,4
	Compartimento 4	Largo Compartimento 4 ( $L_4$ )	446,0	17,8
		Ancho Compartimento 4 ( $a_4$ )	600,0	24,0
		Profundidad Total Compartimento 4 ( $hc_4$ )	333,0	13,3

		Largo de la cámara de entrada (lce)	58,0	2,3	
		Altura pantalla entrada (hpe)	270,0	10,8	
<b>Entrada de agua</b>	Cámara de entrada	Ancho pantalla de entrada (ape)	600,0	24,0	
		Paso inferior pantalla entrada (hpe)	274,0	11,0	
		Espesor de pared pantalla de entrada (epe)	25,0	1,0	
		Área de ventanas distribuidoras de caudal	9.000,0	360,0	
		Pantalla	Altura pantalla divisoria 1 (hp <sub>1-2</sub> )	286,0	11,4
<b>Pantallas divisorias internas</b>	divisoria # 1	Ancho pantalla divisoria 1 (a <sub>1-2</sub> )	600,0	24,0	
		(Paso entre compartimentos 1 -2)	Espesor de pared pantalla divisoria 1 (ep <sub>1-2</sub> )	2,0	0,1
	divisoria # 2	Paso inferior pantalla divisoria 1 (hpi <sub>1-2</sub> )	47,0	1,9	
		Pantalla	Altura pantalla divisoria 2 (hp <sub>2-3</sub> )	261,0	10,4
	divisoria # 3	Ancho pantalla divisoria 2 (a <sub>2-3</sub> )	600,0	24,0	
		(Paso entre compartimentos 2 -3)	Espesor de pared pantalla divisoria 2 (ep <sub>2-3</sub> )	2,0	0,1
	divisoria # 3	divisoria # 2	Paso superior pantalla divisoria 2 (hpi <sub>2-3</sub> )	72,0	2,9
			Pantalla	Altura pantalla divisoria 3 (hp <sub>3-4</sub> )	291,0
		divisoria # 3	Ancho pantalla divisoria 3 (a <sub>3-4</sub> )	600,0	24,0
			(Paso entre compartimentos 3 -4)	Espesor de pared pantalla divisoria 3 (ep <sub>3-4</sub> )	2,0
<b>Salida de agua</b>	Cámara de salida	Paso superior pantalla divisoria 3 (hpi <sub>3-4</sub> )	42,0	1,7	
		Largo de la cámara de salida (lcs)	50,0	2,0	
		Ancho pantalla de salida (aps)	600,0	24,0	

Altura pantalla salida (hps)	254,0	10,2
Paso inferior pantalla salida (hps)	79,0	3,2
Espesor de pared pantalla de salida (eps)	25,0	1,0
Lado ventas cuadradas de paso pantalla de salida (l)	24,0	1,0
Número de ventanas en pantalla de salida ( $N_v$ )	28,0	1,1
Número de columnas ventanas en pantalla de salida ( $N_{cvs}$ )	7,0	0,3
Número de filas ventanas en pantalla de salida ( $N_{fvs}$ )	4,0	0,2

**Tabla 10***Parámetros Operativos a Escala Para el Modelo*

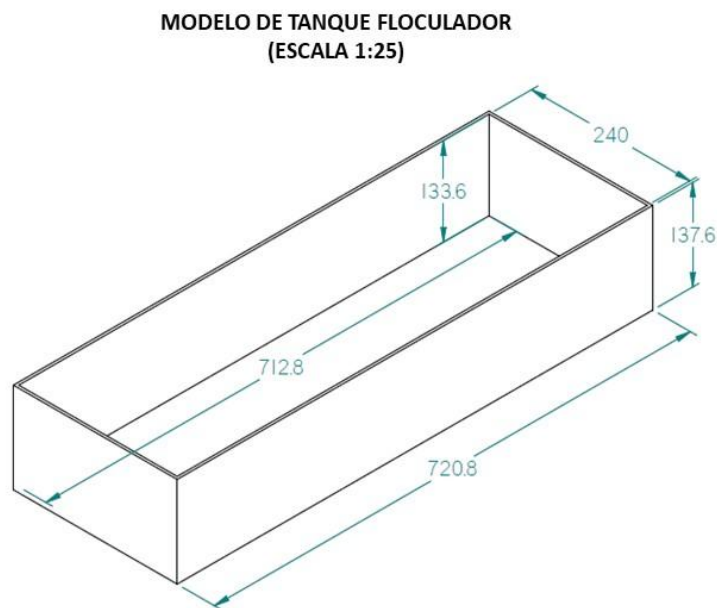
<b>Variable</b>	<b>Modelo (m)</b>	<b>Prototipo (p)</b>
Caudal (Q) ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )	128,0	400.000,0
Volumen (V) ( $\text{cm}^3$ )	19.516,7	304.948.800,0
Tiempo Retención ( $T_r$ ) (s)	152,5	762
Gradiente de Operación Cámara 1 ( $\text{s}^{-1}$ )	18,1	40,5
Gradiente de Operación Cámara 2 ( $\text{s}^{-1}$ )	14,8	33,1
Gradiente de Operación Cámara 3 ( $\text{s}^{-1}$ )	8,9	20,0
Gradiente de Operación Cámara 4 ( $\text{s}^{-1}$ )	6,4	14,3

En este proyecto se consideró escalar únicamente la geometría del tanque y sus componentes de entrada, salida e intermedios y realizar el cálculo hidráulico para el dimensionamiento de las paletas, selección de los motores y demás componentes de agitación en el modelo, con el fin de realizar el ejercicio con las variables operativas del sistema actual, esto es, aplicando los gradientes de trabajo en planta: 40,4, 33,1, 19,9 y 14,3  $S^{-1}$  y con ello, comparar la eficiencia en la remoción de turbiedad para los diferentes juegos de paletas propuestos.

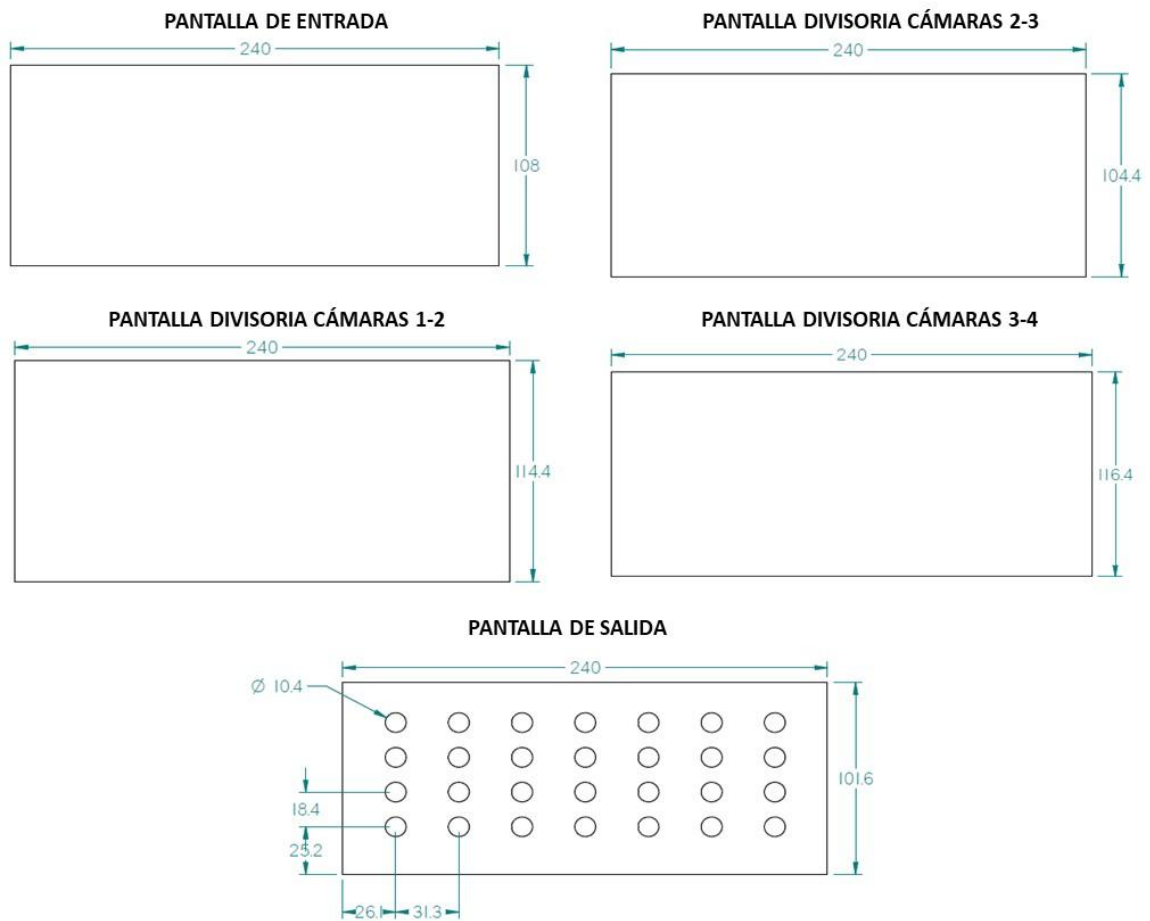
En las Figuras No. 17 y 18 se presenta las dimensiones del modelo a escala 1:25.

### Figura 17

#### *Dimensiones de Tanque Floculador*



*Nota.* Dimensiones de tanque floculador escala 1:25.

**Figura 18***Dimensiones Estructuras Internas de Tanque Floculador*

*Nota.* Dimensiones de pantallas de tanque floculador.

#### **4.3.1 Cálculos Hidráulicos Para el Dimensionamiento de Equipos Electromecánicos y de Agitación del Modelo**

Para el diseño de los elementos de agitación y selección de motorreductores se asumió una sola línea con el 50% del caudal escalado (Tabla No. 10) conservando los gradientes operativos de la planta 40,4, 33,1, 19,9 y 14,3  $S^{-1}$ , sin embargo, la construcción se realizó con el 100% del volumen requerido para el caudal total escalado de 128  $cm^3/s$ .

**Tabla 11***Parámetros de Diseño de Elementos de Agitación*

Descripción	Compartimento			
	1	2	3	4
<b>Dimensionamiento de compartimentos</b>				
Largo (cm)	16,3	16,3	16,3	16,3
Ancho (cm) (Se usa el 50% por juego de paletas)	12,0	12,0	12,0	12,0
Profundidad Útil (cm)	12,5	12,5	12,5	12,5
<b>Condiciones hidráulicas</b>				
Caudal (Q) (cm <sup>3</sup> /s) (Se asume el 50% por juego de paletas)	64,00			
Tiempo Retención (Tr) (s)	152,7			
Volumen Útil (V) (cm <sup>3</sup> )	2.440	2.440	2.440	2.440
<b>Agitación</b>				
Gradiente Máximo (s <sup>-1</sup> )	40,45	33,11	19,99	14,31
Gradiente Medio (s <sup>-1</sup> )	33,11	19,99	14,31	10,00
Gradiente Mínimo (s <sup>-1</sup> )	19,99	14,31	10,00	6,00

*Nota.* Datos de los parámetros de diseño de elementos de agitación

La Tabla 11 relaciona los criterios de diseño considerados en los cálculos hidráulicos a fin de cumplir con lo establecido en la Resolución 330 de 2017, que adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS).

**Tabla 12***Criterios de diseño RAS*

Descripción	Compartimento
-------------	---------------

	1	2	3	4
<b>Datos constantes</b>				
Área transversal de giro (cm <sup>2</sup> )		149,76		
Área mínima de las paletas (cm <sup>2</sup> ) - (RAS Titulo C - Ficha C.F.2: 15% - 20%) - Transversal al área de giro			20%	
Área mínima de las paletas (cm <sup>2</sup> )		29,95		
Espacio libre entre lámina de agua-paletas, muros-paletas y fondo del tanque-paletas (RAS Titulo C - Ficha C.F.2: 15 - 30 cm)			30	
Espacio libre entre lámina de agua-paletas, muros-paletas y fondo del tanque-paletas (Escala: L <sub>r</sub> /25) (cm)			1,20	
Separación entre paletas (cm)			30	
Separación entre paletas (Escala: L <sub>r</sub> /25) (cm)			1,20	
Ancho libre para paletas (cm)			9,60	
Profundidad Útil para paletas (cm)			10,08	

*Nota.* Datos de los criterios de diseño RAS

Los criterios de diseños indicados anteriormente, se aplicaron para el dimensionamiento de las paletas y establecer la velocidad de giro en RPM de cada uno de los ejes para los diferentes gradientes aplicar. Los juegos de paletas propuestos en el proyecto, son:

Diseño 2 Aspas, 1 Paleta / Aspa (2 Paletas / Eje)

Diseño 2 Aspas, 2 Paletas / Aspa (4 Paletas / Eje)

Diseño 2 Aspas, 3 Paletas / Aspa (6 Paletas / Eje)

Diseño 4 Aspas, 1 Paleta / Aspa (4 Paletas / Eje)

Diseño 4 Aspas, 2 Paletas / Aspa (8 Paletas / Eje)

Diseño 4 Aspas, 3 Paletas / Aspa (12 Paletas / Eje)

**Tabla 13**

Diseño 2 Aspas, 1 Paleta / Aspa (2 Paletas / Eje)

Área mínima de las paletas (cm <sup>2</sup> )					29,95
Número de paletas seleccionadas (Und)					2,00
Largo máximo de las Paletas (L) (cm)					10,08
Ancho de las Paletas (b) (cm)					1,49
Radio Eje-primera paleta (r <sub>1</sub> ) (cm)					4,06
Radio Eje-segunda paleta (r <sub>2</sub> ) (cm)					0,00
Sumatoria <b>áreas</b> x radios Eje-paletas al cubo ( $\sum A * r^3$ ) (cm <sup>2</sup> )					2.000
Velocidad angular/rotación por Compartimento (n) (RPM) (Gradiente Máximo – Máx.)	$n_{M\acute{a}x} = \left( \frac{\mu * V * G^2}{8000 * (\sum A * r^3)} \right)^{1/3}$	3,78	3,31	2,36	1,89
$\mu$ : <b>Viscosidad</b> dinámica del agua a 20°C = 1.002 x 10 <sup>-3</sup> Pa·s					
Velocidad angular/rotación por Compartimento (n) (RPM) (Gradiente Medio - Med)	$n_{Med} = \left( \frac{G_{Med}}{G_{M\acute{a}x}} \right)^{\frac{2}{3}} * n_{M\acute{a}x}$	3,31	2,36	1,89	1,49
Velocidad angular/rotación por Compartimento (n) (RPM) (Gradiente Mínimo - Min)	$n_{Min} = \left( \frac{G_{Min}}{G_{M\acute{a}x}} \right)^{\frac{2}{3}} * n_{M\acute{a}x}$	2,36	1,89	1,49	1,06
Potencia del motor (P) (N.m)	$P = \mu * V * G^2 * FS$	0,01	0,00	0,00	0,00
		0	7	2	1

---

 FS: Factor de Seguridad; 2,5 Recomendado, Jorge Arturo Pérez

(1997)

---

 Nota. La tabla muestra los criterios del diseño.
**Tabla 14***Diseño 2 Aspas, 2 Paletas / Aspa (4 Paletas / Eje)*

Área mínima de las paletas (cm <sup>2</sup> )	29,95			
Número de paletas seleccionadas (Und)	4,00			
Largo máximo de las Paletas (L) (cm)	10,08			
Ancho de las Paletas (b) (cm)	0,74			
Radio Eje-primera paleta (r <sub>1</sub> ) (cm)	4,43			
Radio Eje-segunda paleta (r <sub>2</sub> ) (cm)	2,49			
Sumatoria <b>áreas</b> x radios Eje-paletas al cubo ( $\sum A*r^3$ ) (cm <sup>2</sup> )	1.531			
Velocidad angular/rotación por Compartimento (n) (RPM)				
(Gradiente Máximo - <b>Máx.</b> )	4,13	3,62	2,58	2,07
$n_{Máx} = \left( \frac{\mu * V * G^2}{8000 * (\sum A * r^3)} \right)^{1/3}$				
$\mu$ : <b>Viscosidad</b> dinámica del agua a 20°C = 1.002 x 10 <sup>-3</sup> Pa·s				
Velocidad angular/rotación por Compartimento (n) (RPM)				
(Gradiente Medio - Med)	3,62	2,58	2,07	1,63
$n_{Med} = \left( \frac{G_{Med}}{G_{Máx}} \right)^{\frac{2}{3}} * n_{Máx}$				
Velocidad angular/rotación por Compartimento (n) (RPM)				
(Gradiente Mínimo - Min)				
$n_{Min} = \left( \frac{G_{Min}}{G_{Máx}} \right)^{\frac{2}{3}} * n_{Máx}$	2,58	2,07	1,63	1,16

---

Potencia del motor (P) (N.m)		0,01	0,00	0,00	0,00
	$P = \mu * V * G^2 * FS$	0	7	2	1

FS: Factor de Seguridad; 2,5 Recomendado, Jorge Arturo Pérez  
(1997)

*Nota.* La tabla muestra los criterios del diseño.

