

**EVALUACIÓN TÉCNICA DEL PROCESO DE FLOCULACIÓN CON LOS
COAGULANTES EMPLEADOS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE
AGUA POTABLE DE FLORIDABLANCA**

FRANCISCO JAVIER ANGARITA PINZÓN



UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA - SECCIONAL BUCARAMANGA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

FLORIDABLANCA

2015

**EVALUACIÓN TÉCNICA DEL PROCESO DE FLOCULACIÓN CON LOS
COAGULANTES EMPLEADOS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE
AGUA POTABLE DE FLORIDABLANCA.**

FRANCISCO JAVIER ANGARITA PINZÓN

Trabajo de grado como requisito para optar al título de

INGENIERO AMBIENTAL

DIRECTORA

PhD. ALEXANDRA CERÓN VIVAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

FLORIDABLANCA

2015

NOTA DE ACEPTACION

Firma del presidente del jurado

Firma de jurado

Firma de jurado

Bucaramanga, Enero de 2015

Bucaramanga, Enero de 2015

*Este trabajo de grado está dedicado a Dios,
Por acompañarme y darme fortaleza en todo momento,
Gracias Dios por siempre estar conmigo.*

*A mis padres Trino Angarita y María Pinzón,
Por su constante afán y apoyo en todas mis actividades como persona.
A mi hermana Laura, por su interés y compañía.*

*A Carolina Figueroa por
Su apoyo incondicional.*

*Este proyecto de grado está dedicado a todos
Mis familiares quienes siempre creyeron en mí y en mis capacidades*

*A mi compañera, Ángela Pérez,
Por su paciencia y colaboración.*

*A mis amigos Luis Hernando Joya y Martha Flórez Martínez
Por apoyarme y brindarme su amistad y a todos
mis amigos de "Hernando Parrilla".*

Muchas gracias

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto no hubiera podido ser posible sin todo lo aprendido en nuestra alma mater la Universidad Pontificia Bolivariana.

A la Doctora Alexandra Cerón Vivas, por ser la encargada de dar dirección seguimiento y visto bueno a cada una de las actividades desarrolladas en toda la investigación.

A Msc Álvaro Andrés Cajigas por su acompañamiento y consejo técnico a lo largo del desarrollo del proyecto.

Ing. Yolanda Otero jefe de planta, un especial agradecimiento quien facilitó el desarrollo de la investigación en la PTAP.

A los operadores de la PTAP-Floridablanca, quienes apoyaron el desarrollo del proyecto.

Laboratorista. Naidu Villamizar por su colaboración a lo largo del proyecto.

Al Acueducto Metropolitano De Bucaramanga permitir la investigación en la PTAP-Floridablanca

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|----|
| INTRODUCCION | 12 |
| 1. OBJETIVOS | 13 |
| 1.1. OBJETIVO GENERAL | 13 |
| 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 13 |
| 2. MARCO REFERENCIAL..... | 14 |
| 2.1. MARCO CONTEXTUAL..... | 14 |
| 2.2. MARCO TEÓRICO | 16 |
| 2.2.1. La Floculación | 16 |
| 2.2.2. Mecanismos de transporte. | 16 |
| 2.2.3. Tipos de Floculadores..... | 20 |
| 2.2.4. Parámetros de Operación en la Mezcla Lenta. | 21 |
| 2.2.5. Tipos de Flujo..... | 24 |
| 2.2.6. Análisis de las Características Hidráulicas de un Floculador. | 26 |
| 3. METODOLOGÍA..... | 33 |
| 3.1. Fase 1: Obtención en laboratorio de los parámetros óptimos de floculación (gradientes y tiempos de mezcla lenta) para los coagulantes empleados en planta..... | 33 |
| 3.1.1. Determinación de la dosis óptima del coagulante..... | 34 |
| 3.2. Fase 2: Determinación en la Planta de Tratamiento de Agua potable de Floridablanca los parámetros de floculación (Gradientes y Tiempos de mezcla) en condiciones de operación..... | 36 |
| 3.2.1. Gradientes Reales en Planta..... | 37 |
| 3.3. Fase 3: Formulación de alternativas para el mejoramiento de la floculación en la PTAP-Floridablanca | 37 |
| 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS | 38 |
| 4.1. Ensayos en laboratorio. | 38 |
| 4.1.1. Dosis óptima de los coagulantes..... | 38 |
| 4.1.2. Parámetros óptimos de floculación obtenidos en laboratorio | 40 |
| 4.1.2.1 Parámetros óptimos de floculación usando el coagulante sulfato de aluminio líquido, concentrado al 1% y preparado en base al contenido de alúmina del coagulante..... | 40 |

| | | |
|---------|--|----|
| 4.1.2.2 | Parámetros óptimos de floculación usando el coagulante PAC líquido, concentrado al 1% y preparado en base al contenido de alúmina del coagulante. | 56 |
| 4.2. | Parámetros de floculación obtenidos en la planta. | 72 |
| 4.2.1. | Prueba de trazadores. | 72 |
| 4.2.1.1 | Resultados Prueba de Trazadores Floculador Hidráulico | 73 |
| 4.2.1.2 | Resultados Prueba de Trazadores Floculador Reciprocante | 77 |
| 4.2.2. | Gradientes reales de floculación en condiciones de operación..... | 83 |
| 4.3. | Alternativas para el mejoramiento operativo del proceso de floculación. | 85 |
| 5. | CONCLUSIONES | 88 |
| 6. | RECOMENDACIONES | 89 |
| 7. | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 90 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|-----------|
| <i>Figura 1. Localización Planta de tratamiento de agua potable de Floridablanca.</i> | <i>14</i> |
| <i>Figura 2. Floculador mecánico de balancín recíprocante. Sección 1 de la planta</i> | <i>15</i> |
| <i>Figura 3. Floculador hidráulico de flujo horizontal. Sección 2 de la planta.</i> | <i>15</i> |
| <i>Figura 4. Esquema de un Floculador Mecánico Recíprocante.</i> | <i>21</i> |
| <i>Figura 5 Curva (1-Ft) cantidad de trazador que permanece en el Reactor.</i> | <i>29</i> |
| <i>Figura 6 Concentración del Trazador en el Efluente de un Reactor.</i> | <i>30</i> |
| <i>Figura 7 Índice de Morrill</i> | <i>32</i> |
| <i>Figura 8. Esquema con las condiciones de mezcla del equipo de jarras</i> | <i>34</i> |

LISTA DE GRÁFICAS

| | |
|--|----|
| <i>Gráfica 1. Dosis óptima PAC</i> | 39 |
| <i>Gráfica 2 . Gradientes de mayor Remoción de Turbiedad</i> | 41 |
| <i>Gráfica 3. Tiempo de Mezcla VS Turbidez Remanente / Turbiedad inicial 48,8 UNT</i> | 41 |
| <i>Gráfica 4. Tiempo de Mezcla VS Color Verdadero / Color Aparente 553</i> | 43 |
| <i>Gráfica 5. Gradientes de mayor remoción de turbidez.</i> | 44 |
| <i>Gráfica 6. Tiempo de Mezcla VS Turbiedad Remanente / Turbiedad inicial 729 UNT</i> | 44 |
| <i>Gráfica 7. Tiempo de mezcla VS Color Verdadero / Color Aparente 2534</i> | 46 |
| <i>Gráfica 8 . Gradientes de mayor remoción de turbidez.</i> | 47 |
| <i>Gráfica 9. Tiempo de Mezcla VS Turbiedad Remanente / Turbiedad Inicial 330 UNT</i> | 47 |
| <i>Gráfica 10 Tiempo de Mezcla VS Color Verdadero / Color Aparente 605 UPC</i> | 49 |
| <i>Gráfica 11. Gradientes de velocidad de mayor remoción de turbidez.</i> | 50 |
| <i>Gráfica 12. Tiempo de Mezcla VS Turbiedad Remanente / Turbiedad inicial 164 UNT</i> | 50 |
| <i>Gráfica 13 : Turbiedad Remanente VS Color Verdadero / Color Aparente 553</i> | 52 |
| <i>Gráfica 14. Gradientes de velocidad de mayor remoción de turbidez muestra 5.</i> | 53 |
| <i>Gráfica 15 : Tiempo de Mezcla VS Turbiedad Remanente / Turbiedad Inicial 13 UNT</i> | 53 |
| <i>Gráfica 16. Tiempo de Mezcla VS Color Verdadero / Color Aparente 249 UPC</i> | 55 |
| <i>Gráfica 17 Gradientes de mayor remoción de turbiedad muestra 6</i> | 56 |
| <i>Gráfica 18. Tiempo de Mezcla VS Turbiedad Residual / Turbiedad Inicial 180 UNT</i> | 57 |
| <i>Gráfica 19 : Tiempo de Mezcla VS Color Verdadero / Color Aparente 553</i> | 58 |
| <i>Gráfica 20. Gradientes de mayor remoción de turbiedad muestra 7</i> | 59 |
| <i>Gráfica 21. Tiempo de Mezcla VS Turbiedad Remanente / Turbiedad inicial 732UNT</i> | 60 |
| <i>Gráfica 22. Gradiente VS Color Residual / Color aparente 1137 UPC</i> | 61 |
| <i>Gráfica 23. Gradientes de mayor remoción de turbiedad</i> | 62 |
| <i>Gráfica 24. Tiempo de Mezcla VS Turbiedad Remanente / Turbiedad inicial 320 UNT</i> | 63 |
| <i>Gráfica 25 : Tiempo de Mezcla VS Color Residual / Color aparente 521</i> | 64 |
| <i>Gráfica 26. Gradientes de mayor remoción de turbiedad.</i> | 65 |
| <i>Gráfica 27. Tiempo de Mezcla VS Turbiedad Residual / Turbiedad inicial 51,2 UNT</i> | 66 |
| <i>Gráfica 28. Tiempo de mezcla VS Color Residual / Color aparente 113 UPC</i> | 67 |
| <i>Gráfica 29. Gradientes de mayor remoción de turbiedad.</i> | 68 |
| <i>Gráfica 30. Tiempo de Mezcla VS Turbiedad Residual / Turbiedad inicial 12 UNT</i> | 69 |

| | |
|--|-----------|
| Gráfica 31. Tiempo de Mezcla VS Color Residual / Turbiedad inicial 12 UNT | 71 |
| Gráfica 32 Curva de Calibración del Trazador..... | 72 |
| Gráfica 33. Método Grafico de Wolf & Resnick Floculador Hidráulico | 74 |
| Gráfica 34. Análisis de la Curva de Tendencia del Trazador Floculador Hidráulico | 76 |
| Gráfica 35 : Índice de Morrill Floculador Hidráulico | 77 |
| Gráfica 36. Método Grafico de Wolf & Resnick Floculador Reciprocante..... | 79 |
| Gráfica 37. Análisis Hidráulico por el Método de la Curva de Tendencia Floculador Reciprocante..... | 81 |
| Gráfica 38. Índice de Morril Floculador Reciprocante | 82 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Tipos de floculadores. | 20 |
| Tabla 2 Formas de Aplicar o Dosificar el Trazador | 27 |
| Tabla 3. Parámetros Principales para el Análisis gráfico de la curva del trazador | 31 |
| Tabla 4. Análisis de la curva de Gauss. | 31 |
| Tabla 5. Concentración de los Reactivos. | 34 |
| Tabla 6. Velocidades de agitación en los equipos de jarras. | 35 |
| Tabla 7. Muestras de agua utilizadas para la determinación de los parámetros óptimos de floculación | 38 |
| Tabla 8. Dosis óptima de coagulante | 39 |
| Tabla 9. Turbiedad residual obtenida con distintos gradientes y tiempos de mezcla, muestra 1. | 40 |
| Tabla 10. Parámetros Óptimos Turbiedad inicial 48,8 UNT | 42 |
| Tabla 11. Resultados de la Prueba de Jarras / Color Verdadero | 42 |
| Tabla 12. Variación de la turbiedad residual con los parámetros de mezcla lenta para la muestra 2. | 43 |
| Tabla 13. Parámetros Óptimos Turbiedad inicial 729 UNT | 45 |
| Tabla 14 : Resultados de la Prueba de Jarras / Color Verdadero | 45 |
| Tabla 15. Resultados de la Prueba de Jarras Turbiedad Residual / Turbiedad inicial 330 UNT | 46 |
| Tabla 16. Parámetros Óptimos / Turbiedad Inicial 330 UNT | 48 |
| Tabla 17. Resultado de Prueba de Jarras / Color Verdadero / Color aparente 605 | 48 |
| Tabla 18. Resultados de la Prueba de Jarras-Turbiedad Residual / Turbiedad Inicial 164 UNT | 49 |
| Tabla 19. Parámetros Óptimos / Turbiedad Inicial 164 UNT | 51 |
| Tabla 20. Resultados Prueba de Jarras/ Color Aparente 553 | 51 |
| Tabla 21 : Resultados Prueba de Jarras-Turbiedad Residual / Turbiedad Inicial 13 UNT | 52 |
| Tabla 22 : Parámetros Óptimos / Turbiedad Inicial 13 UNT | 54 |
| Tabla 23. Resultados Pruebas de Jarras Color Residual / Color Aparente 249 UPC | 54 |
| Tabla 24. Resultados de la Prueba de Jarras-Turbiedad Residual / Turbiedad Inicial 180 UNT | 56 |
| Tabla 25. Parámetros óptimos / turbiedad inicial 180 UNT | 57 |
| Tabla 26. Resultados Pruebas de Jarras Color Residual / Color Aparente 553 UPC | 58 |
| Tabla 27. Resultados prueba de Jarras Turbiedad Residual / Turbiedad inicial 732 UNT | 59 |
| Tabla 28. Tiempo y gradientes óptimos de mezcla / turbiedad inicial 732 UNT | 60 |
| Tabla 29. Resultados Prueba de jarras Color Residual / Color Aparente 1137 | 61 |
| Tabla 30. Resultados Prueba de Jarras Turbiedad Residual / Turbiedad inicial 320 UNT | 62 |