### Tabla 15

*Diseño 2 Aspas, 3 Paletas / Aspa (6 Paletas / Eje)*

Área mínima de las paletas (cm <sup>2</sup> )		29,95			
Número de paletas seleccionadas (Und)		6,00			
Largo máximo de las Paletas (L) (cm)		10,08			
Ancho de las Paletas (b) (cm)		0,50			
Radio Eje-primera paleta (r <sub>1</sub> ) (cm)		4,55			
Radio Eje-segunda paleta (r <sub>2</sub> ) (cm)		2,86			
Radio Eje-segunda paleta (r <sub>3</sub> ) (cm)		1,16			
Sumatoria <b>áreas</b> x radios Eje-paletas al cubo ( $\sum A * r^3$ ) (cm <sup>2</sup> )		1.190			
Velocidad angular/rotación por Compartimento (n) (RPM)					
(Gradiente Máximo - <b>Máx.</b> )	$n_{Máx} = \left( \frac{\mu * V * G^2}{8000 * (\sum A * r^3)} \right)^{1/3}$	4,49	3,93	2,81	2,25
$\mu$ : <b>Viscosidad</b> dinámica del agua a 20°C = 1.002 x 10 <sup>-3</sup> Pa·s					
Velocidad angular/rotación por Compartimento (n) (RPM)					
(Gradiente Medio - Med)	$n_{Med} = \left( \frac{G_{Med}}{G_{Máx}} \right)^{\frac{2}{3}} * n_{Máx}$	3,93	2,81	2,25	1,77
Velocidad angular/rotación por Compartimento (n) (RPM)					
(Gradiente Mínimo - Min)	$n_{Min} = \left( \frac{G_{Min}}{G_{Máx}} \right)^{\frac{2}{3}} * n_{Máx}$				

---

		2,81	2,25	1,77	1,26
Potencia del motor (P) (N.m)		0,01	0,00	0,00	0,00
	$P = \mu * V * G^2 * FS$	0	7	2	1

FS: Factor de Seguridad; 2,5 Recomendado, Jorge Arturo Pérez (1997)

---

*Nota.* La tabla muestra los criterios del diseño.

### Tabla 16

*Diseño 4 Aspas, 1 Paleta / Aspa (4 Paletas / Eje)*

---

Área mínima de las paletas (cm <sup>2</sup> )		29,95			
Número de paletas seleccionadas (Und)		4,00			
Largo máximo de las Paletas (L) (cm)		10,08			
Ancho de las Paletas (b) (cm)		0,74			
Radio Eje-primera paleta (r <sub>1</sub> ) (cm)		4,43			
Radio Eje-segunda paleta (r <sub>2</sub> ) (cm)		0,00			
Sumatoria <b>áreas</b> x radios Eje-paletas al cubo ( $\sum A * r^3$ ) (cm <sup>2</sup> )		2.601			
Velocidad angular/rotación por Compartimento (n) (RPM)					
(Gradiente Máximo - <b>Máx.</b> )	$n_{Máx} = \left( \frac{\mu * V * G^2}{8000 * (\sum A * r^3)} \right)^{1/3}$	3,46	3,03	2,16	1,73
$\mu$ : <b>Viscosidad</b> dinámica del agua a 20°C = 1.002 x 10 <sup>-3</sup> Pa·s					
Velocidad angular/rotación por Compartimento (n) (RPM)					
(Gradiente Medio – Med.)	$n_{Med} = \left( \frac{G_{Med}}{G_{Máx}} \right)^{\frac{2}{3}} * n_{Máx}$	3,03	2,16	1,73	1,36

---

Velocidad angular/rotación por Compartimento (n) (RPM)					
(Gradiente Mínimo – Min.)	$n_{Min} = \left( \frac{G_{Min}}{G_{Máx}} \right)^{\frac{2}{3}} * n_{Máx}$	2,16	1,89	1,35	1,08
Potencia del motor (P) (N.m)	$P = \mu * V * G^2 * FS$	0,01	0,00	0,00	0,00
		0	7	2	1
FS: Factor de Seguridad; 2,5 Recomendado, Jorge Arturo Pérez (1997)					

Nota. La tabla muestra los criterios del diseño.

### Tabla 17

Diseño 4 Aspas, 2 Paletas / Aspa (8 Paletas / Eje)

Área mínima de las paletas (cm <sup>2</sup> )	29,95
Número de paletas seleccionadas (Und)	8,00
Largo máximo de las Paletas (L) (cm)	10,08
Ancho de las Paletas (b) (cm)	0,37
Radio Eje-primera paleta (r <sub>1</sub> ) (cm)	4,61
Radio Eje-segunda paleta (r <sub>2</sub> ) (cm)	3,04
Sumatoria <b>áreas</b> x radios Eje-paletas al cubo ( $\sum A * r^3$ ) (cm <sup>2</sup> )	1.893
Velocidad angular/rotación por Compartimento (n) (RPM)	
(Gradiente Máximo – Máx.)	$n_{Máx} = \left( \frac{\mu * V * G^2}{8000 * (\sum A * r^3)} \right)^{1/3}$
	3,85    3,37    2,41    1,93
$\mu$ : <b>Viscosidad</b> dinámica del agua a 20°C = 1.002 x 10 <sup>-3</sup> Pa·s	

Velocidad angular/rotación por Compartimento (n) (RPM) (Gradiente Medio – Med.)	$n_{Med} = \left( \frac{G_{Med}}{G_{Máx}} \right)^{\frac{2}{3}} * nM_{áx}$	3,37	2,95	2,11	1,68
Velocidad angular/rotación por Compartimento (n) (RPM) (Gradiente Mínimo – Min.)	$n_{Min} = \left( \frac{G_{Min}}{G_{Máx}} \right)^{\frac{2}{3}} * nM_{áx}$	2,41	1,93	1,52	1,08
Potencia del motor (P) (N.m)	$P = \mu * V * G^2 * FS$	0,01	0,00	0,00	0,00
		0	7	2	1

FS: Factor de Seguridad; 2,5 Recomendado, Jorge Arturo Pérez (1997)

**Tabla 18**

*Diseño 4 Aspas, 3 Paletas / Aspa (12 Paletas / Eje)*

Área mínima de las paletas (cm <sup>2</sup> )	29,95
Número de paletas seleccionadas (Und)	12,00
Largo máximo de las Paletas (L) (cm)	10,08
Ancho de las Paletas (b) (cm)	0,25
Radio Eje-primera paleta (r <sub>1</sub> ) (cm)	4,68
Radio Eje-segunda paleta (r <sub>2</sub> ) (cm)	3,23
Radio Eje-segunda paleta (r <sub>3</sub> ) (cm)	1,78
Sumatoria <b>áreas</b> x radios Eje-paletas al cubo ( $\sum A*r^3$ ) (cm <sup>2</sup> )	1.413

Velocidad angular/rotación por Compartimento (n) (RPM)					
(Gradiente Máximo – Máx.)	$n_{M\acute{a}x} = \left( \frac{\mu * V * G^2}{8000 * (\sum A * r^3)} \right)^{1/3}$	4,24	3,71	2,65	2,12
$\mu$ : <b>Viscosidad</b> dinámica del agua a 20°C = 1.002 x 10 <sup>-3</sup> Pa·s					
Velocidad angular/rotación por Compartimento (n) (RPM)					
(Gradiente Medio – Med.)	$n_{Med} = \left( \frac{G_{Med}}{G_{M\acute{a}x}} \right)^{\frac{2}{3}} * n_{M\acute{a}x}$	3,71	2,65	2,12	1,67
Velocidad angular/rotación por Compartimento (n) (RPM)					
(Gradiente Mínimo – Min.)	$n_{Min} = \left( \frac{G_{Min}}{G_{M\acute{a}x}} \right)^{\frac{2}{3}} * n_{M\acute{a}x}$				
		2,65	2,12	1,67	1,19
		0,01	0,00	0,00	0,00
Potencia del motor (P) (N.m)	$P = \mu * V * G^2 * FS$	0	7	2	1

FS: Factor de Seguridad; 2,5 Recomendado, Jorge Arturo Pérez

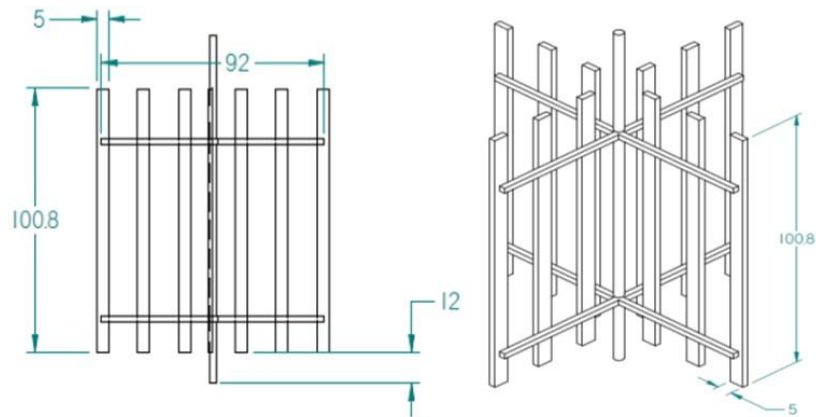
(1997)

*Nota.* La tabla muestra los criterios del diseño.

La Figura No. 19, muestra el diseño de uno de los juegos de paletas propuesto para el estudio, los cuales, con base en los cálculos hidráulicos obtenidos, se fueron construyendo a medida que se iba realizando las pruebas.

### Figura 19

*Eje con 4 Aspas, 3 Paletas / Aspa (12 Paletas / Eje)*



La Tabla No.17 muestra el resumen de las velocidades de giro de los ejes (RPM) y potencia (N.m) requerida para de motorreductores, para cada juego de paletas a estudiar:

**Tabla 19**

*Velocidades de Giro de los Ejes (RPM) y Potencia (N.m)*

Descripción	Compartimento			
	1	2	3	4
Caudal (Q) (cm <sup>3</sup> /s)		64		
Tiempo Retención (Tr) (s)		152		
Volumen Útil (V) (cm <sup>3</sup> )	2,440	2,440	2,440	2,440
Gradiente Máximo (s <sup>-1</sup> )	40,45	33,11	19,99	14,31
<b>2 Aspas, 1 Paleta / Aspa (2 Paletas / Eje)</b>				
Velocidad angular/rotación por Compartimento (n) (RPM)	3,8	3,3	2,4	1,9
(Gradiente Máximo – Máx.)				
Potencia del motor (P) (N.m)	0,010	0,007	0,002	0,001
<b>2 Aspas, 2 Paletas / Aspa (4 Paletas / Eje)</b>				

Velocidad angular/rotación por Compartimento (n) (RPM)	4,1	3,6	2,6	2,1
(Gradiente Máximo – Máx.)				
Potencia del motor (P) (N.m)	0,010	0,007	0,002	0,001
<b>2 Aspas, 3 Paletas / Aspa (6 Paletas / Eje)</b>				
Velocidad angular/rotación por Compartimento (n) (RPM)	4,5	3,9	2,8	2,2
(Gradiente Máximo – Máx.)				
Potencia del motor (P) (N.m)	0,010	0,007	0,002	0,001
<b>4 Aspas, 1 Paleta / Aspa (4 Paletas / Eje)</b>				
Velocidad angular/rotación por Compartimento (n) (RPM)	3,5	3,0	2,2	1,7
(Gradiente Máximo – Máx.)				
Potencia del motor (P) (N.m)	0,010	0,007	0,002	0,001
<b>4 Aspas, 2 Paletas / Aspa (8 Paletas / Eje)</b>				
Velocidad angular/rotación por Compartimento (n) (RPM)	3,8	3,4	2,4	1,9
(Gradiente Máximo – Máx.)				
Potencia del motor (P) (N.m)	0,010	0,007	0,002	0,001
<b>4 Aspas, 3 Paletas / Aspa (12 Paletas / Eje)</b>				
Velocidad angular/rotación por Compartimento (n) (RPM)	4,2	3,7	2,7	2,1
(Gradiente Máximo – Máx.)				
Potencia del motor (P) (N.m)	0,010	0,007	0,002	0,001

*Nota.* Datos sobre las velocidades de giro de los ejes (RPM) y potencia (N.m)

La selección de los componentes electromecánicos se implementó de acuerdo con los cálculos hidráulicos realizados para cada uno de los gradientes de trabajo en planta: 40,4, 33,1,

19,9 y 14,3  $S^{-1}$ . Los cálculos arrojaron la necesidad de utilizar motorreductores N20 de alto rendimiento con motor de 6V DC de tensión de alimentación, velocidad de salida sin carga de 15 RPM, torque de 2.0 Kg/cm, los cuales, se utilizaron en todos los compartimentos para facilidad en la compra, instalación y adquisición de elementos eléctricos y electrónicos para su puesta en operación. Para la variación de la frecuencia se instaló controladores PWM de velocidad de motor DC 6V-28V/3A 13 khz.

Las figuras No. 20 y 21 presentan el motorreductor y controlador seleccionados para el modelo.

### **Figura 20**

*Motorreductor de Metal 6V 15RPM N20*



*Nota.* Tomado de Electronilab. Motorreductor de metal 6V 15RPM N20; Colombia; 2024.

Características técnicas de los motores:

Material: Metal

Modelo: N20

Longitud Total: 36 mm

Tamaño de motor: 12 mm (diámetro) \* 26 mm (altura)

Tamaño de eje: 3 mm (diámetro) \* 10 mm (longitud)

Rango de Voltaje: 3-9 VDC

Voltaje Nominal: 6 VDC

Velocidad sin Carga: 15 RPM

Corriente sin Carga: 10 - 20 mA

Velocidad a Máxima Eficiencia: 120 RPM

Corriente a Máxima Eficiencia: 20 mA

Torque a Máxima Eficiencia: 2.00 Kg/cm

Torque de Paro (Stall Torque): 12.00 Kg/cm

Corriente de Paro (Stall Current): 1.00 A

### Figura 21

*Controlador PWM de Velocidad de Motor DC 6V-28V/3A 13khz.*



*Nota.* Tomado de Electronilab. Controlador PWM de Velocidad de Motor DC 6V-28V/3A 13khz; Colombia; 2024.

Características técnicas del controlador:

Alto rendimiento, alto par, baja generación de calor.