| | |
|---|-----------|
| Tabla 31. Parámetros óptimos de floculación / turbiedad inicial 320 UNT | 63 |
| Tabla 32. Resultados Prueba de jarras Color Residual / Color aparente 521 UPC | 64 |
| Tabla 33. Resultados Pruebas de Jarras Turbiedad Residual / Turbiedad inicial 51,2 UNT | 65 |
| Tabla 34. Parámetros óptimos de floculación / turbiedad inicial 52,2 UNT | 66 |
| Tabla 35. Resultados Prueba de Jarras Color Residual / Color aparente 113 UPC | 67 |
| Tabla 36. Resultados Prueba de Jarras Turbiedad Residual / Turbiedad Inicial 12UNT | 68 |
| Tabla 37. Parámetros óptimos de floculación / turbiedad inicial 12UNT | 69 |
| Tabla 38. Resultados Prueba de Jarras Color Residual / Color aparente 125 UPC | 70 |
| Tabla 39. Resultados Prueba de Trazadores Floculador Hidráulico | 73 |
| Tabla 40 : Resultados de la Curva de Tendencia Floculador Hidráulico | 76 |
| Tabla 41. Resultados Prueba de Trazadores Floculador Reciprocante. | 78 |
| Tabla 42. Resultados de la Curva de Tendencia Floculador Reciprocante | 81 |
| Tabla 43. Gradientes Reales Floculador Mecánico Reciprocante | 83 |
| Tabla 44. Gradientes Reales Floculador Hidráulico | 84 |

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: EVALUACIÓN TÉCNICA DEL PROCESO DE FLOCULACIÓN CON LOS COAGULANTES EMPLEADOS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DE FLORIDABLANCA.

AUTOR: FRANCISCO JAVIER ANGARITA PINZÓN

FACULTAD: INGENIERÍA AMBIENTAL

DIRECTOR (A): ALEXANDRA CERÓN VIVAS.

RESUMEN

Este trabajo de grado tuvo como fin realizar la evaluación hidráulica de las unidades de floculación de la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Floridablanca, en función de los coagulantes usados para el tratamiento. Se realizaron pruebas de jarras para distintas calidades de agua recolectadas de la PTAP, donde se modificaron las velocidades de agitación y los tiempos de mezcla en los equipos de jarras, con el objetivo de comprobar el gradiente y el tiempo que producen una mayor remoción de color y turbidez en la operación de floculación y así justificar el uso del coagulante con base a la calidad del agua que esté llegando a la planta. Se realizó una prueba de trazadores, aplicándose de forma instantánea cloruro de sodio como sustancia trazadora en los dispositivos de mezcla lenta obteniéndose el diagnóstico hidráulico de los floculadores a partir del análisis de datos por modelos matemáticos como el de Wolf & Resnick y el análisis de la curva de tendencia. Se determinó el porcentaje de flujo pistón el cual fue 74,20% y mezclado del 25,8% para el floculador hidráulico y flujo pistón del 54,9% y flujo mezclado del 45,1 % para el floculador recíprocante.

PALABRAS CLAVES: Flujo a Pistón, Flujo-Mezclado, Flujo No Ideal, Prueba de Trazadores, Tiempo de Mezcla, Modelo Matemático, Mezcla Lenta, Diagnóstico Hidráulico.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF DEGREE WORK

TITLE: TECHNICAL EVALUATION PROCESS WITH COAGULANTS
FLOCCULATION PLANT EMPLOYEES IN DRINKING
WATER TREATMENT FLORIDABLANCA

AUTHOR: FRANCISCO JAVIER ANGARITA PINZÓN

FACULTY: FACULTY OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING

ADVISOR: ALEXANDRA CERÓN VIVAS

ABSTRACT

The aim of this work was perform hydraulic evaluation of flocculation units from Plant Drinking Water Treatment Floridablanca, depending on the coagulant used for treatment. Jar tests for different qualities of water collected from the PTAP were performed. The stirring rate and mixing times were changed to verify the gradient and the time producing greater removal of color and turbidity in the flocculation process and thus justify the use of the coagulant, based on the quality of water that is coming to the plant. Test of tracer was performed. Sodium chloride was applied instantly in the devices of slow mixture. The hydraulic diagnosis flocculators was obtained from data analysis by mathematical modeling as the Wolf & Resnick and analysis of the trend curve. It trend curve determined the percentage of plug flow which was 74.20 % and 25.8 % for mixed flocculator and piston flow and mixed flow were 54.9 % from 45.1 % to hydraulic reciprocating.