Tensión de alimentación de entrada: 6 V – 28 V DC

La potencia máxima de salida: 80 W

La máxima corriente de salida continua: 3 A

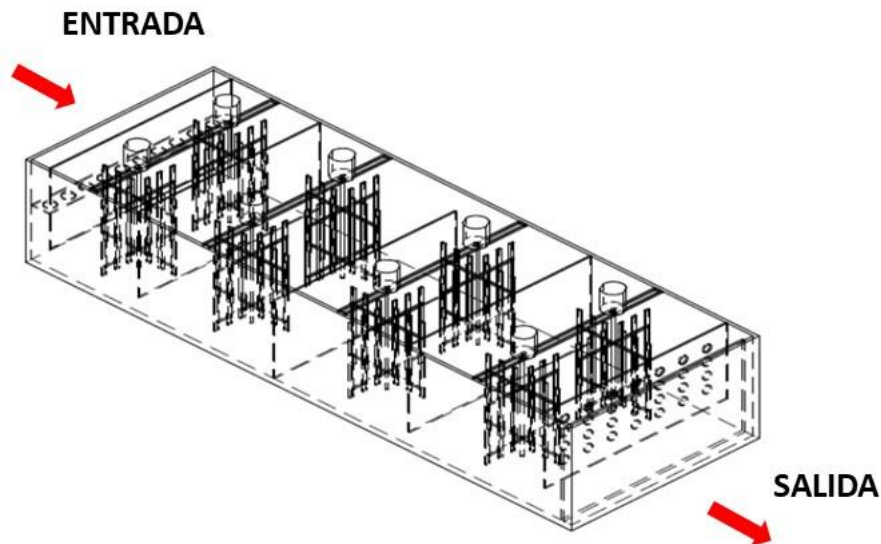
Ciclo de trabajo ajustable: 5% - 100%

#### 4.4 Fase No. 4. Construcción del Modelo

Posterior al desarrollo de la Fase No. 3. Diseño del Modelo, se procedió con la fabricación del modelo en acrílico transparente a diferentes espesores, así: las paredes externas y compartimentos de entrada y salida, se construyeron en acrílico de espesor 5 mm y las divisiones internas o tabiques de separación en espesor 2 mm. El modelo contó con todos los componentes estructurales existentes en el prototipo: a) cámara de entrada con sus respectivos orificios de distribución de caudal y pantalla de ingreso, b) tabiques de separación entre secciones, c) cámara de salida con sus respectivos orificios de distribución de caudal y pantalla con salida sumergida. Las Figuras No. 22 y 23 presenta el diseño del modelo a escala 1:25 en *Software Solid Edge*:

#### Figura 22

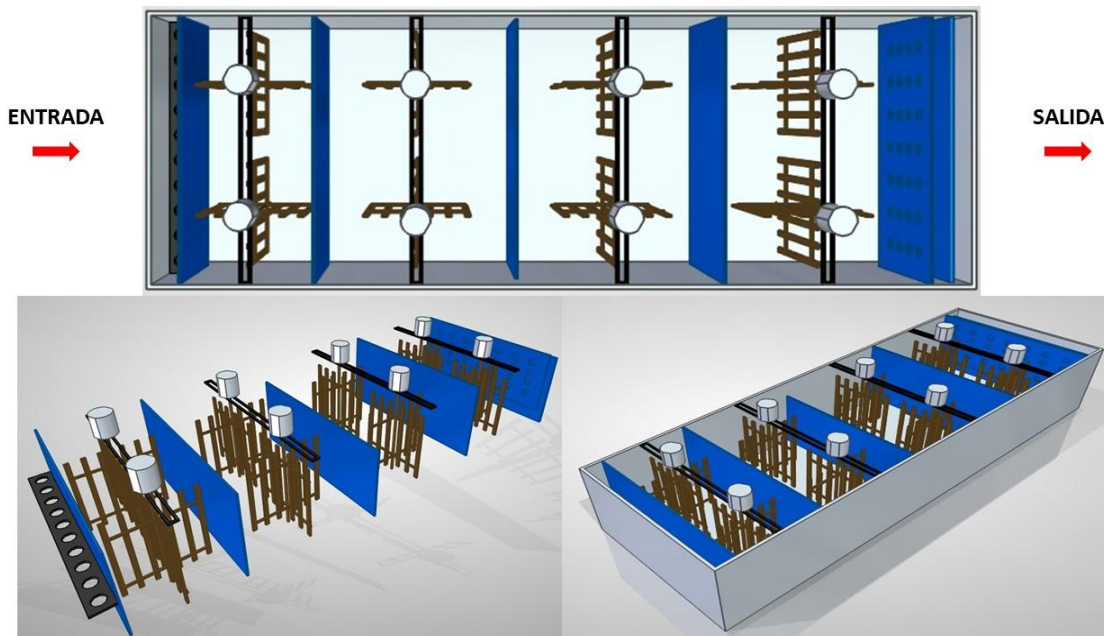
*Modelo de Floculador a Escala 1:25*



*Nota.* Representación gráfica del modelo a escala 1:25

#### Figura 23

*Modelo de Floculador (Software Solid Edge)*



*Nota.* Representación gráfica del modelo floculador.

#### **Figura 24**

*Modelo Construido Ubicado en Sitio de Trabajo*



*Nota.* La figura presenta el modelo construido y ubicación en sitio de trabajo.

#### **4.5 Fase No. 5. Pruebas de Proceso**

Las pruebas de proceso consistieron en:

Observar la trayectoria y comportamiento de los patrones de mezcla al interior del tanque de floculación tanto para la Configuración de la Estructura Existente (Figura 24), como para la Configuración de la Estructura Propuesta en el Proyecto (Figura 25).

Aplicar una sustancia trazadora y medir la conductividad del agua de salida del modelo para estudiar los modelos matemáticos como Wolf y Resnick, análisis de la curva de tendencia del trazador e índice de Morrill y determinar los tipos de flujo que se presentan en el tanque de floculación.

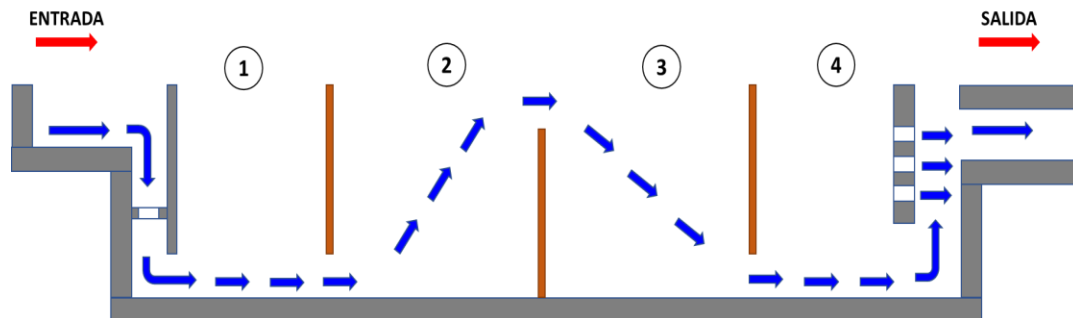
Realizar pruebas con las diferentes configuraciones o juegos de paletas propuestas para determinar la mayor eficiencia en la remoción de turbiedad (UNT) y Color (UPC) en el sistema de floculación.

Las pruebas aplicadas tanto para la Configuración de la Estructura Existente (Figura 24), como para la Configuración de la Estructura Propuesta en el Proyecto (Figura 25), así como, para los diferentes juegos de paletas propuestos, se realizaron conservando las mismas condiciones operativas del modelo: Caudal de 0,128 L/s y gradientes de mezcla de 40,4, 33,1, 19,9 y 14,3 S<sup>-1</sup>.

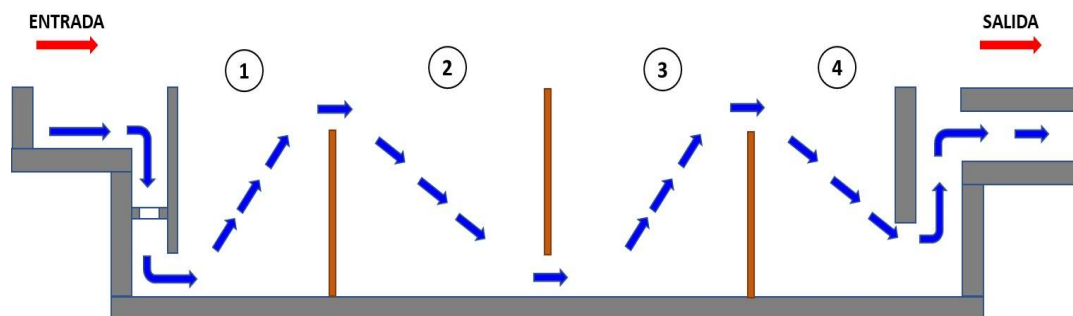
Las pruebas se desarrollaron aplicando la siguiente metodología:

Prueba con anilina: Para conocer visualmente la trayectoria y patrones de mezcla del agua al interior del floculador tanto con la configuración actual de los tabiques divisorios como la propuesta en el proyecto, se realizó pruebas aplicando anilina en solución a la entrada del floculador.

En las Figuras No. 24 y 25, se presenta la configuración actual y la propuesta en el proyecto, para las estructuras de entrada y salida del tanque de floculación (*Gris*), configuración de tabiques entre cámaras (*Café*) y recorrido del agua (*Azul*):

**Figura 25***Configuración de la Estructura Existente*

*Nota.* Representación gráfica de la estructura existente.

**Figura 26***Configuración de la Estructura Propuesta en el Proyecto*

*Nota.* Representación gráfica de la estructura propuesta.

En la Tabla 18 se describe la configuración actual de la estructura y la propuesta en el proyecto:

**Tabla 20***Secciones de la Cámara*

Sección	Existente	Propuesta
<b>Cámara No. 1</b>	El agua entra a la Cámara No. 1 por el fondo del tanque y pasa en línea recta a la Cámara No. 2 por el fondo del tanque.	El agua entra a la Cámara No. 1 por el fondo del tanque y pasa a la Cámara No. 2 por la parte superior del tabique.
<b>Cámara No. 2</b>	El agua entra a la Cámara No. 2 por el fondo del tanque y pasa a la Cámara No. 3 por la parte superior del tabique.	El agua entra a la Cámara No. 2 por la parte superior del tanque y pasa a la Cámara No. 3 por el fondo del tanque.
<b>Cámara No. 3</b>	El agua entra a la Cámara No. 3 por la parte superior del tanque y pasa a la Cámara No. 4 por el fondo del tanque.	El agua entra a la Cámara No. 3 por el fondo del tanque y pasa a la Cámara No. 4 por la parte superior del tabique.
<b>Cámara No. 4</b>	El agua entra a la Cámara No. 4 por el fondo del tanque y pasa en línea recta a la sección de salida.	El agua entra a la Cámara No. 4 por la parte superior del tabique y pasa por el fondo del tanque hacia la sección de salida.
<b>Salida</b>	Pantalla de salida CON perforaciones distribuidas en toda la sección transversal al flujo, adicionalmente, cuenta con abertura total en el fondo del tanque, para dirigirse al canal que transporta el	Pantalla de salida SIN perforaciones y con abertura total en el fondo del tanque, para obligar el paso sumergido del agua desde la Cámara No. 4 hacia el canal que transporta el

---

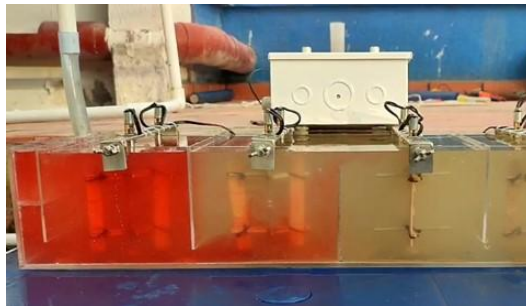
agua floculada hacia los agua floculada hacia los  
sedimentadores. sedimentadores.

---

En las Figuras No. 27 y 28, se observa la trayectoria del agua al interior del tanque con la configuración actual de tabiques (Figura No. 24),

### **Figura 27**

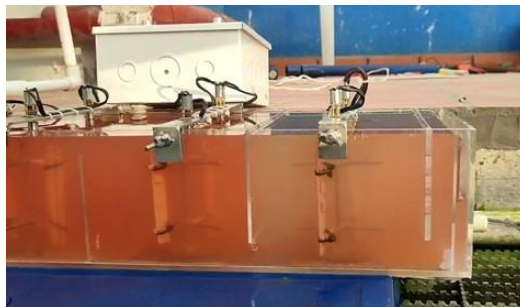
*Entrada Anilina. Configuración actual*



*Nota.* Evidencia fotográfica de la configuración actual.

### **Figura 28**

*Salida Anilina. Configuración actual*



*Nota.* Evidencia fotográfica de la configuración actual.

En las Figuras No. 29 y 30, se observa la trayectoria del agua al interior del tanque con la configuración de tabiques propuesta en el proyecto (Figura No. 25),

**Figura 29**

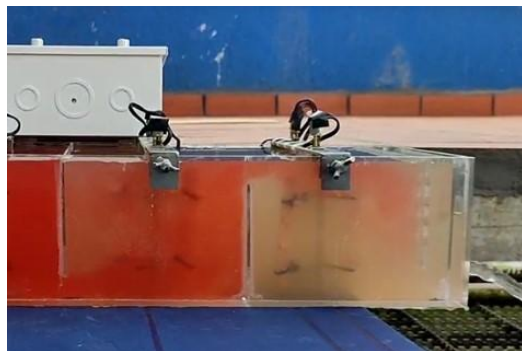
*Entrada Anilina. Propuesta*



*Nota.* Evidencia fotográfica de la configuración propuesta.

**Figura 30**

*Salida Anilina. Propuesta*



*Nota.* Evidencia fotográfica de la configuración propuesta.

Prueba de trazadores: La prueba de trazadores se realizó mediante la dosificación instantánea de Cloruro de Sodio (NaCl). Para determinar la cantidad del trazador requerido se aplicó el cálculo establecido en la Tabla 2 *Formas de Aplicar o Dosificar el Trazador*; dicho cálculo arrojó la necesidad de aplicar 8,05 gr de NaCl para el volumen de 0,020 m<sup>3</sup> que tiene el modelo.

**Tabla 21**

*Cantidad de Trazador Requerido*

$$P = \frac{V * K * Co}{1 * 10^3}$$

P = Peso del trazador, Kg

V = Volumen útil del Floculador, m<sup>3</sup>

K = Constante de Corrección

Co = Concentración Inicial, g/m<sup>3</sup>

I = Grado de Pureza del Trazador, Fracción de la Unidad

$$K = \frac{\text{Peso NaCl}}{\text{Peso Cl}} = \frac{23+35,5}{35,5} = 1,65$$

Volumen útil del Floculador	0,020	m <sup>3</sup>
Constante de Corrección	1,65	
Concentración Inicial	250	g/m <sup>3</sup>
Pureza del Trazador	97	%
	0,01	Kg
	<b>P</b>	
	8,05	g

*Nota.* Evidencia fotográfica de la configuración actual.

Para garantizar la distribución uniforme y mezcla rápida del trazador con el agua de entrada al modelo, los 8,05 gr de NaCl se disolvieron en 100 ml de agua destilada y se agitó lentamente durante 5 minutos hasta obtener una solución homogénea. Posteriormente, se aplicó lentamente la solución trazadora durante 5.08 segundos en la sección de entrada del modelo (Angarita, 2015).

### Figura 31

*Aplicación Trazador*



*Nota.* Evidencia fotográfica del trazador.

Aplicado el trazador, inmediatamente se inicia la toma de muestras cada 10 segundos y hasta por un tiempo igual o superior a 3 veces el tiempo de retención hidráulico del modelo o reactor en estudio o en su defecto para este caso, hasta que el valor de conductividad sea igual o esté cerca del medido inicialmente ( $t_1$ ).

### **Figura 32**

*Toma de Muestras Salida del Modelo*



*Nota.* Evidencia fotográfica del trazador

Finalmente, se midió la conductividad con un equipo de laboratorio, que para este caso se utilizó el Conductímetro HQ14d marca HACH con sonda Intellical CDC401 con célula de conductividad de grafito de 4 polos, con cable de 1 metro.

**Figura 33**

*Conductímetro HQ14d – HACH*

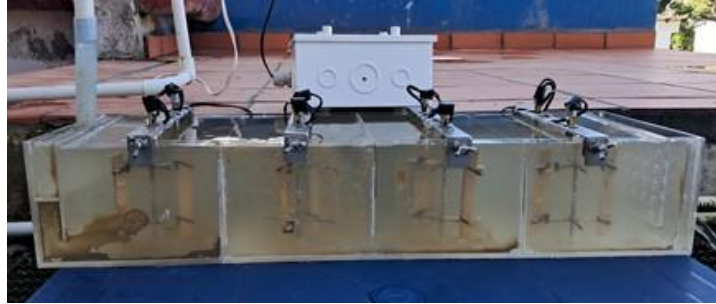


*Nota.* Conductímetro de la Planta Floridablanca

Prueba de eficiencia: Posterior a la prueba de trazadores realizada para las dos (2) configuraciones de tabiques, aplicados los modelos matemáticos como Wolf y Resnick, análisis de la curva de tendencia del trazador e índice de Morrill y determinados los diferentes tipos de flujo que se presentaron en el tanque de floculación, se seleccionó la mejor configuración de tabiques basados en los resultados obtenidos para los diferentes tipos de flujo, se procedió con las pruebas de eficiencia para seleccionar la mejor configuración de paletas propuestos para este proyecto, las cuales, fueron calculadas de acuerdo como se indicó en las Tablas 11 a la 16. Para esta prueba se consideró un tiempo de sedimentación de 20 min.

**Figura 34**

*Propuesta 2 Aspás, 1 Paleta / Aspa (2 Paletas / Eje)*



*Nota.* Evidencia fotográfica de la propuesta.

**Figura 35**

*Propuesta 2 Aspas, 2 Paletas / Aspa (4 Paletas / Eje)*



*Nota.* Evidencia fotográfica de la propuesta.

**Figura 36**

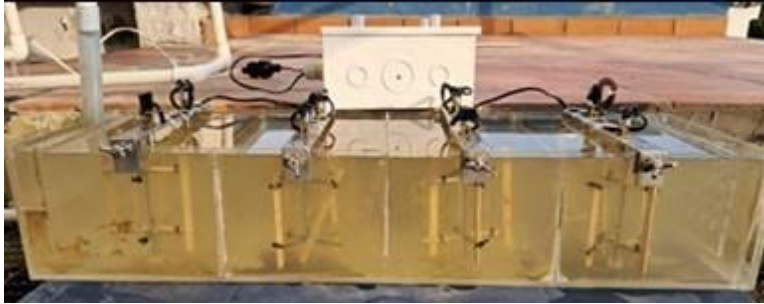
*Propuesta 2 Aspas, 3 Paletas / Aspa (6 Paletas / Eje)*



*Nota.* Evidencia fotográfica de la propuesta.