KEYWORDS: Piston Flow, Mixed Flow, Non-Ideal Flow, Tracer Test, Mixing Time, Mathematical Model, Slow Mixing, Hydraulic Diagnosis.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

INTRODUCCION

Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta son municipios Santandereanos que experimentan un crecimiento poblacional y un desarrollo económico acelerado, esto se traduce para el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, en aumento de la producción de agua para consumo humano, es decir mayores caudales de agua cruda para tratamiento. Por tal motivo es necesario chequear las potabilizadoras, evaluar y verificar técnicamente su funcionamiento en condiciones de operación, con el fin de obtener posibles fallas y determinar si los sistemas existentes están capacitados para tratar los caudales que requiera la población.

La planta de tratamiento de agua potable de Floridablanca, PTAP-Floridablanca, es parte del sistema de producción del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. Este sistema compuesto por las plantas de Bosconia, Morrórico y la Flora, son responsables de garantizar el suministro de agua potable a toda la población de Bucaramanga y gran parte de su área metropolitana.

La PTAP-Floridablanca de tipo convencional se construyó en los años setenta, se diseñó conforme a la demanda de agua potable de la época, no obstante el veloz crecimiento en la región exigió optimizarla con el propósito de aumentar la capacidad de tratamiento. En los años ochenta se realizó la ampliación de la PTAP, construyéndose otra planta de tratamiento contigua a la planta diseñada originalmente. De esta forma, la planta está compuesta por dos secciones o plantas las cuales funcionan en paralelo tratando el agua cruda del Río Frio.

Actualmente en la planta se usan como coagulantes el sulfato de aluminio y el policloruro de aluminio (PAC), dependiendo de la turbiedad con que se capta el agua. Con esta investigación se pretende evaluar técnicamente los parámetros operativos del proceso de floculación con los dos coagulantes empleados e identificar posibles fallas en las unidades de mezcla lenta y así plantear alternativas para la mejora de este proceso en la planta.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL.

Realizar la evaluación técnica del proceso de floculación con los coagulantes empleados en la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Floridablanca.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

Obtener en laboratorio los parámetros óptimos de floculación (gradientes y tiempos de mezcla lenta) para los coagulantes empleados en planta.

Determinar en la Planta de Tratamiento de Agua potable de Floridablanca los parámetros de floculación en condiciones de operación.

Formular alternativas para el mejoramiento operativo de la floculación en la PTAP-Floridablanca.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1. MARCO CONTEXTUAL

La PTAP-Floridablanca está localizada en la zona Suroriental del Área Metropolitana de Bucaramanga, en la parte alta de los barrios Bucarica y Caracolíes del municipio de Floridablanca, a una altura media de 1042 msnm (Ver Figura 1).



Figura 1. Localización Planta de tratamiento de agua potable de Floridablanca.

La planta consta de dos secciones: La sección 1 o planta antigua construida en los años setenta y optimizada en esa época, con el propósito de aumentar la capacidad de tratamiento, realiza las operaciones con los siguientes dispositivos: La mezcla rápida se efectúa en un vertedero, mezcla lenta con floculadores mecánicos reciprocantes, sedimentadores de tipo convencional optimizados con placas y filtros rápidos. En los años ochenta se realizaron obras de ampliación en la PTAP, creándose la sección 2 de la planta con diferentes dispositivos de tratamiento: mezcla rápida en canaleta Parshall, mezcla lenta en floculadores hidráulicos de flujo horizontal, sedimentadores de placas paralelas y filtros rápidos. Las dos secciones de la planta funcionan en paralelo, produciendo en promedio 635 Lps de agua potable de la cual se beneficia gran parte del suroriente del área metropolitana de Bucaramanga.

Esta planta está destinada a tratar aguas provenientes de las fuentes de la hoya del Río Frío, para abastecer la zona Sur del Área Metropolitana conjuntamente

con la plantas Morrórico y La Flora y Bosconia.(Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, 2014)

Como se mencionó anteriormente, la PTAP realiza la floculación con un dispositivo hidráulico y otro de tipo mecánico. Se puede observar en la figura 2, el tanque de floculación mecánico reciprocante.



Figura 2. Floculador mecánico de balancín reciprocante. Sección 1 de la planta

La figura 3 muestra el floculador hidráulico de flujo horizontal. Este se encuentra localizado en la sección original y optimizada de la planta.



Figura 3. Floculador hidráulico de flujo horizontal. Sección 2 de la planta.

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. La Floculación

La floculación es el proceso de aglutinación de partículas inducida por una agitación lenta de la suspensión coagulada (RAS.2010). 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 las partículas en el agua, la naturaleza de la fuente, el gradiente de velocidad, el tiempo de mezcla, las variaciones de caudal y el número de compartimientos, son los factores que determinan la formación de flóculos para su posterior sedimentación.

2.2.2. 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 las partículas (i y j) es proporcional al producto de las concentraciones de las dos unidades colisionantes (n_i y n_j), como resultado la forma general de esta relación está dada por la siguiente ecuación:

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

Donde:

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

α_{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.

Floculación Pericinético o Browniana.

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, $K_B T$, donde K_B es la constante de Boltzmann y T es la temperatura absoluta. Este proceso se puede expresar mediante la siguiente ecuación en donde la tasa de floculación pericinética es proporcional a la temperatura absoluta, y para partículas de igual diámetro ($d_1=d_2$) es independiente del tamaño de las partículas AWWA(2002).

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

Donde:

$K_B T$ = Energía térmica del fluido. K_B es la constante de Boltzmann.

T = Temperatura absoluta.

K_p = Tasa de floculación pericinética o en cizalladura laminar.

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

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

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 suficientemente juntas, sus diferentes velocidades les producirán eventualmente entrar en contacto. La constante de velocidad que describe este proceso está dada por la ecuación 3:

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

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

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

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

A = Es la constante de Hamaker (Lopez Santamaria, 2011).

Entre mayor sea la tasa de cizalladura y el tamaño de las partículas mayor será la influencia del tipo de transporte ortocinético o en cizalladura laminar.

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:

$$K_d = \frac{\pi g (s-1)}{72 \nu} (d_1 + d_2)^3 (d_1 - d_2) \quad \text{Ecuación 5}$$

s = Es el peso específico de las partículas

ν = Viscosidad cinemática

g = fuerza de gravedad

Esta expresión se da con la hipótesis de que las partículas son esféricas y tienen la misma densidad y además que cumplan las condiciones de la ley de Stokes.

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 se da por la siguiente expresión, en donde ($K_{ij} = K_t$):

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

ε = Velocidad local de disipación de energía por unidad de masa de fluido.

ν = Viscosidad cinemática.

La velocidad de choque de las partículas por la acción turbulenta aumenta con el aumento en el diámetro de las partículas y con el aumento en la energía del fluido. El factor de corrección está dado por la ecuación 7, donde ($\alpha_t = \alpha_{ij}$). (American Water Works Association, 2002)

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

ε = Velocidad local de disipación de energía por unidad de masa de fluido.

ν = Viscosidad cinemática.

A = Es la constante de Hamaker

μ = Viscosidad absoluta del agua.

d = Diámetro de la partícula.

2.2.3. Tipos de Floculadores

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

Tabla 1. Tipos de floculadores. Fuente(Arboleda, 2000)

| Según La Energía De Agitación | Según El Sentido Del Flujo | Descripción | Nombre |
|--------------------------------------|-----------------------------------|---|-----------------------|
| Hidráulicos | <i>Flujo horizontal</i> | <i>Con tabiques de ida y regreso</i> | <i>De tabiques</i> |
| | <i>Flujo vertical</i> | <i>Con tabiques arriba y abajo del tanque</i> | <i>Alabama</i> |
| | | <i>Con codos en el fondo que proyectan el agua hacia arriba</i> | <i>Cox</i> |
| | | <i>Con entrada lateral al tanque</i> | |
| Mecánicos | <i>Rotatorios</i> | <i>De paletas de eje horizontal o vertical</i> | <i>De paletas</i> |
| | | <i>De turbinas horizontales o verticales</i> | <i>De turbinas</i> |
| | <i>Reciprocantes</i> | <i>Rejas o cintas oscilantes</i> | <i>Reciprocantes</i> |
| Hidromecánicos | <i>Flujo horizontal</i> | <i>De turbina pelton y paletas horizontales</i> | <i>Hidromecánicos</i> |

La PTAP-Floridablanca realiza la floculación en unidades de tipo hidráulica y mecánica. Los floculadores hidráulicos utilizan el cambio de dirección de flujo del agua, inducido por diferentes mecanismos, para producir la turbulencia necesaria para promover la formación del floc y derivan su energía de la carga de velocidad que el líquido adquiere en su tránsito por un conducto.(Ministerio de Vivienda, 2010)

Los floculadores hidráulicos son de gran utilidad en países en desarrollo debido a sus bajos costos, 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.

Los floculadores mecánicos de balancín recíprocante consisten de una parrilla o serie de parrillas o cintas colocadas en un balancín de modo que se desplazan verticalmente hacia arriba y hacia abajo dentro del agua comunicando un movimiento de agitación al líquido. En la figura 4 se puede observar el esquema de agitación de un floculador mecánico recíprocante. (CEPIS, 1973)

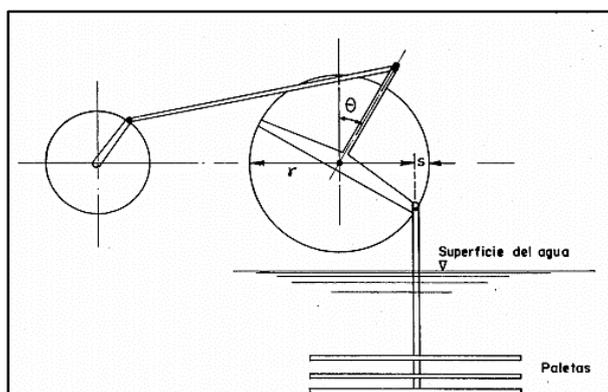


Figura 4. Esquema de un Floculador Mecánico Recíprocante. Fuente (CEPIS, 1973)

2.2.4. 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 del caudal de agua coagulada con que se trabaja en la PTAP.

Los parámetros de operación de floculación en una PTAP, como regla del ingeniero, tienen que estar siempre ajustados con los parámetros óptimos obtenidos mediante prueba de jarras, ya que así se garantiza mayor eficiencia en el proceso. Es necesario monitorear y realizar pruebas de jarras de forma periódica en las PTAP evaluando las condiciones de calidad del agua afluyente (pH, turbidez, color, alcalinidad, temperatura), frente a los parámetros de operación con los cuales se está trabajando y así decidir si se está operando de una manera adecuada la floculación.

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, crecen también 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)

$$K_o = \left[\frac{(d_1 + d_2)^3}{6} \right] \left(\frac{du}{dz} \right) \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

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

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

$K_o = K_{ij}$

Una expresión 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 μ , como se aprecia en la ecuación 9. (Ministerio de Vivienda, 2010)

$$G = \sqrt[2]{\frac{P}{\mu V}} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

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

V = Volumen del reactor, m^3

μ = Viscosidad dinámica del fluido en m^2/s .

Para los floculadores hidráulicos, la ecuación 10 permite calcular el gradiente de velocidad, en ella se relaciona la pérdida de carga entre el tiempo de retención en cada compartimiento de la estructura. Los valores del peso específico (γ) y viscosidad (μ) del agua dependen de la temperatura. (Capacho & Uribe, 2005)

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

Ecuación 10

Donde:

hf=Pérdida de carga en el compartimiento (m)

t_o=Tiempo de retención en el compartimiento en (s)

γ = Peso específico del agua(N/m³)

μ =Viscosidad dinámica del agua (N*s/m²)

Hay diversas expresiones para el cálculo del gradiente de velocidad dependiendo del tipo de floculador, un ejemplo de esto resulta en observar la ecuación 10, donde la pérdida de carga es el factor que proporciona la agitación en el sistema.