**Figura 37**

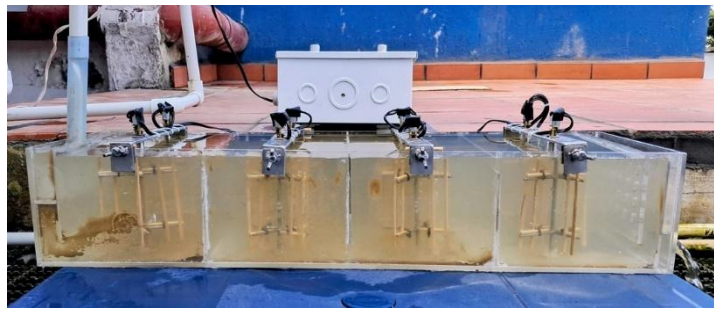
*Propuesta 4 Aspas, 1 Paleta / Aspa (4 Paletas / Eje)*



*Nota.* Evidencia fotográfica de la propuesta.

### **Figura 38**

*Propuesta 4 Aspas, 2 Paletas / Aspa (8 Paletas / Eje)*



*Nota.* Evidencia fotográfica de la propuesta.

### **Figura 39**

*Propuesta 4 Aspas, 3 Paletas / Aspa (12 Paletas / Eje)*



*Nota.* Evidencia fotográfica de la propuesta.

Costos Operativos: Finalizadas las pruebas de eficiencia se realizó la estimación del costo de la implementación del nuevo sistema tomando como base el proyecto de renovación del sistema

de floculación mecánica de eje vertical realizado en una de las plantas del amb entre los meses de enero y abril de 2025, el cual, consistió en la actualización tecnológica de motorreductores y del sistema de agitación con la misma configuración evaluado en este proyecto (12 paletas por eje).

Posteriormente, se calculó los costos por el exceso de dosis aplicada en la Sección de Antigua Vs Sección Nueva de la Planta Floridablanca, se midió el consumo de energía del sistema de agitación existente para compararlo con el consumo teórico del sistema propuesto. Con lo anterior, se estimó el gasto por el exceso en aplicación de insumos y por consumo de energía y se calculó el tiempo en años de recuperación de la inversión de la implementación del sistema de agitación propuesto en este proyecto.

## 5. Resultados Obtenidos

### 5.1 Prueba con Anilina

En la prueba realizada con anilina se observó que la concentración del colorante en la Cámara 1, es mayor (Figura 28) en la Configuración de la Estructura Propuesta en el Proyecto, que en la Configuración de la Estructura Existente (Figura 26), esto debido a que el agua ingresa por la parte inferior y sale por la parte superior de la Cámara, lo que obliga a un mayor recorrido y por ende mayor tiempo de retención y agitación en esta sección, y así, sucesivamente en todas las secciones del floculador.

:

**Tabla 22**

*Tiempo de Retención Prueba de Anilina*

<b>Tiempo de Retención</b>	<b>Configuración de la Estructura Existente</b>	<b>Configuración de la Estructura Propuesta (Figura 25)</b>
Cámara 1	5 s	10 s
Cámara 2	8 s	9 s
Cámara 3	7 s	8 s
Cámara 4	8 s	8 s
Total, desde que ingresa a Cámara 1, hasta que inicia la salida de Cámara 4	<b>28 s</b>	<b>35 s</b>

---

Permanencia del colorante en		
el tanque (Desde que entra	<b>204 s</b>	<b>260 s</b>
hasta que sale en su totalidad)		

---

Nota. La tabla presenta los tiempos de retención medidos en la prueba de anilina.

De acuerdo con los resultados obtenidos se determina que la configuración propuesta para el proyecto es mejor que la existente, en razón que se obtiene mayor tiempo de retención del colorante en la Cámara 1, lo cual, repercute en el tiempo total de permanencia del colorante en el tanque.

## 5.2 Prueba de Trazadores

A continuación, los resultados obtenidos en la prueba de trazadores aplicada a la Configuración de la Estructura Existente y la Propuesta para el Proyecto.

### 5.2.1 Prueba con Configuración de la Estructura Existente

La Tabla 23 presenta los resultados del ensayo de trazadores con NaCl aplicada al modelo con la Configuración de la Estructura Existente. La prueba se desarrolló con caudal de 0.128 L/s y volumen de 19,52 L, con tiempo de retención hidráulico de 153 s (2.54 minutos), el tiempo real obtenido en la prueba fue de 141,63 s (2.36 minutos).

**Tabla 23**

*Resultado Prueba Trazadores Configuración de la Estructura Existente*

---

<b>t (s)</b>	<b>Conductividad (<math>\mu\text{S/cm}</math>)</b>	<b>t/to</b>	<b>C-Co</b>	<b>Sumatoria (C-Co)</b>	<b>F(t)</b>	<b>1-F(t)</b>
<b>0</b>	67,10	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00

---

<b>10</b>	67,60	0,07	0,50	0,50	0,01	99,99
<b>20</b>	66,90	0,13	-0,20	0,30	0,00	100,00
<b>30</b>	128,20	0,20	61,10	61,40	0,65	99,35
<b>40</b>	412,00	0,27	344,90	406,30	4,29	95,71
<b>50</b>	650,00	0,33	582,90	989,20	<b>10,45</b>	89,55
<b>60</b>	815,00	0,40	747,90	1737,10	18,35	81,65
<b>70</b>	861,00	0,47	793,90	2531,00	26,74	73,26
<b>80</b>	846,00	0,53	778,90	3309,90	34,97	65,03
<b>90</b>	802,00	0,60	734,90	4044,80	<b>42,73</b>	57,27
<b>100</b>	750,00	0,67	682,90	4727,70	49,95	50,05
<b>110</b>	670,00	0,73	602,90	5330,60	56,32	43,68
<b>120</b>	601,00	0,80	533,90	5864,50	61,96	38,04
<b>130</b>	542,00	0,87	474,90	6339,40	66,98	33,02
<b>140</b>	486,00	0,93	418,90	6758,30	71,40	28,60
<b>150</b>	438,00	1,00	370,90	7129,20	75,32	24,68
<b>160</b>	394,00	1,07	326,90	7456,10	78,78	21,22
<b>170</b>	354,00	1,13	286,90	7743,00	81,81	18,19
<b>180</b>	313,00	1,20	245,90	7988,90	84,41	15,59
<b>190</b>	282,00	1,27	214,90	8203,80	86,68	13,32
<b>200</b>	261,00	1,33	193,90	8397,70	88,72	11,28
<b>210</b>	231,00	1,40	163,90	8561,60	<b>90,46</b>	9,54
<b>220</b>	196,20	1,47	129,10	8690,70	91,82	8,18
<b>230</b>	180,80	1,53	113,70	8804,40	93,02	6,98

<b>240</b>	173,90	1,60	106,80	8911,20	94,15	5,85
<b>250</b>	155,70	1,67	88,60	8999,80	95,09	4,91
<b>260</b>	145,10	1,73	78,00	9077,80	95,91	4,09
<b>270</b>	133,70	1,80	66,60	9144,40	96,61	3,39
<b>280</b>	120,60	1,87	53,50	9197,90	97,18	2,82
<b>290</b>	112,10	1,93	45,00	9242,90	97,65	2,35
<b>300</b>	105,80	2,00	38,70	9281,60	98,06	1,94
<b>310</b>	98,40	2,07	31,30	9312,90	98,39	1,61
<b>320</b>	95,70	2,13	28,60	9341,50	98,70	1,30
<b>330</b>	91,10	2,20	24,00	9365,50	98,95	1,05
<b>340</b>	88,60	2,27	21,50	9387,00	99,18	0,82
<b>350</b>	84,40	2,33	17,30	9404,30	99,36	0,64
<b>360</b>	81,60	2,40	14,50	9418,80	99,51	0,49
<b>370</b>	79,50	2,47	12,40	9431,20	99,64	0,36
<b>380</b>	78,60	2,53	11,50	9442,70	99,77	0,23
<b>390</b>	75,70	2,60	8,60	9451,30	99,86	0,14
<b>400</b>	74,20	2,67	7,10	9458,40	99,93	0,07
<b>410</b>	73,60	2,73	6,50	9464,90	100,00	0,00

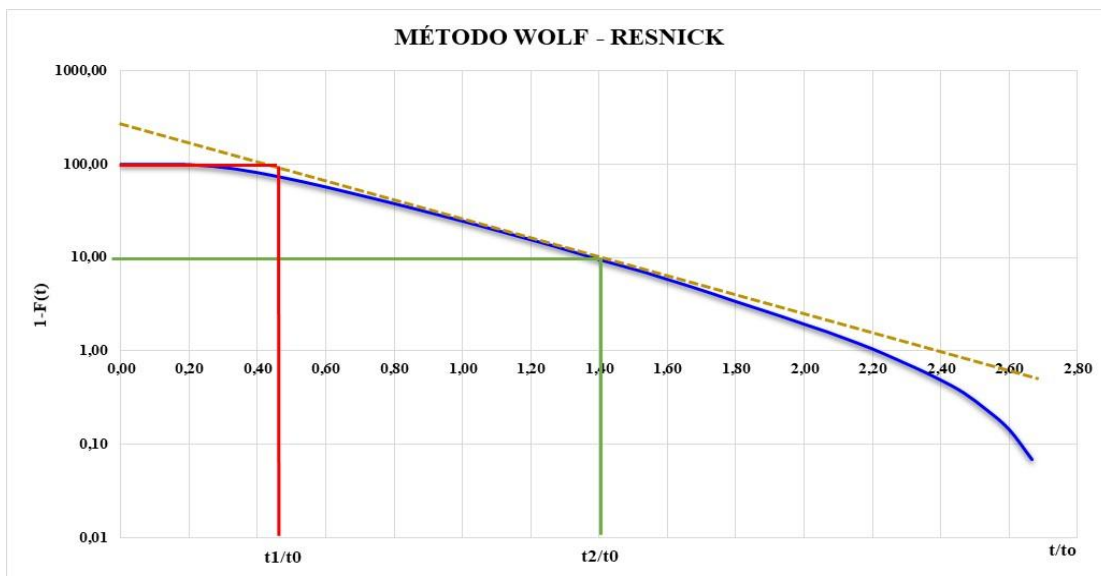
*Nota.* Resultados del ensayo de trazadores con NaCl aplicada al modelo con la Configuración de la Estructura Existente.

### 5.2.2 Método de Wolf-Resnick

Para llevar a cabo el análisis hidráulico según el método de Wolf – Resnick, se inició con el gráfico los datos de las columnas  $t/t_0$  Vs (1-ft) de la Tabla 21 en escala semilogarítmica. En la Figura 40, se traza la línea tangente a la curva, lo que permite determinar los valores de  $\theta$  (línea roja) y  $\tan \alpha$ .

**Figura 40**

*Método de Wolf – Resnick Configuración de la Estructura Existente*



*Nota.* Resultado del método de Wolf – Resnick

A continuación, se presenta la Tabla 22 con los resultados obtenidos a partir de los cálculos realizados de conocer  $\theta$  y  $\tan \alpha$ . La Tabla 22 incluye los valores correspondientes al flujo a pistón, flujo mezclado, espacios muertos, así como los valores de  $\theta$  y  $\tan \alpha$  derivados de los datos de la Figura 40.

**Tabla 24**

*Resultado Prueba Trazadores Configuración de la Estructura Existente*

Parámetro	Ecuación Matemática	Valor
-----------	---------------------	-------

---

	Se obtiene directamente al leer el punto donde	
Teta ( $\theta$ )	la línea tangente intercepta la línea horizontal en 100.	0.45
t1/to	Es el mismo valor de $\theta$ .	
	Se obtiene directamente al identificar el punto	
t2/to	en el que la línea tangente y la curva de la gráfica se cruzan con la línea horizontal en 10.	1.40
Tangente de alfa (Tan $\alpha$ )	$\text{Tan } \alpha = \frac{1}{\frac{t2}{t0} - \frac{t1}{t0}}$	1.053
Flujo a pistón (P)	$P = \frac{\theta * \tan \alpha}{0.435 + \theta * \tan \alpha}$	52 %
Flujo mezclado (M)	$M = 100 - P$	48 %
Zonas muertas (m)	$m = 1 - \frac{\theta}{P}$	14 %

---

*Nota.* Datos de resultado prueba trazadores configuración de la estructura existente

De los valores de la Tabla 22, indican que la Configuración de la Estructura Existente, presenta un **14%** de **espacios muertos**, lo que implica que una pequeña fracción del flujo no participa en la mezcla, aunque su diseño en compartimientos ayuda a minimizar este efecto; el **52%** del flujo se comporta como **flujo a pistón**, lo que indica que más de la mitad del fluido se mueve sin mezcla, requiriendo mayor agitación; el **48%** restante es **flujo mezclado**, garantizando una distribución uniforme y eficiente de las partículas dentro del sistema.

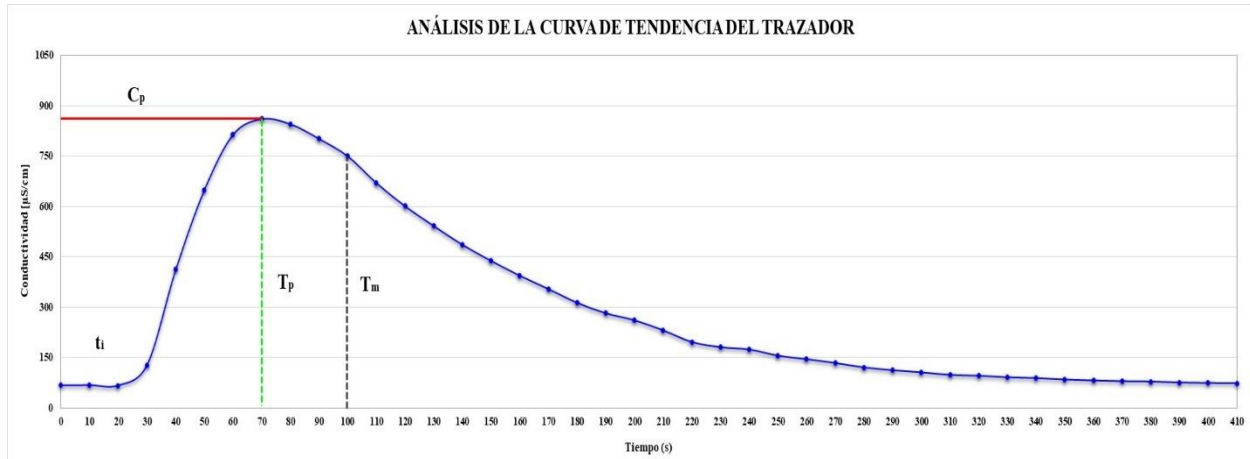
### 5.3 Análisis de la Curva de Tendencia del Trazador

A partir de los resultados de la Tabla 24, se generó la Figura 41, que muestra la relación entre el tiempo de la prueba (s) y la conductividad en la salida del sistema. De esta gráfica se

obtuvieron los valores presentados en la Tabla 23 los cuales, muestran el comportamiento del trazador a lo largo de la prueba dentro del sistema. A continuación, se detallan los principales resultados.

### Figura 41

#### *Análisis de la Curva de Tendencia del Trazador Configuración de la Estructura Existente*



*Nota.* Resultado de la curva de tendencia del trazador

### Tabla 25

#### *Resultados de la Curva de Tendencia Configuración de la Estructura Existente*

Parámetro	Valor
Conductividad pico (Cp.)	861 µS/cm
Tiempo de máxima Conductividad (tp)	70 segundos
Tiempo en que ha pasado el 50% del trazador (tm)	100 segundos
Tiempo de retención hidráulico teórico (to)	152.4 segundos
Tiempo de retención hidráulico experimental (te)	141,63 segundos
Tiempo de aparición del trazador (ti)	30 segundos

Tiempo que transcurre hasta que atraviesa la totalidad del trazador

370 segundos

(tf)

$t_p / t_o$  0.4593

$t_i / t_o$  0.1968

**Relación de Análisis**

$t_m / t_o$  0.6562

$$e = \frac{(tf - t_o) - (tp - ti)}{t_o} \quad 1.1653$$

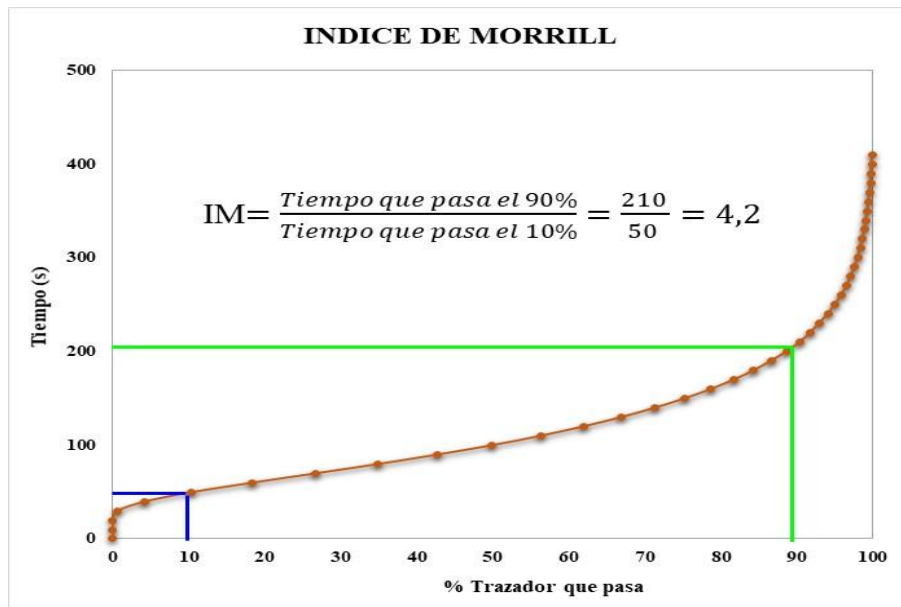
*Nota.* Resultado de la curva de tendencia del trazador existente.