Mientras que en un floculador de tipo mecánico como el mezclador recíprocante de la PTAP-Floridablanca, el cálculo de gradiente de velocidad se puede obtener por medio de la ecuación 11, la cual involucra las características geométricas de las paletas que agitan la masa de agua, el volumen de cada recámara del reactor y el diámetro del volante que reduce las revoluciones del motor, ver figura 4 .(CEPIS, 1973)

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

Ecuación 11

Donde:

Cd = coeficiente de arrastre se recomienda usar un valor 3.0

D = diámetro del volante (m)

A = Área transversal de las paletas (m²)

V= volumen del compartimiento (m³)

μ = Viene expresado en Poises (g(s·cm)⁻¹)

n = Numero de revoluciones (rps)

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 para la floculación normalmente entre 10 y 40 minutos. Mediante ensayos de pruebas de jarras se puede determinar este tiempo. La permanencia del agua en el floculador durante un tiempo menor o superior al óptimo reduce la eficiencia de la floculación, cuanto más se aleje este del tiempo óptimo de floculación.(Cánepa de Vargas, 2004)

Debe garantizarse que el tiempo de contacto en la unidad sea el suficiente, para permitir que los flóculos alcancen el tamaño y peso adecuado, lo cual es función de la dosis, el gradiente de velocidad y el tiempo que se mantenga la agitación en concordancia con la prueba de jarras.(Ministerio de Vivienda, 2010)

Variación del Caudal.

Cuando se modifica el caudal de operación en una PTAP, se alteran también el gradiente de velocidad y el 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)

2.2.5. Tipos de Flujo

Desde un enfoque hidráulico se pueden presentar dos tipos de flujo en las unidades de tratamiento de una potabilizadora. El flujo puede ser discontinuo o continuo dependiendo del reactor que realiza el tratamiento al agua.

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, después que termina el proceso se vacía el reactor y se repite el proceso. Este tipo de flujo no es común en las plantas de tratamiento de agua potable, solo es utilizado en la prueba de jarras.

Flujo Continuo

El flujo continuo se tiene cuando un fluido pasa de un reactor a otro de forma directa o continua sin necesidad de vaciar o frenar los procesos. Dentro del flujo continuo se pueden presentar los siguientes tipos de flujo.

- **Flujo de Pistón**

Es 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, un ejemplo es el floculador hidráulico de pantallas.

- **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 mida a la salida será igual a la concentración en cualquier parte del floculador(Cánepa de Vargas, 2004).

- **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 la recirculación del fluido. En los floculadores, estas fallas hidráulicas deterioran notablemente la eficiencia de formación del floc y como resultado, el deterioro en la eficiencia de las etapas posteriores a la floculación.

2.2.6. Análisis de las Características Hidráulicas de un Floculador.

Las características hidráulicas de un floculador se pueden analizar por medio de la interpretación de resultados del estudio de trazabilidad. Este ensayo permite obtener un diagnóstico general de las falencias hidráulicas que puedan presentarse en un floculador. Existen varios modelos que permiten interpretar los resultados obtenidos por el trazador, como el método propuesto por los ingenieros Wolf & Resnick, el análisis de la curva de tendencia del trazador y el índice de Morril (Pérez, 1992)

Ensayo de trazadores

La prueba con trazadores es un ensayo muy útil y práctico en las PTAP que permite diagnosticar el estado hidráulico de una unidad de tratamiento. Consiste básicamente en verter una dosis de una sustancia trazadora antes de la entrada al floculador, con el propósito de registrarla concentración de la sustancia desde el momento en que se adiciona la sustancia trazadora, hasta que salga toda del dispositivo.

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.

Se pueden usar ácidos como el clorhídrico y el benzoico y otras sustancias químicas como alizarim, sapirol, naptol. El uso de isótopos 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)

Maldonado (2000) recomienda el uso de sustancias iónicas, como el cloruro de sodio (NaCl), para la prueba de trazadores en la evaluación hidráulica de los dispositivos de tratamiento en una PTAP, debido a que esta sustancia es de fácil acceso, bajo costo y es estable en bajas concentraciones.

Modo de Aplicación del Trazador.

La tabla 2 muestra y describe las dos formas de aplicación del trazador. Allí se indica como calcular la cantidad de trazador a usar y la dosis a suministrar en cada uno de los tipos de dosificación, se indica además la duración de la prueba en cada forma de aplicación.

Tabla 2 Formas de Aplicar o Dosificar el Trazador Fuente (Maldonado, 2000)

| Dosificación instantánea | Dosificación continua |
|---|--|
| <p>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</p> | <p>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.</p> |
| <p>Se aplica en un punto donde se mezcle instantáneamente,</p> | <p>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.</p> |
| <p>La cantidad de trazador P(Kg) se determina mediante la siguiente ecuación:</p> $P = \frac{V * K * C_0}{I * 10^3}$ <p>Donde :</p> <p>P = Peso del trazador en Kg V = Volumen Útil del Floculador en m^3. K = Constante de Corrección. C_0 = Concentración Inicial en $\frac{mg}{l}$ o $\frac{g}{m^3}$ I = Grado de Pureza del Trazador, fracción de la unidad.</p> <p>$K = \frac{\text{Peso NaCl}}{\text{peso Cl}} = \frac{23 + 35,5}{35,5} = 1,65$</p> | <p>La dosis de trazador P(Kg/h) se determina mediante la siguiente ecuación:</p> $P = \frac{Q * K * C_0}{I * 10^3}$ <p>Donde :</p> <p>P = Dosis del trazador en Kg/h Q = Caudal de la unidad por evaluar en $\frac{m^3}{seg}$ K = Constante de Corrección. C_0 = Concentración Inicial en $\frac{mg}{l}$ o $\frac{g}{m^3}$ I = Grado de Pureza del Trazador, fracción de la unidad.</p> |

Análisis de datos

El análisis de datos obtenidos de un ensayo de trazadores, se puede realizar aplicando el método propuesto por los ingenieros Wolf & Resnick, el análisis de

la curva de tendencia del trazador y el índice de Morril los cuales se describen a continuación.

Modelo de Wolf & Resnick.