**5.3.1 Índice de Morrill**

Los resultados en base al índice de Morrill comprueban la predominancia del flujo pistón en el floculador; el 10 % del trazador tarda en pasar la unidad 60,0 segundos y el 90 % pasa 150 segundos después (a los 210 segundos). La Figura 42 presenta el índice de Morrill.

**Figura 42**

*Índice de Morrill Configuración de la Estructura Existente*



*Nota.* Resultado del índice Morrill

#### 5.4 Prueba con Configuración de la Estructura Propuesta en el Proyecto

La Tabla 24 presenta los resultados del ensayo de trazadores con NaCl aplicada al modelo con la Configuración de la Estructura Propuesta en el Proyecto. La prueba se desarrolló con caudal de 0.128 L/s y volumen de 19,52 L, con tiempo de retención hidráulico de 153 s (2.54 minutos), el tiempo real obtenido en la prueba fue de 187,58 s (3.13 minutos).

**Tabla 26**

*Resultado Prueba Trazadores Configuración de la Estructura Propuesta en el Proyecto*

<b>t (s)</b>	<b>Conductividad (<math>\mu\text{S/cm}</math>)</b>	<b>t/to</b>	<b>C-Co</b>	<b>Sumatoria (C-Co)</b>	<b>F(t)</b>	<b>1-F(t)</b>
<b>0</b>	66,20	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
<b>10</b>	66,20	0,07	0,00	0,00	0,00	100,00
<b>20</b>	66,70	0,13	0,50	0,50	0,01	99,99
<b>30</b>	104,70	0,20	38,50	39,00	0,41	99,59
<b>40</b>	239,00	0,26	172,80	211,80	2,25	97,75
<b>50</b>	333,00	0,33	266,80	478,60	5,09	94,91
<b>60</b>	475,00	0,39	408,80	887,40	<b>9,44</b>	90,56
<b>70</b>	583,00	0,46	516,80	1404,20	14,93	85,07
<b>80</b>	646,00	0,52	579,80	1984,00	21,10	78,90
<b>90</b>	679,00	0,59	612,80	2596,80	27,62	72,38
<b>100</b>	685,00	0,65	618,80	3215,60	34,20	65,80
<b>110</b>	677,00	0,72	610,80	3826,40	40,70	59,30

<b>120</b>	656,00	0,78	589,80	4416,20	46,97	53,03
<b>130</b>	611,00	0,85	544,80	4961,00	<b>52,76</b>	47,24
<b>140</b>	574,00	0,92	507,80	5468,80	58,16	41,84
<b>150</b>	532,00	0,98	465,80	5934,60	63,12	36,88
<b>160</b>	486,00	1,05	419,80	6354,40	67,58	32,42
<b>170</b>	445,00	1,11	378,80	6733,20	71,61	28,39
<b>180</b>	405,00	1,18	338,80	7072,00	75,21	24,79
<b>190</b>	372,00	1,24	305,80	7377,80	78,47	21,53
<b>200</b>	337,00	1,31	270,80	7648,60	81,35	18,65
<b>210</b>	299,00	1,37	232,80	7881,40	83,82	16,18
<b>220</b>	274,00	1,44	207,80	8089,20	86,03	13,97
<b>230</b>	249,00	1,50	182,80	8272,00	87,98	12,02
<b>240</b>	225,00	1,57	158,80	8430,80	<b>89,67</b>	10,33
<b>250</b>	204,20	1,63	138,00	8568,80	91,13	8,87
<b>260</b>	183,40	1,70	117,20	8686,00	92,38	7,62
<b>270</b>	169,30	1,76	103,10	8789,10	93,48	6,52
<b>280</b>	155,80	1,83	89,60	8878,70	94,43	5,57
<b>290</b>	142,10	1,90	75,90	8954,60	95,24	4,76
<b>300</b>	130,10	1,96	63,90	9018,50	95,92	4,08
<b>310</b>	121,60	2,03	55,40	9073,90	96,51	3,49
<b>320</b>	115,10	2,09	48,90	9122,80	97,03	2,97
<b>330</b>	108,60	2,16	42,40	9165,20	97,48	2,52
<b>340</b>	100,80	2,22	34,60	9199,80	97,84	2,16

---

<b>350</b>	98,30	2,29	32,10	9231,90	98,19	1,81
<b>360</b>	91,00	2,35	24,80	9256,70	98,45	1,55
<b>370</b>	88,30	2,42	22,10	9278,80	98,68	1,32
<b>380</b>	85,10	2,48	18,90	9297,70	98,89	1,11
<b>390</b>	81,20	2,55	15,00	9312,70	99,04	0,96
<b>400</b>	80,00	2,61	13,80	9326,50	99,19	0,81
<b>410</b>	78,90	2,68	12,70	9339,20	99,33	0,67
<b>420</b>	77,60	2,75	11,40	9350,60	99,45	0,55
<b>430</b>	75,40	2,81	9,20	9359,80	99,55	0,45
<b>440</b>	74,60	2,88	8,40	9368,20	99,64	0,36
<b>450</b>	72,20	2,94	6,00	9374,20	99,70	0,30
<b>460</b>	70,90	3,01	4,70	9378,90	99,75	0,25
<b>470</b>	69,90	3,07	3,70	9382,60	99,79	0,21
<b>480</b>	70,70	3,14	4,50	9387,10	99,84	0,16
<b>490</b>	69,70	3,20	3,50	9390,60	99,87	0,13
<b>500</b>	69,10	3,27	2,90	9393,50	99,90	0,10
<b>510</b>	68,90	3,33	2,70	9396,20	99,93	0,07
<b>520</b>	67,90	3,40	1,70	9397,90	99,95	0,05
<b>530</b>	67,50	3,46	1,30	9399,20	99,96	0,04
<b>540</b>	67,40	3,53	1,20	9400,40	99,98	0,02
<b>550</b>	67,10	3,59	0,90	9401,30	99,99	0,01
<b>560</b>	66,90	3,66	0,70	9402,00	99,99	0,01
<b>570</b>	66,70	3,73	0,50	9402,50	100,00	0,00

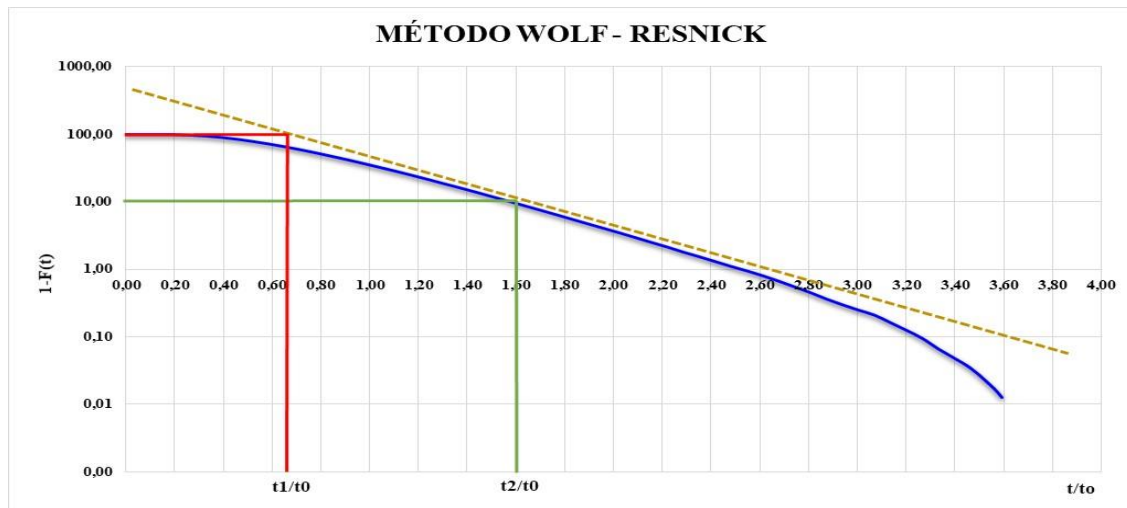
---

### 5.4.1 Método de Wolf-Resnick

En este segundo ejercicio también se graficó los datos de las columnas  $t/t_0$  Vs (1-ft) de la Tabla 24 en escala semilogarítmica. En la Figura 43, se traza la línea tangente a la curva, lo que permite determinar los valores de  $\theta$  (línea roja) y  $\tan \alpha$ .

**Figura 43**

*Método de Wolf – Resnick Configuración de la Estructura Propuesta en el Proyecto*



*Nota.* En la figura se encuentran la determinación de valores de  $\theta$  (línea roja) y  $\tan \alpha$

A continuación, se presenta la Tabla 25 con los resultados obtenidos a partir de los cálculos realizados de conocer  $\theta$  y  $\tan \alpha$ . La Tabla 25 incluye los valores correspondientes al flujo a pistón, flujo mezclado, espacios muertos, así como los valores de  $\theta$  y  $\tan \alpha$  derivados de los datos de la Figura 43.

**Tabla 27**

*Resultado Prueba Trazadores Configuración de la Estructura Propuesta en el Proyecto*

Parámetro	Ecuación Matemática	Valor
Teta ( $\theta$ )	Se obtiene directamente al leer el punto donde la línea tangente intercepta la línea horizontal en 100.	0.62

t1/to	Es el mismo valor de $\theta$ .	
t2/to	Se obtiene directamente al identificar el punto en el que la línea tangente y la curva de la gráfica se cruzan con la línea horizontal en 10.	1.60
Tangente de alfa (Tan $\alpha$ )	$\tan \alpha = \frac{1}{\frac{t2}{to} - \frac{t1}{to}}$	1.020
Flujo a pistón (P)	$P = \frac{\theta * \tan \alpha}{0.435 + \theta * \tan \alpha}$	59 %
Flujo mezclado (M)	$M = 100 - P$	41 %
Zonas muertas (m)	$m = 1 - \frac{\theta}{P}$	-5%

*Nota.* Resultados de la propuesta.

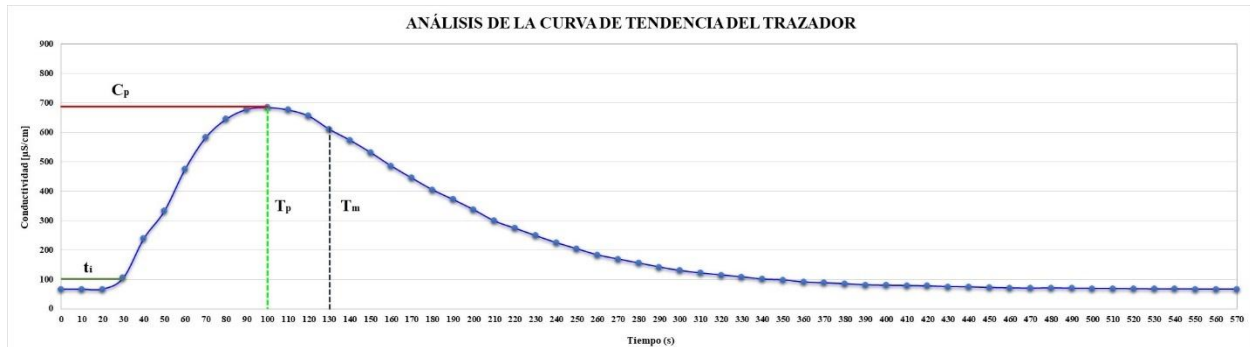
Los valores de la Tabla 25, muestran que el modelo con la Configuración de la Estructura Propuesta en el Proyecto no presenta espacios muertos, el resultado obtenido es un valor negativo, indicando que la presencia de **espacios muertos** es **0,0%**; el **59%** del flujo se comporta como **flujo a pistón**, esto es que más de la mitad del fluido se mueve sin mezcla, requiriendo mayor agitación; el **41%** restante es **flujo mezclado**, garantizando una distribución uniforme y eficiente de las partículas dentro del sistema.

### 5.5 Análisis de la Curva de Tendencia del Trazador

A partir de los resultados de la Tabla 24, se generó la Figura 44, que muestra la relación entre el tiempo de la prueba (s) y la conductividad en la salida del sistema. De esta gráfica se obtuvieron los valores presentados en la Tabla 26 los cuales, muestran el comportamiento del trazador a lo largo de la prueba dentro del sistema. A continuación, se detallan los principales resultados.

**Figura 44**

*Análisis de la Curva de Tendencia del Trazador Configuración de la Estructura Propuesta en el Proyecto*



*Nota.* Resultados de la curva de tendencia del trazador configuración de la estructura propuesta

**Tabla 28**

*Resultados de la Curva de Tendencia Configuración de la Estructura Propuesta en el Proyecto*

Parámetro	Valor	
Conductividad pico (Cp.)	685 µS/cm	
Tiempo máxima conductividad (tp)	100 segundos	
Tiempo en que ha pasado el 50% del trazador (tm)	130 segundos	
Tiempo de retención hidráulico teórico (to)	152.4 segundos	
Tiempo de retención hidráulico experimental (to)	187,58 segundos	
Tiempo de aparición del trazador (ti)	30 segundos	
Tiempo que transcurre hasta que atraviesa la totalidad del trazador (tf)	440 segundos	
	tp / to	0.6562
Relación de Análisis	ti / to	0.1968
	tm / to	0.8530

$$e = \frac{(tf - to) - (tp - ti)}{to} \quad 1.4278$$

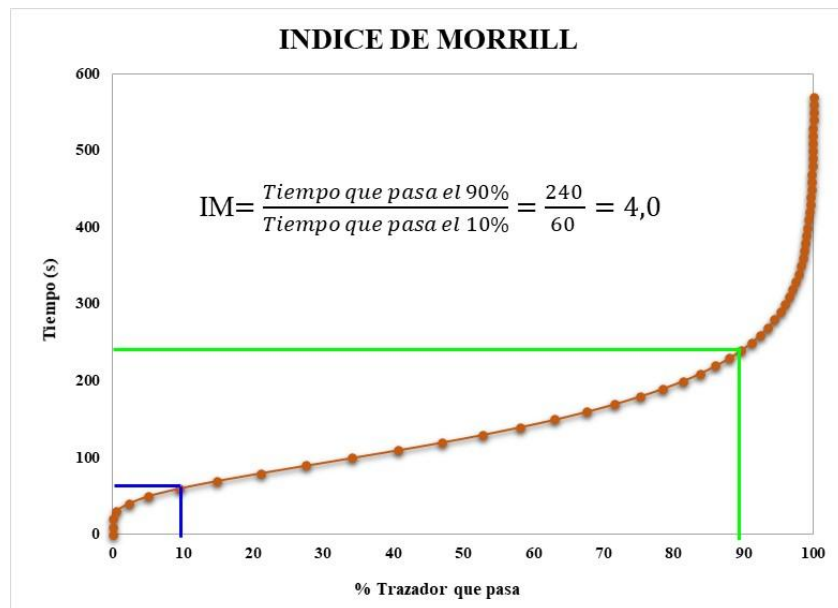
*Nota.* Resultados de la curva de tendencia del trazador configuración de la estructura propuesta.

### 5.5.1 Índice de Morrill

Los resultados en base al índice de Morrill comprueban la predominancia del flujo pistón en el floculador; el 10 % del trazador tarda en pasar la unidad 60 segundos y el 90 % pasa 180 segundos después (a los 240 segundos). La Figura 45 presenta el Índice de Morrill.

**Figura 45**

*Índice de Morrill Configuración de la Estructura Propuesta en el Proyecto*



*Nota.* Resultado del índice Morrill para la propuesta

Prueba de eficiencia: Durante las pruebas realizadas con cada uno de los juegos de paletas propuestos en el proyecto, se observó que, a mayor número de paletas, mayor es la cantidad de remolinos formados en toda la masa de agua en agitación; los resultados obtenidos indican que, a mayor número de paletas, mayor es la eficiencia en la remoción de turbiedad y color del agua

coagulada. En las Tablas 27 a la 32 se observa los resultados obtenidos para cada uno de los juegos de paletas propuesto en el proyecto.