El modelo de Wolf & Resnick es un modelo empírico que se utiliza 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 & Resnick se procesan los datos experimentales con el fin de calcular las fracciones $1-F(t)$ y t/t_0 , donde t_0 corresponde al TRH teórico al cual se opera el floculador y $1-F(t)$ se calcula con la ecuación 12.

$$F(t) = \frac{\sum(C-C_0)*100}{\sum_m(C-C_0)} \tag{Ecuación 12}$$

Donde

C = concentración de trazador medida en el tiempo t

C₀ = concentración de trazador en el tiempo cero (inicio del ensayo)

$\sum_m(C - C_0)$ = sumatoria de todos los valores (C-C₀)

Los valores de $1-F(t)$ y t/t_0 se grafican en escala semilogaritmica y permite determinar las variables θ y α que facilitan el cálculo de las fracciones de flujo a pistón (P), mezcla completa (M) y zonas muertas (m) de acuerdo a las ecuaciones 13 a 16:

$$p = \frac{\theta \tan \alpha}{0.435 + \theta \tan \alpha} \tag{Ecuación 13}$$

$$P = p(1 - m) \tag{Ecuación 14}$$

$$M = (1 - p) * (1 - m) \tag{Ecuación 15}$$

$$m = 1 - (\theta/p) \tag{Ecuación 16}$$

Los valores de las incógnitas θ y $\tan \alpha$ se obtienen de la curva t/t_0 vs $1-F(t)$ en escala semilogaritmica, como se muestra en la figura 5.

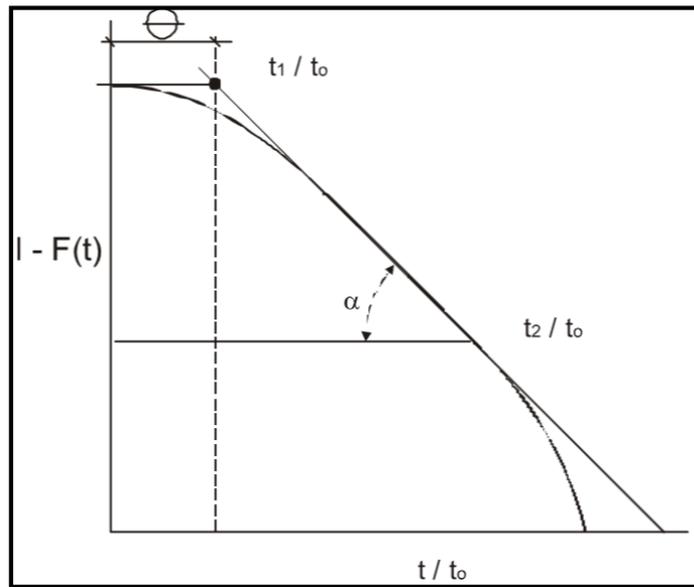


Figura 5 Curva $(1 - F(t))$ cantidad de trazador que permanece en el Reactor.
Fuente(Maldonado, 2000)

En la curva, θ es igual a t_1/t_0 y $\tan \alpha$ se determina con la siguiente ecuación:

$$\tan \alpha = \frac{1}{\frac{t_2 - t_1}{t_0 - t_0}} \quad \text{Ecuación 17}$$

El método de Wolf & Resnick permite diagnosticar las fracciones de flujo presentes en las unidades de mezcla de tratamiento en una potabilizadora.

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).

Capacho & Uribe(2005)usaron la curva de tendencia de Gauss para el análisis hidráulico en los floculadores de una PTAP, este modelo les permitió determinar la eficiencia en el sistema y poder relacionar distintos parámetros con las condiciones de flujo que se presentan en un floculador.

Básicamente, en la prueba de trazadores 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 6)

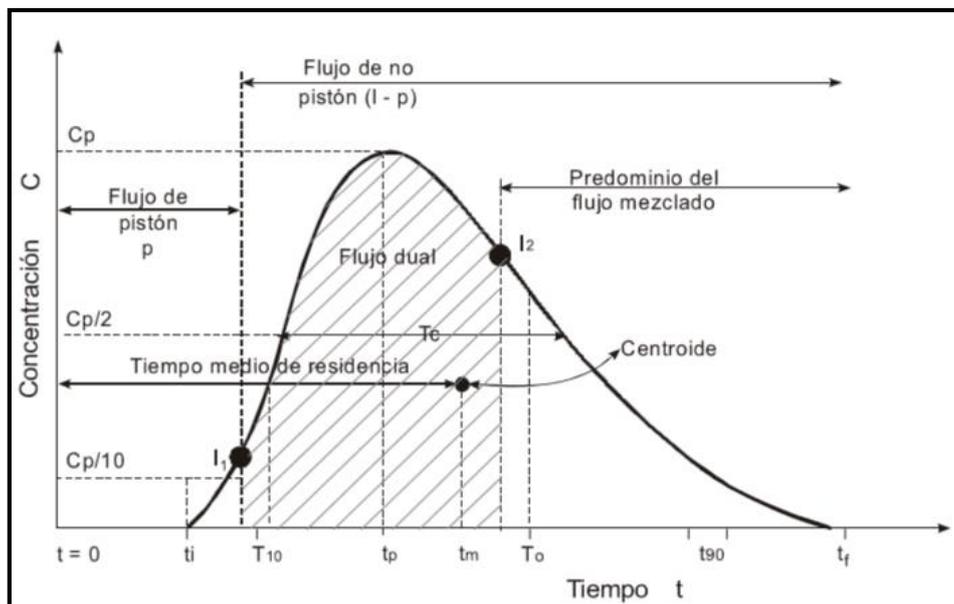


Figura 6 Concentración del Trazador en el Efluente de un Reactor. Fuente(Pérez, 1992)

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 obtiene los tiempos de aparición del trazador, de máxima concentración, el tiempo en que atraviesa la totalidad trazador y el tiempo de concentración (T_c) máxima de la sustancia.