**Tabla 29**

*Resultados Prueba Eficiencia - 2 Aspas, 1 Paleta / Aspa (2 Paletas / Eje)*

<b>Prueba</b>	<b>2 Aspas, 1 Paleta / Aspa (2 Paletas / Eje)</b>		
Gradientes ( $S^{-1}$ )	40,45 - 33,11 - 19,99 - 14,31		
Velocidad Angular (RPM)	8,2 - 7,1 - 5,1 - 4,1		
<b>Parámetro</b>	<b>Coagulada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Eficiencia</b>
Turbiedad (NTU)	22,5	17,9	<b>20%</b>
Color (UPC)	191	189	<b>1%</b>
pH (Unidades)	7,05	6,36	-
Conductividad ( $\mu S/cm$ )	67,3	68,4	-
Temperatura ( $^{\circ}C$ )	21	-	-

*Nota.* Resultados de la prueba de eficiencia llevada a cabo.

**Tabla 30**

*Resultados Prueba Eficiencia - 2 Aspas, 2 Paletas / Aspa (4 Paletas / Eje)*

<b>Prueba</b>	<b>2 Aspas, 2 Paletas / Aspa (4 Paletas / Eje)</b>		
Gradientes ( $S^{-1}$ )	40,45 - 33,11 - 19,99 - 14,31		
Velocidad Angular (RPM)	8,9 - 7,8 - 5,9 - 4,5		
<b>Parámetro</b>	<b>Coagulada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Eficiencia</b>
Turbiedad (NTU)	21,1	16,7	<b>21%</b>
Color (UPC)	202	148	<b>27%</b>
pH (Unidades)	6,77	6,93	-

Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	69,3	69,4	-
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	22	-	-

*Nota.* Resultados de la prueba de eficiencia llevada a cabo.

**Tabla 31**

*Resultados Prueba Eficiencia - 2 Aspas, 3 Paletas / Aspa (6 Paletas / Eje)*

<b>Prueba</b>	<b>2 Aspas, 3 Paletas / Aspa (6 Paletas / Eje)</b>		
Gradientes ( $\text{S}^{-1}$ )	40,45 - 33,11 - 19,99 - 14,31		
Velocidad Angular (RPM)	9,7 - 8,5 - 6,1 - 4,9		
<b>Parámetro</b>	<b>Coagulada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Eficiencia</b>
Turbiedad (NTU)	24,3	17,5	<b>28%</b>
Color (UPC)	198	165	<b>17%</b>
pH (Unidades)	7,15	7,15	-
Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	68,6	67,8	-
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	22	-	-

*Nota.* Resultados de la prueba de eficiencia llevada a cabo.

**Tabla 32**

*Resultados Prueba Eficiencia - 4 Aspas, 1 Paleta / Aspa (4 Paletas / Eje)*

<b>Prueba</b>	<b>4 Aspas, 1 Paleta / Aspa (4 Paletas / Eje)</b>		
Gradientes ( $\text{S}^{-1}$ )	40,45 - 33,11 - 19,99 - 14,31		
Velocidad Angular (RPM)	7,5 - 6,5 - 4,7 - 3,7		
<b>Parámetro</b>	<b>Coagulada</b>	<b>sedimentada</b>	<b>Eficiencia</b>
Turbiedad (NTU)	22,5	15,2	<b>32%</b>

Color (UPC)	175	141	<b>19%</b>
pH (Unidades)	6,87	6,93	-
Conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ )	67,6	68,9	-
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	22	-	-

*Nota.* Resultados de la prueba de eficiencia llevada a cabo.

**Tabla 33**

*Resultados Prueba Eficiencia - 4 Aspas, 2 Paletas / Aspa (8 Paletas / Eje)*

<b>Prueba</b>	<b>4 Aspas, 2 Paletas / Aspa (8 Paletas / Eje)</b>		
Gradientes ( $\text{S}^{-1}$ )	40,45 - 33,11 - 19,99 - 14,31		
Velocidad Angular (RPM)	8,3 - 7,3 - 5,2 - 4,2		
<b>Parámetro</b>	<b>Coagulada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Eficiencia</b>
Turbiedad (NTU)	20,6	15,3	<b>26%</b>
Color (UPC)	163	143	<b>12%</b>
pH (Unidades)	6,95	7,06	-
Conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ )	68,1	69,3	-
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	22	-	-

*Nota.* Resultados de la prueba de eficiencia llevada a cabo.

**Tabla 34**

*Resultados Prueba Eficiencia - 4 Aspas, 3 Paletas / Aspa (12 Paletas / Eje)*

<b>Prueba</b>	<b>4 Aspas, 3 Paletas / Aspa (12 Paletas / Eje)</b>		
Gradientes ( $\text{S}^{-1}$ )	40,45 - 33,11 - 19,99 - 14,31		
Velocidad Angular (RPM)	9,2 - 8,0 - 5,7 - 4,6		
<b>Parámetro</b>	<b>Coagulada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Eficiencia</b>

Turbiedad (NTU)	31,2	15,5	<b>50%</b>
Color (UPC)	229	153	<b>33%</b>
pH (Unidades)	7,11	7,17	-
Conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ )	69,3	69,4	-
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	23	-	-

*Nota.* Resultados de la prueba de eficiencia llevada a cabo.

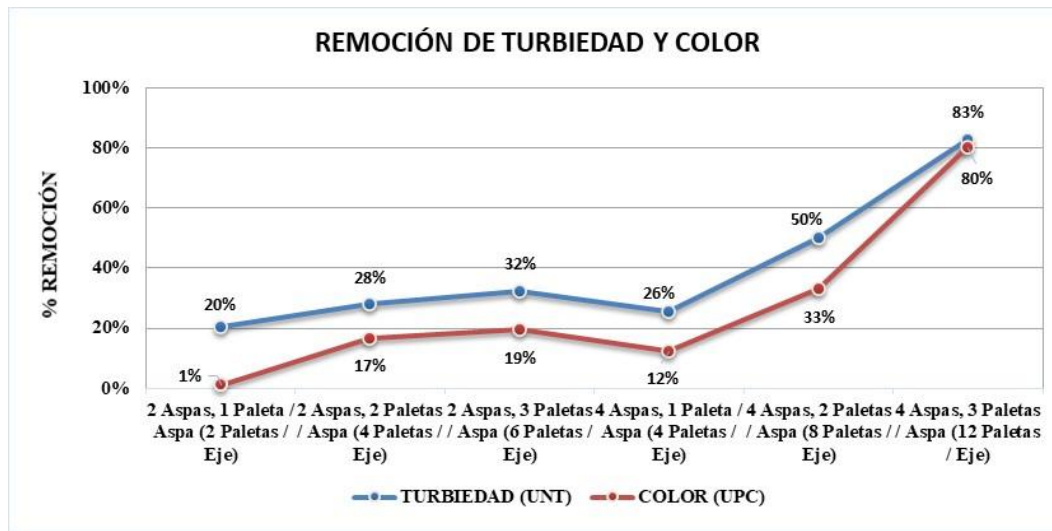
La Tabla 34 y Figura 46 presentan el resumen de la prueba de eficiencia realizada con cada una de las configuraciones de paletas propuestas en el proyecto

**Tabla 35**

*Resumen Resultados Prueba de Eficiencia*

<b>Prueba</b>	<b>% Remoción</b>	
	<b>Turbiedad (UNT)</b>	<b>Color (UPC)</b>
2 Aspas, 1 Paleta / Aspa (2 Paletas / Eje)	21%	27%
2 Aspas, 2 Paletas / Aspa (4 Paletas / Eje)	28%	17%
2 Aspas, 3 Paletas / Aspa (6 Paletas / Eje)	32%	19%
4 Aspas, 1 Paleta / Aspa (4 Paletas / Eje)	26%	12%
4 Aspas, 2 Paletas / Aspa (8 Paletas / Eje)	50%	33%
4 Aspas, 3 Paletas / Aspa (12 Paletas / Eje)	83%	80%

*Nota.* Resultados de la prueba de eficiencia llevada a cabo.

**Figura 46***Resumen Pruebas de Eficiencia*

*Nota.* Resultados resumen de la prueba.

Definido que la mayor eficiencia de remoción de turbiedad y color se obtiene con la configuración de 3 Paletas / Aspa esto es 12 Paletas / Eje, se procedió a realizar pruebas adicionales con esta misma configuración variando los gradientes de mezcla para los diferentes valores de turbiedad presentados, con el fin, de determinar si el mayor contacto entre partículas promovido por el mayor número de remolinos formados, ejerce efectos positivos o adversos en la formación del floc y posterior precipitación en el proceso de sedimentación. En las Tablas 34 a la 39 se presenta los resultados de las pruebas de las cuales, se obtiene que a mayor turbiedad se requiere menor gradiente de velocidad y a menor turbiedad es necesario incrementar la agitación del agua; en ambos casos, se obtuvo alta remoción de turbiedad y color, ejercidos por el incremento de choque entre partículas lo cual, permitió mayor formación de floc y mejor remoción de turbiedad y color del agua.

## 5.5.2 Pruebas con Valores Altos de Turbiedad y Color

**Tabla 36***Resultados Prueba Eficiencia – Gradientes 40,45 - 33,11 - 19,99 - 14,31 S<sup>-1</sup>*

<b>Prueba</b>	<b>4 Aspas, 3 Paletas / Aspa (12 Paletas / Eje)</b>		
Gradientes (S <sup>-1</sup> )	40,45 - 33,11 - 19,99 - 14,31		
Velocidad Angular (RPM)	9,2 - 8,0 - 5,7 - 4,6		
<b>Parámetro</b>	<b>Coagulada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Eficiencia</b>
Turbiedad (NTU)	105	18	<b>83%</b>
Color (UPC)	680	135	<b>80%</b>
pH (Unidades)	7,15	6,95	-
Conductividad (μS/cm)	69	75	-
Temperatura (°C)	20	-	-

*Nota.* Resultado de la prueba de eficiencia**Tabla 37***Resultados Prueba Eficiencia – Gradientes 33,11 - 19,99 - 14,31 - 10,00 S<sup>-1</sup>*

<b>Prueba</b>	<b>4 Aspas, 3 Paletas / Aspa (12 Paletas / Eje)</b>		
Gradientes (S <sup>-1</sup> )	33,11 - 19,99 - 14,31 - 10,00		
Velocidad Angular (RPM)	8,0 - 5,7 - 4,6 - 3,6		
<b>Parámetro</b>	<b>Coagulada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Eficiencia</b>
Turbiedad (NTU)	115	21	<b>82%</b>
Color (UPC)	686	160	<b>77%</b>
pH (Unidades)	7,12	6,95	-
Conductividad (μS/cm)	68,5	69,3	-

Temperatura (°C)	19	-	-
------------------	----	---	---

*Nota.* Resultado de la prueba de eficiencia

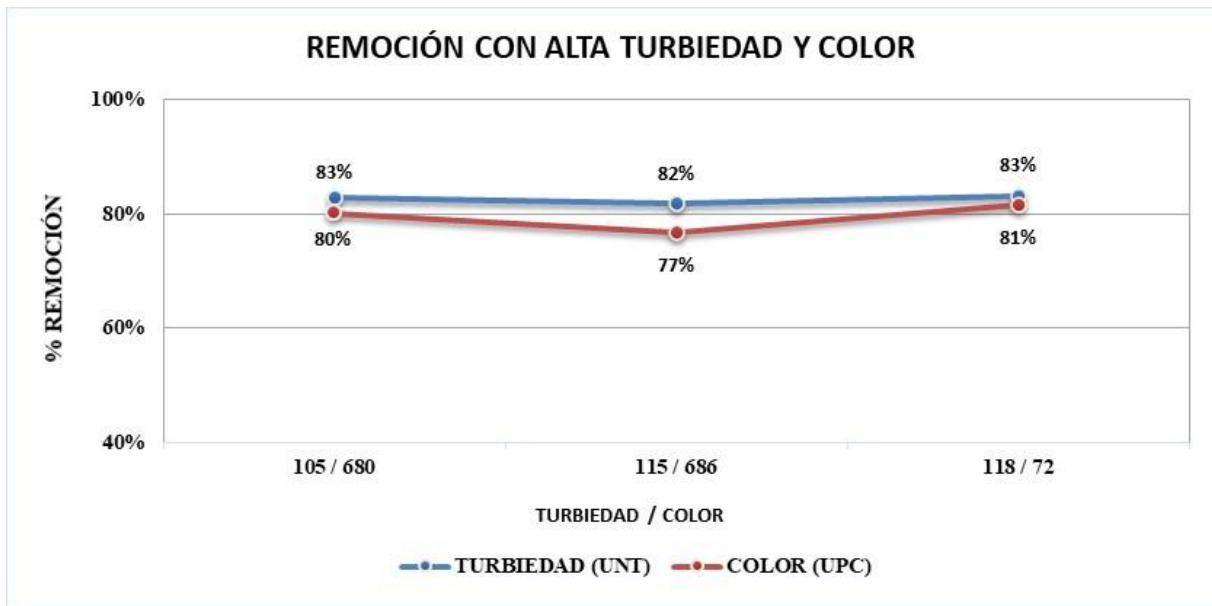
### Tabla 38

*Resultados Prueba Eficiencia – Gradientes 19,99 - 14,31 - 10,00 - 6,00 S<sup>-1</sup>*

<b>Prueba</b>	<b>4 Aspas, 3 Paletas / Aspa (12 Paletas / Eje)</b>		
Gradientes (S <sup>-1</sup> )	19,99 - 14,31 - 10,00 - 6,00		
Velocidad Angular (RPM)	5,7 - 4,6 - 3,6 - 2,6		
<b>Parámetro</b>	<b>Coagulada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Eficiencia</b>
Turbiedad (NTU)	118	20	<b>83%</b>
Color (UPC)	702	130	<b>81%</b>
pH (Unidades)	7,9	6,95	-
Conductividad (µS/cm)	69,2	75	-
Temperatura (°C)	19	-	-

*Nota.* Resultado de la prueba de eficiencia

La Figura 47 presenta el resumen de los resultados de las pruebas realizadas con valores **altos** de turbiedad y color.

**Figura 47***Resumen Pruebas de Eficiencia con Alta Turbiedad y Color*

*Nota.* Resultado de la prueba de eficiencia

### 5.5.3 Pruebas con Valores Bajos de Turbiedad y Color

**Tabla 39**

*Resultados Prueba Eficiencia – Gradientes 40,45 - 33,11 - 19,99 - 14,31 S<sup>-1</sup>*

Prueba	4 Aspas, 3 Paletas / Aspa (12 Paletas / Eje)		
Gradientes (S <sup>-1</sup> )	40,45 - 33,11 - 19,99 - 14,31		
Velocidad Angular (RPM)	9,2 - 8,0 - 5,7 - 4,6		
Parámetro	Coagulada	Sedimentada	Eficiencia
Turbiedad (NTU)	20	16	<b>20%</b>
Color (UPC)	148	120	<b>19%</b>
pH (Unidades)	6,8	6,9	-

Conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ )	67,5	68,6	-
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	20	-	-

*Nota.* Resultado de la prueba de eficiencia

**Tabla 40**

*Resultados Prueba Eficiencia – Gradientes 50 - 40 - 20 - 10 S<sup>-1</sup>*

<b>Prueba</b>	<b>4 Aspas, 3 Paletas / Aspa (12 Paletas / Eje)</b>		
Gradientes ( $\text{S}^{-1}$ )	50 - 40 - 20 - 10		
Velocidad Angular (RPM)	10,55 - 9,10 - 5,73 - 3,61		
<b>Parámetro</b>	<b>Coagulada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Eficiencia</b>
Turbiedad (NTU)	22	12,5	<b>43%</b>
Color (UPC)	150	92	<b>39%</b>
pH (Unidades)	6,88	6,85	-
Conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ )	67,9	68,4	-
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	21	-	-

*Nota.* Resultado de la prueba de eficiencia

**Tabla 41**

*Resultados Prueba Eficiencia – Gradientes 60 - 40 - 20 - 10S<sup>-1</sup>*

<b>Prueba</b>	<b>4 Aspas, 3 Paletas / Aspa (12 Paletas / Eje)</b>		
Gradientes ( $\text{S}^{-1}$ )	60 - 40 - 20 - 10		
Velocidad Angular (RPM)	11,92 - 9,10 - 5,73 - 3,61		
<b>Parámetro</b>	<b>Coagulada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Eficiencia</b>
Turbiedad (NTU)	21	9,6	<b>54%</b>
Color (UPC)	149	70,3	<b>53%</b>

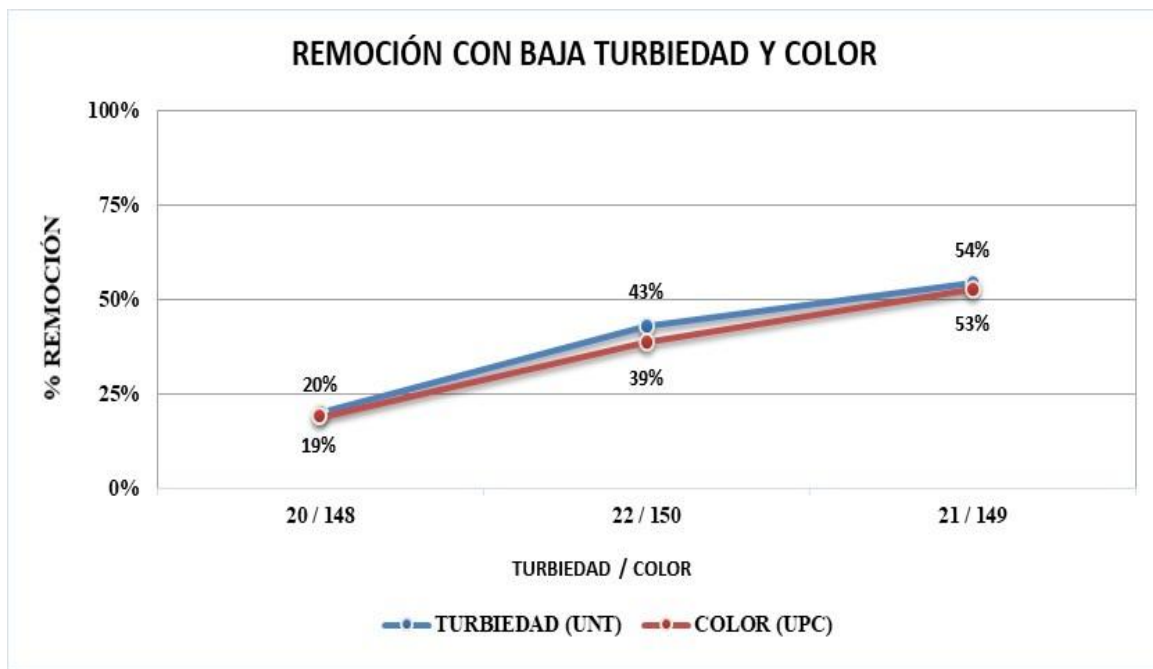
pH (Unidades)	6,9	6,95	-
Conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ )	66,2	67	-
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	20	-	-

*Nota.* Resultado de la prueba de eficiencia

La Figura 48 presenta el resumen de los resultados de las pruebas realizadas con valores **bajos** de turbiedad y color.

### Figura 48

*Resumen Pruebas de Eficiencia con Baja Turbiedad y Color*



*Nota.* Resultado de la prueba de eficiencia

Costos Operativos: Con las pruebas de eficiencia realizadas se evidencia la posibilidad de aplicar igual dosis de coagulantes tanto en la sección nueva como en la antigua, lo cual, permite la reducción del costo operativo por consumo de insumos químicos en \$ 69'444.983 por año aproximadamente; las dosis aplicadas de sulfato de aluminio tipo B líquido y policloruro de aluminio en la sección antigua de la planta, se reducen 3,83 mg/L y 4,09 mg/L respectivamente,

generando alto beneficio económico para el amb S.A. E.S.P. En la Tabla 40 se presenta el resumen de los costos por aplicación de insumos químicos. (Ver apéndice A)

**Tabla 42**

*Gasto por Exceso en Aplicación de Insumos Químico*

<b>Costos por aplicación de insumos químicos</b>		
<b>Sulfato de Aluminio tipo B Líquido</b>		
Dosis de Exceso Aplicada	3,83	mg/L
	0,00383	Kg/m <sup>3</sup>
Caudal Tratado	245	L/s
	7.718.436	m <sup>3</sup> /año
Cantidad Total Aplicada	29.575	Kg/año
Precio de Compra	728	\$/Kg
<b>Costo Total Exceso Aplicado</b>	<b>\$ 21.530.951</b>	<b>\$/año</b>
<b>Policloruro de Aluminio</b>		
Dosis de Exceso Aplicada	4,09	mg/L
	0,00409	Kg/m <sup>3</sup>
Caudal Tratado	245	L/s
	7.718.436	m <sup>3</sup> /año
Cantidad Total Aplicada	31.564	Kg/año
Precio de Compra	1.518	\$/Kg
<b>Costo Total Exceso Aplicado</b>	<b>\$ 47.914.033</b>	<b>\$/año</b>
<b>Costo Total por Aplicación de Insumos Químicos (Excesos)</b>		

<b>Gasto Exceso en Aplicación de Insumos</b>		
<b>Químicos</b>	\$	<b>69.444.984</b> \$/año

*Nota.* Resultado de los costos operativos

Así mismo, se estimó el costo de la implementación del nuevo sistema tomando como base el proyecto de renovación del sistema de floculación mecánica de eje vertical realizado en una de las plantas del amb entre los meses de enero y mayo de 2025, el cual, consistió en la actualización tecnológica de motorreductores y del sistema de agitación con la misma configuración evaluado en este proyecto (12 paletas por eje); el valor del proyecto implementar el sistema propuesto en este proyecto en la Planta Floridablanca del amb S.A. E.S.P. es \$274.546.114 aproximadamente. En la Tabla 43 se presenta la estimación de este valor:

**Tabla 43**

*Costos Estimado del Proyecto*

<b>Costos proyecto de actualización tecnológica sistema de floculación mecánica de eje vertical PTAP amb S.A. E.S.P.</b>		
Objeto	Realizar el suministro e instalación de 16 unidades de floculación en planta de tratamiento Bosconia del amb S.A. ESP. POIR 54	
Año Ejecución		2025
Valor	\$	1.372.730.571
Caudal Planta (L/s)		2.000
Valor en \$ por L/s	\$	686.365
<b>Costo implementación sistema floculación planta Floridablanca</b>		
Caudal Planta Florida (Sección Antigua) (L/s)		400

<b>Costo Estimado del</b>	<b>\$</b>	<b>274.546.114</b>
<b>Proyecto (\$)</b>		

*Nota.* Resultado de los costos de la actualización tecnológica.

Respecto del consumo de energía se obtuvo, que el sistema de floculación recíprocante existente consume 29.529 kWh-año equivalente a \$ 23'662.800 anual, el consumo del sistema de floculación propuesto será de 55.714 kWh-año equivalente a \$ 44'570.880 anual. Lo anterior, representa un incremento del 47% en el consumo de energía.

**Tabla 44**

*Reducción Costos por Consumo de Energía*

<b>Costos por consumo de energía</b>			
Consumo Energía Sistema Actual	81	kWh/día	
	29.529	Kwh-año	
Consumo Energía Sistema Nuevo	76	kWh/día	
	55.714	Kwh-año	
Diferencia Consumo Energía Sistemas Actual Vs Nuevo	-26.185	Kwh-año	
Valor Energía	\$	800	\$/Kw
Costo Consumo Energía			
Sistema Actual	\$	23.622.800	\$/año
Sistema Propuesto	\$	44.570.880	\$/año
Diferencia Gasto por Consumo de Energía	-\$	20.948.080	\$/año

*Nota.* Resultado de los costos de consumo de energía.

El balance de los costos operativos por consumo de insumos químicos y de energía indican que la inversión realizada se recupera en el término 9,63 años, considerando un valor estimado

suministrado por el área de mantenimiento del amb S.A. E.S.P. de \$ 20'000.000 por año para el mantenimiento de todo el sistema. En la Tabla 43 se presenta el tiempo de recuperación de la inversión.

**Tabla 45***Recuperación de la Inversión*

<b>Recuperación de la inversión</b>		
Reducción Gasto por Aplicación de Insumos Químicos (\$/año)	\$	69.444.984
Incremento Gasto por Consumo de Energía (Kwh - año)	-\$	20.948.080
Reducción Costos Operativos (\$/año)	\$	48.496.904
Costos por Mantenimiento (\$/año)	-\$	20.000.000
<b>Reducción Total Costos Operativos (\$/año)</b>	<b>\$</b>	<b>28.496.904</b>
Costo Estimado del Proyecto (\$)	\$	274.546.114
<b>Recuperación de la Inversión (Años)</b>		<b>9,63</b>
<b>Recuperación de la Inversión (Mes)</b>		<b>115,61</b>

*Nota.* Resultado de la recuperación de la inversión en años y meses.

Cálculos hidráulicos para sistema de floculación propuesto: La Tabla 44 presenta el dimensionamiento de la estructura actual en la planta Florida y la Tabla 45 el dimensionamiento para la mitad del floculador (50%) para efectos de calcular las dimensiones de las paletas y capacidad de los motores de una sección.

**Tabla****46***Dimensionamiento del Tanque de Floculación*

<b>Descripción</b>	<b>Compartimento</b>
--------------------	----------------------

	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Dimensionamiento de compartimentos</b>				
Largo Útil (m)	4,0	4,0	4,0	4,0
Ancho Útil (m)	6,0	6,0	6,0	6,0
Profundidad Útil (m)	3,1	3,1	3,1	3,1
<b>Condiciones hidráulicas</b>				
Caudal (Q) (m <sup>3</sup> /s)		0,40		
Tiempo Retención (Tr) (s)		756,8		
Volumen Útil (V) (m <sup>3</sup> )	76	76	76	76
<b>Agitación</b>				
Gradiente Máximo (s <sup>-1</sup> )	40,45	33,11	19,99	14,31

*Nota.* Estructura Actual de Floculación Mecánica Planta Florida

**Tabla 47**

*Dimensionamiento Para una Línea de Agitación del 50%*

<b>Descripción</b>	<b>Compartimento</b>			
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Dimensionamiento de compartimentos</b>				
Largo (m)	4,0	4,0	4,0	4,0
Ancho (m) (Se usa el 50% por juego de paletas)	3,0	3,0	3,0	3,0
Profundidad Útil (m)	3,1	3,1	3,1	3,1
<b>Condiciones hidráulicas</b>				
Caudal (Q) (cm <sup>3</sup> /s) (Se asume el 50% por juego de paletas)		0,20		
Tiempo Retención (Tr) (s)		756,8		

Volumen Útil (V) (m <sup>3</sup> )	38	38	38	38
<b>Agitación</b>				
Gradiente Máximo (s <sup>-1</sup> )	40,45	33,11	19,99	14,31
Gradiente Medio (s <sup>-1</sup> )	33,11	19,99	14,31	10,00
Gradiente Mínimo (s <sup>-1</sup> )	19,99	14,31	10,00	6,00

*Nota. Dimensionamiento para una Línea de Agitación*

La Tabla 46 presenta los criterios de diseño que de acuerdo con las recomendaciones de la Resolución 330 de 2017 – RAS, se consideraron en los cálculos hidráulicos para el sistema de floculación seleccionado, así mismo, presenta los cálculos hidráulicos realizados para el sistema de floculación seleccionado para el sistema de floculación mecánica propuesto para la Sección Antigua de la Planta Floridablanca del amb S.A. E.S.P.

**Tabla 48**

*Cálculos Hidráulicos Sistema Propuesto*

Descripción	Compartimento			
	1	2	3	4
<b>Criterios de diseño RAS título C - ficha C.F.2</b>				
Área transversal de giro (m <sup>2</sup> )		9,4		
Área mínima de las paletas (m <sup>2</sup> ) - (RAS Título C - Ficha C.F.2: 15% - 20%) - Transversal al área de giro		20%		
Área mínima de las paletas (m <sup>2</sup> )		1,9		
Espacio libre entre lámina de agua-paletas, muros-paletas y fondo del tanque-paletas (RAS Título C - Ficha C.F.2: 15 - 30 cm)		0,30		
Separación entre paletas (cm)		0,30		

Ancho libre para paletas (cm)	2,4				
Profundidad Útil para paletas (cm)	2,5				
<b>Calculo hidráulico para 3 paletas / ASPA (12 paletas / eje)</b>					
Área mínima de las paletas (m <sup>2</sup> )	1,9				
Número de paletas seleccionadas (Und)	12				
Número de aspas seleccionadas / eje (Und)	4				
Largo máximo de las Paletas (L) (m)	2,52				
Ancho de las Paletas (b) (m)	0,06				
Radio Eje-primera paleta (r <sub>1</sub> ) (m)	1,17				
Radio Eje-segunda paleta (r <sub>2</sub> ) (m)	0,81				
Radio Eje-segunda paleta (r <sub>3</sub> ) (m)	0,45				
Sumatoria <b>áreas</b> x radios Eje-paletas al cubo ( $\sum A * r^3$ ) (cm <sup>2</sup> )	1,38				
Velocidad angular/rotación por Compartimento (n) (RPM)		10,67	9,33	6,67	5,34
(Gradiente Máximo – Máx.)	$n_{M\acute{a}x} = \left( \frac{\mu * V * G^2}{8000 * (\sum A * r^3)} \right)^{1/3}$				
$\mu$ : <b>Viscosidad</b> dinámica del agua a 20°C = 1.002 x 10 <sup>-3</sup> Pa·s					
Velocidad angular/rotación por Compartimento (n) (RPM)		9,33	6,67	5,34	4,20
(Gradiente Medio – Med.)	$n_{Med} = \left( \frac{G_{Med}}{G_{M\acute{a}x}} \right)^{\frac{2}{3}} * n_{M\acute{a}x}$				
Velocidad angular/rotación por Compartimento (n) (RPM)		6,67	5,34	4,20	2,99
(Gradiente Mínimo – Min.)	$n_{Min} = \left( \frac{G_{Min}}{G_{M\acute{a}x}} \right)^{\frac{2}{3}} * n_{M\acute{a}x}$				

---

Potencia del motor (P) (HP)	$P = \frac{(\mu * V * G^2)}{75} * FS$	2,07	1,39	0,51	0,26
-----------------------------	---------------------------------------	------	------	------	------

FS: Factor de Seguridad; 2,5 Recomendado, Jorge Arturo Pérez

(1997)

---

*Nota.* Resultados de los cálculos Hidráulicos Sistema Propuesto

De acuerdo con los cálculos anteriores, el nuevo sistema de floculación requiere la instalación de 96 paletas de 2,52 m de largo x 0,06 m de ancho y 8 motorreductores de alta eficiencia con capacidad de alimentación de 230/440V con las siguientes capacidades: 2 unidades de 2 HP salida al eje de 10,67 RPM para la primera sección, 2 unidades de 1,5 HP salida al eje de 9,33 RPM para la segunda sección, 2 unidades de 0,50 HP salida al eje de 6,67 RPM para tercera sección y 2 unidades de 0,50 HP salida al eje de 5,34 RPM para la cuarta sección.

El cálculo de los pasos entre cámaras se presenta en la Tabla 47; en estos cálculos se verifica que el gradiente (S-1) presentado en el paso del agua por el tabique divisorios, sea máximo el mismo gradiente de la cámara de entrada; el gradiente de la última cámara debe ser menor al gradiente presentado en el canal que conduce el agua floculada hacia los sedimentadores. Lo anterior, con el fin de garantizar que el floc no se rompa por los cambios bruscos de velocidad en el interior y salida de la estructura de floculación.

#### **Tabla 49**

*Verificación Gradientes de Paso Entre Cámaras*

---

Descripción	Cám. 1 a	Cám. 2 a	Cám. 3 a
	2	3	4
Caudal (Q) (m <sup>3</sup> /s)	0,40	0,40	0,40

---

---

Gradiente Máximo entre cámara	$G = n \cdot \left( \frac{\gamma}{\mu} \right) \cdot Rh^{-0.7} \cdot V^{1.5}$	<b>33,11</b>	<b>19,99</b>	<b>14,31</b>
Ancho Útil (m)		6,0	6,0	6,0
Altura de Paso entre <b>Cámaras</b> - ASUMIDA (m)		0,13	0,16	0,20
		0,5	0,4	0,3
Gradiente Máximo (S <sup>-1</sup> ) - Verificación de G con altura de paso asumida	$G = n \cdot \left( \frac{\gamma}{\mu} \right) \cdot Rh^{-0.7} \cdot V^{1.5}$	<b>30,3</b>	<b>19,2</b>	<b>11,8</b>
n = Coeficiente de Manning (0,012) - Adimensional		<b>Cumple</b>	<b>Cumple</b>	<b>Cumple</b>
$\gamma$ = Peso <b>específico</b> del agua a 20°C (998,2 Kg/m <sup>3</sup> )				
$\mu$ : <b>Viscosidad</b> dinámica del agua a 20°C = 1.002 x 10 <sup>-3</sup> Pa·s				

---

*Nota.* Gradientes verificados del sistema propuesto

## 6. Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos en la prueba realizada con anilina, modificar la configuración actual de las pantallas, incrementa en 21,54% el tiempo de permanencia del agua en el tanque de floculación, al pasar de 204 a 260 segundos desde que entra el agua a la primera Cámara hasta que sale de la última Cámara, debido a que con la modificación propuesta el agua puede permanecer más tiempo en la Cámara 1.

De la prueba de trazadores se concluye que el tiempo de retención hidráulico con la configuración actual de la estructura es de 2,36 minutos, 7,63% menos que el tiempo de retención teórico de 2,54 min; con la configuración de la estructura propuesta en el proyecto, el tiempo de retención incrementa en 18,85% al pasar de 2,54 minutos (teórico) a 3,13 min (experimental); lo anterior indica, que aplicando la escala 1:5, el tiempo de retención hidráulico en el prototipo pasaría de 12,70 a 15,65 minutos.

De acuerdo con los resultados obtenidos por el método de Wolf-Resnick, con la configuración de la estructura propuesta en el proyecto, se reduce en 100% las zonas muertas al pasar de 14% a 0,0%.

Según el resultado del Análisis de la Curva de Tendencia, durante la prueba no se presentó acumulación del trazador ni errores de ensayo, puesto que la relación  $t_m/t_o$  es menor que 1. Con la configuración de la estructura propuesta en el proyecto, el modelo presenta flujo pistón y flujo

mezclado con predominancia del flujo de mezcla completa, puesto que las relaciones  $t_p/t_o$  y  $t_i/t_o$  son aproximadamente iguales a 0.

El índice de Morrill confirma los resultados del Análisis de la Curva de Tendencia, relacionados con la tendencia de la estructura a comportarse como un reactor de mezcla completa, puesto presenta un índice de dispersión de Morrill de  $4,0 > 1$ ; lo anterior indica que se presenta una distribución uniforme y eficiente de las partículas dentro de la estructura.

Los valores de remoción de turbiedad y color obtenidos en la prueba de eficiencia con las diferentes configuraciones de paletas, están en el rango de 20% y 50% para la turbiedad y 1% y 33% para el color, siendo el más alto 50% y 33% respectivamente para la configuración de 12 paletas por eje, estos es 4 aspas con 3 paletas cada una; se confirmó que a mayor número de paletas se presenta mayor formación de remolinos que incrementan agitación del agua y por ende mayor choque entre partículas, dispersión de las mismas y formación de floc de gran tamaño que logra decantar rápidamente en el proceso de la sedimentación.

De la prueba de eficiencia realizada con la configuración de paletas seleccionada (12 paletas por eje) y con diferentes valores de turbiedad del agua presentados, se obtiene remociones de turbiedad y color del 83% y 80% respectivamente, confirmando la alta eficiencia del sistema de floculación propuesta, la cual, permitirá mejorar el proceso de sedimentación e incrementar la carrera de filtración por menor concentración de solidos recibida desde los sedimentadores.

El balance de los costos operativos deja un saldo a favor, el cual, permitiría recuperar la inversión en el termino de 10 años aproximadamente.

La implementación del sistema de agitación propuesto controlado desde un PLC, genera alto beneficio al amb S.A E.S.P. en razón a lo siguiente:

Facilita el control de la operación de la planta al tener que calcular una misma dosis de coagulante para las dos secciones.

Reacciona en forma inmediata ante cambios intempestivos de calidad del agua.

Garantiza la eficiencia de los procesos posteriores al generar un floc de gran tamaño que repercute en una alta velocidad de sedimentación independientemente de la calidad del agua de entrada.

Reduce los costos operativos comparados con los generados por el sistema actual.

## 7. Recomendaciones

Se recomienda modificar la configuración de los tabiques divisorios según se indica en la Figura 25 y ajustar la longitud de separación entre tabiques, para incrementar el tiempo de retención en la Cámara 1; actualmente la Cámara 1 presenta una longitud menor a la de las 3 Cámaras restantes.

Se sugiere implementar el sistema de agitación propuesto en el proyecto, el cual, se conforma de 8 motorreductores con ejes de 12 paletas cada uno; es necesario que el nuevo sistema sea controlado por variadores de frecuencia que permitan ajustar los gradientes de acuerdo a la calidad del agua cruda.

Se recomienda realizar ensayos de jarras verificar permanente manantemente la dosis de coagulantes y gradientes de mezcla de acuerdo con las variaciones de calidad del agua cruda.

Se recomienda no variar drásticamente el caudal de operación de la planta, en razón a que cambios bruscos deterioran la calidad del agua floculada.

Se sugiere realizar anualmente el estudio de trazadores y ensayos de tratabilidad; dicho estudio permite identificar fallas hidráulicas ocasionadas por la operación diaria en las estructuras de tratamiento y ajustar las dosis de coagulante aplicadas.

Se recomienda que el sistema de floculación propuesto, esté controlado desde un PLC que varíe la frecuencia de los motores y gradientes de agitación con base en los cambios de turbiedad del agua cruda.

### Referencias Bibliográficas

- Acueducto Metropolitano de Bucaramanga ESP. (2014). *Planes de Seguridad del Agua, Capitulo III, Descripción Plantas de Tratamiento La Flora, Morrórico, Floridablanca y Bosconia, Gerencia de Operaciones, amb SA ESP. AMB.*
- Almeyda, W. (2002). *Evaluación del riesgo sísmico del sistema de acueducto de Bucaramanga a partir del estudio de microzonificación sísmica indicativa de Bucaramanga-Colombia.* Curso internacional Microzonificación y su aplicación en la mitigación de desastres: [http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/19786/RiesgoSismicoAcueductoBucaramanga%28Almeyda\\_2002%29.pdf](http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/19786/RiesgoSismicoAcueductoBucaramanga%28Almeyda_2002%29.pdf)
- Álvarez, M. (2014). *Regulación del sistema de tratamiento y suministro de agua potable de la planta de potabilización del municipio de Betulia- Acuabe.* (Tesis de pregrado) Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia.
- American Water Works Association. (2002). *Calidad y Tratamiento del Agua. Manual de Suministros.* México: McGrawHill.
- Amirtharajah, A., y Trusler, S. (1986). Desestabilization of particles by turbulent rapid mixing. *Journal of Environmental Engineering, ASCE.*
- Andía, Y. (2000). *Tratamiento de agua. Coagulación y floculación.* <http://www.ingenieroambiental.com/4014/andia.pdf>
- Angarita, F. (2015). *Evaluación técnica del proceso de floculación con los coagulantes empleados en la planta de tratamiento de agua potable de Floridablanca.* [Trabajo de grado,

- Universidad Pontificia Bolivariana]. Repositorio UPB:  
[https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/11167/digital\\_28780.pdf](https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/11167/digital_28780.pdf)
- Arboleda, J. (1992). *Teoría y práctica de la purificación del agua* (3a ed.). Bogotá: Editorial Acodal.
- Cánepa de Vargas, L. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría Tomo I*.  
[https://www.ingenieriasanitaria.com.pe/pdf/manual1/tomo1/ma1\\_tomo1\\_indice.pdf](https://www.ingenieriasanitaria.com.pe/pdf/manual1/tomo1/ma1_tomo1_indice.pdf)
- Corporación Metropolitana de Planeación y Desarrollo de Bucaramanga (CORPLAN). (2003). *Área metropolitana de Bucaramanga. Una Sociedad que Construye su Futuro*.  
<https://repositoriocdim.esap.edu.co/bitstream/handle/123456789/12030/8397-1.pdf>
- Electronilab. (2024). *Controlador PWM de Velocidad de Motor DC 6V-28V/3A 13khz*.  
[https://electronilab.co/tienda/controlador-pwm-de-velocidad-de-motor-dc-6v-28v-3a/?srsltid=AfmBOor3a3uRCgg19RPwD16qf\\_Nn708aCRUtvsgIqUy64TmmtSuBj-BZ](https://electronilab.co/tienda/controlador-pwm-de-velocidad-de-motor-dc-6v-28v-3a/?srsltid=AfmBOor3a3uRCgg19RPwD16qf_Nn708aCRUtvsgIqUy64TmmtSuBj-BZ)
- Electronilab. (2024). *Motorreductor de metal 6V 15RPM N20*.  
[https://electronilab.co/tienda/motorreductor-de-metal-6v-15rpm-n20/?srsltid=AfmBOornS0D1nybA-I4nd9-ngfZUcM88BRJxD0y5Js5nYrJY-F\\_Pc4bU](https://electronilab.co/tienda/motorreductor-de-metal-6v-15rpm-n20/?srsltid=AfmBOornS0D1nybA-I4nd9-ngfZUcM88BRJxD0y5Js5nYrJY-F_Pc4bU)
- Empresa Ibaguereña de Acueducto y Alcantarillado [IBAL]. (2020). *Manual de tratamiento de aguas. Universidad Cooperativa de Colombia*:  
<https://ibal.gov.co/sites/default/files/ibal/sites/default/files/images/stories/OPERACION%20PTAP.pdf>
- Fibras y Normas de Colombia S.A.S. (2023). *Coagulación y floculación: definición, tipos y factores*. <https://blog.fibrasynormasdecolombia.com/coagulacion-floculacion-definicion/>

- Giles, R. (1990). *Mecánica de Fluidos e Hidráulica. Teoría y 457 problemas resueltos* (2a ed.). Mc Graw Hill.
- Google Maps. (2024). *Ubicación PTAP Florida*. <https://n9.cl/f88i9c>
- Gregory, J. (1988). Polymer adsorption and flocculation in sheared suspensions. *Colloids and Surfaces*, 31, 231-253. [https://doi.org/10.1016/0166-6622\(88\)80196-3](https://doi.org/10.1016/0166-6622(88)80196-3)
- Ives, K., y Hoyer, O. (1998). Tracer studies of the hydraulics of tapered flocculation. *Water Science and Technology*, 37(10), 69-77. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(98\)00305-9](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(98)00305-9)
- Li, J., How, Z., Benally, C., Sun, Y., Zeng, H., y Gamal, M. (2023). Removal of colloidal impurities by thermal softening-coagulation-flocculation-sedimentation in steam assisted gravity drainage (SAGD) produced water: Performance, interaction effects and mechanism study. *Separation and Purification Technology*, 313, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123484>
- Organización Panamericana de la Salud (OPS). (1973). *Teoría Diseño y Control de los Procesos de Clarificación del Agua*. <https://www.ircwash.org/sites/default/files/250-73TE.pdf>
- Ortiz, J. (2003). *Evaluación y diagnóstico de la planta de tratamiento de agua potable de Floridablanca y actualización del manual de operaciones de la planta*. [Trabajo de grado, Universidad Pontificia Bolivariana]. No publicada.
- Otero, Y. (2008). *Análisis del comportamiento hidráulico de los floculadores mecánicos*. Estudio de la Planta de tratamiento de agua potable de Floridablanca.
- Pérez, A. (2015). *Valoración técnico – económica del proceso coagulación en la planta de tratamiento de agua potable de Floridablanca (Acueducto Metropolitano de Bucaramanga amb SA ESP)*. [Trabajo de grado, Universidad Pontificia Bolivariana]. Trabajo No publicado.

- Pérez, A. (2015). *Valoración técnico – económica del proceso coagulación en la planta de tratamiento de agua potable de Floridablanca (acueducto metropolitano de Bucaramanga s.a. e.s.p)* . (Tesis de pregrado) Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia.
- Pérez, A., y Torres, P. (2008). Evaluación del comportamiento hidrodinámico como herramienta para optimización de reactores anaerobios de crecimiento en medio fijo. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*(45), 27-40.  
<http://www.scielo.org.co/pdf/rfiua/n45/n45a03.pdf>
- Pérez, J. (1987). *Manual de Potabilización del Agua*. [Trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia] Repositorio UNAL: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/2056>
- Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) Florida del AMB S.A. E.S.P. (2022). *Información general de la Planta*. PTAP.
- Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) Florida del AMB SA ESP. (2024). *Archivo fotográfico*. PTAP.
- Rulyov, N., Maes, A., y Korolyov, V. (2000). Optimization of hydrodynamic treatment regime in the processes of sorption–flocculation water purification from organic contaminants. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 175(3), 371-381.  
[https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(00\)00660-9](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(00)00660-9)
- Serra, T., Colomer, J., y Logan, B. (2008). Efficiency of different shear devices on flocculation. *Water Research*, 42(4), 1113-1121. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.08.027>
- Vargas, L. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida*.  
[http://www.ingenieriasanitaria.com.pe/pdf/manual1/tomo1/ma1\\_tomo1\\_indice.pdf](http://www.ingenieriasanitaria.com.pe/pdf/manual1/tomo1/ma1_tomo1_indice.pdf)

## Apéndices

## Apéndice A

*Dosis de Coagulantes Líquidos Aplicada en Planta Floridablanca*

Fecha	Sulfato de Aluminio Tipo B		Policloruro de Aluminio	
	Líquido (mg/L)		(mg/L)	
	Antigua	Nueva	Antigua	Nueva
ene-23	33,50	29,10	39,42	30,36
feb-23	31,88	27,05	20,31	16,65
mar-23	38,05	32,53	44,90	36,08
abr-23	34,68	31,56	38,34	25,14
may-23	33,98	30,85	31,06	29,20
jun-23	44,60	35,82	46,55	39,11
jul-23	43,12	33,96	28,91	25,36
ago-23	43,22	34,45	35,78	23,50
sep-23	36,63	33,92	27,96	23,02
oct-23	36,00	34,07	31,39	27,91
nov-23	36,51	33,05	26,79	26,08
dic-23	32,70	33,62	25,06	22,48
ene-24	31,44	30,61	27,44	24,32
feb-24	34,79	32,16	30,97	27,08

<b>mar-24</b>	35,91	32,39	38,79	35,57
<b>abr-24</b>	39,51	35,55	34,98	28,03
<b>may-24</b>	37,56	33,91	30,53	26,46
<b>jun-24</b>	32,11	32,05	25,88	25,81
<b>jul-24</b>	31,37	31,04	27,76	25,88
<b>ago-24</b>	31,49	31,28	26,63	27,52
<b>sep-24</b>	34,37	31,11	19,41	18,72
<b>oct-24</b>	30,09	21,90	21,81	21,72
<b>nov-24</b>	42,70	32,31	26,93	27,56
<b>dic-24</b>	28,15	28,11	-	-
<b>Promedio</b>	<b>35,60</b>	<b>31,77</b>	<b>30,77</b>	<b>26,68</b>
<b>Diferencia de dosis aplicada</b>		<b>3,83</b>		<b>4,09</b>

## Apéndice B

### *Caudal Tratado en la Planta Floridablanca*

<b>Fecha</b>	<b>Sección Antigua (L/s)</b>			<b>Sección Nueva (L/s)</b>
	<b>Entrada # 1</b>	<b>Entrada # 2</b>	<b>Total</b>	<b>Total</b>
<b>ene-23</b>	109	107	<b>216</b>	<b>223</b>
<b>feb-23</b>	112	111	<b>223</b>	<b>218</b>
<b>mar-23</b>	114	112	<b>226</b>	<b>223</b>
<b>abr-23</b>	107	107	<b>214</b>	<b>215</b>
<b>may-23</b>	110	110	<b>220</b>	<b>221</b>

<b>jun-23</b>	115	110	<b>225</b>	<b>223</b>
<b>jul-23</b>	116	115	<b>231</b>	<b>225</b>
<b>ago-23</b>	111	108	<b>219</b>	<b>225</b>
<b>sep-23</b>	115	113	<b>228</b>	<b>222</b>
<b>oct-23</b>	116	115	<b>231</b>	<b>224</b>
<b>nov-23</b>	123	121	<b>244</b>	<b>240</b>
<b>dic-23</b>	127	125	<b>252</b>	<b>244</b>
<b>ene-24</b>	129	128	<b>257</b>	<b>250</b>
<b>feb-24</b>	131	131	<b>262</b>	<b>245</b>
<b>mar-24</b>	131	130	<b>261</b>	<b>233</b>
<b>abr-24</b>	128	126	<b>254</b>	<b>236</b>
<b>may-24</b>	127	125	<b>252</b>	<b>228</b>
<b>jun-24</b>	127	124	<b>251</b>	<b>238</b>
<b>jul-24</b>	133	130	<b>263</b>	<b>238</b>
<b>ago-24</b>	137	134	<b>271</b>	<b>236</b>
<b>sep-24</b>	137	138	<b>275</b>	<b>259</b>
<b>oct-24</b>	141	133	<b>274</b>	<b>246</b>
<b>nov-24</b>	136	135	<b>271</b>	<b>239</b>
<b>dic-24</b>	129	125	<b>254</b>	<b>234</b>
<b>Promedio</b>	<b>123</b>	<b>121</b>	<b>245</b>	<b>233</b>
<b>Caudal promedio tratado por sección</b>			<b>245</b>	<b>233</b>