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
Fuente(Pérez, 1992)

| Parámetros Principales | Definición |
|------------------------|---|
| 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. |

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

Tabla 4. Análisis de la curva de Gauss. Fuente (Álvarez, 2014) tomado de (Pérez, 1992)

| Análisis de la curva de tendencia del trazador | |
|--|---|
| $t_p/t_o \approx 0$ | 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 |

Índice de Morril

Del estudio de trazadores se puede obtener el índice de Morrill, al graficar el porcentaje de trazador que sale del reactor vs el tiempo de duración de la prueba (Ver figura 7).

El índice de Morrill está dado por la relación del tiempo en que atraviesa el 90 % de la totalidad del trazador y el tiempo que pasa el 10 % de trazador por el dispositivo, como se presenta en la ecuación 18.

$$\text{índice de Morrill} = \frac{\text{tiempo en que pasa el 90\%}}{\text{tiempo en que pasa el 10 \%}} \quad \text{Ecuación 18}$$

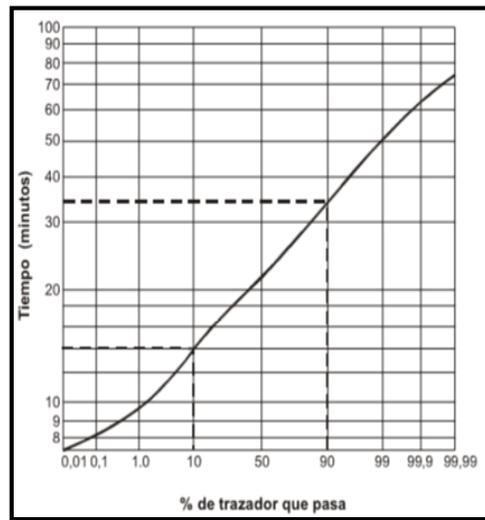


Figura 7 Índice de Morrill Fuente (Pérez, 1992)

3. METODOLOGÍA

La metodología de este proyecto se desarrolló en tres fases.

3.1. *Fase 1: Obtención en laboratorio de los parámetros óptimos de floculación (gradientes y tiempos de mezcla lenta) para los coagulantes empleados en planta.*

Se realizaron pruebas de jarras para distintas calidades de agua, con los coagulantes utilizados en la PTAP-Floridablanca: sulfato de aluminio o alumbre y policloruro de aluminio PAC. Se modificaron las velocidades de agitación y los tiempos de mezcla en los equipos de jarras, con el fin de obtener e gradiente y el tiempo que produce una mejor calidad en el floc y con esto justificar el uso del tipo de coagulante en base a la calidad del agua afluyente a la planta.

El agua cruda para realizar las pruebas de jarras fueron recolectadas en la PTAP-Floridablanca, aguas arriba de la canaleta Parshall y posteriormente transportada al laboratorio de agua potable de la Universidad Pontificia Bolivariana. El agua cruda fue evaluada con los siguientes parámetros iniciales; pH, Alcalinidad, Turbiedad, Color y Temperatura.

El pH se midió con el equipo multiparámetro marca HACH HQ 40 d – multi. La medición de turbiedad se efectuó con un turbidímetro marca HACH 2100 Q que reporta las mediciones en unidades nefelométricas (UNT), el equipo está calibrado hasta 800 UNT y con una sensibilidad de hasta 0.2 UNT. El color se determinó con el equipo marca HACH propiedad del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, localizado en la PTAP-Floridablanca. Este equipo reporta y está calibrado hasta 568 unidades platino cobalto (UPC). La alcalinidad del agua se determinó de acuerdo al método estándar potenciométrico. Se toman 250 ml de agua cruda y se mide inmediatamente el pH, después se adiciona lentamente ácido clorhídrico (HCl) concentrado 0,1N, hasta llegar a un valor de pH de 4,5. La alcalinidad de la muestra se podrá calcular con la ecuación 19.

$$\text{Alcalinidad} = \frac{V_a * N * 50000}{V_m} = \text{ppm de CaCO}_3 \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde:

V_a= Volumen gastado del HCl en la titulación en ml

N = Normalidad del HCL

V_m= Volumen de la muestra.

3.1.1. Determinación de la dosis óptima del coagulante.

Se determinó la dosis óptima de coagulante para distintas calidades de agua cruda. Se prepararon los coagulantes con base en el porcentaje de alúmina (Al₂O₃), presentes en el Alumbre y el PAC. Para cada ensayo de dosis óptima se prepararon 100 ml de coagulante al 1%, teniendo en cuenta la concentración y la densidad de los coagulantes empleados en la PTAP-Floridablanca que son presentados en la tabla 5

Tabla 5. Concentración de los Reactivos.

| Coagulantes (líquidos) | Concentración Alúmina en los coagulantes [%] | Densidad del coagulante g/ml |
|-------------------------|--|------------------------------|
| Sulfato de aluminio | 7,3 | 1,34 |
| Policloruro de aluminio | > 19 | 1,3 |

Para el ensayo de dosis óptima de coagulante se utilizó un equipo de jarras marca Phipps & Bird, el cual fue programado con las velocidades de agitación y tiempos de mezcla que se muestra en la figura 8.



Figura 8. Esquema con las condiciones de mezcla del equipo de jarras

Se experimentó con diferentes dosis de alumbre y PAC desde 0,5- 40 ppm dependiendo de la turbiedad del agua cruda. Después de preparado el coagulante al 1% y llenado todas las jarras a un litro, se llenaban las jeringas con diferentes volúmenes, abarcando dosis bajas entre 0,5 -8 ppm y dosis altas, 10-40 ppm, buscando la sobredosis del producto.

La adicción del coagulante se realizó con jeringas, de forma simultánea, en todas las jarras. Una vez terminados los procesos de coagulación –floculación y

sedimentación, se procedió a extraer 30 mililitros de cada jarra, purgando las mangueras antes de extraer la muestra, se filtró cada muestra, finalizando con la medición de turbiedad remanente y color verdadero. La dosis óptima de coagulante se obtuvo graficando los datos dosis de coagulante vs turbiedad remanente, en esta grafica se escoge la dosis óptima del coagulante en función del punto que ofreció el menor remanente de turbiedad

Velocidades y Tiempos de Floculación Seleccionados para la Prueba de Jarras (Parámetros Óptimos)

Los parámetros de operación para los equipos de jarras se escogieron basándose en los rangos de operación de los floculadores hidráulico y reciprocante de la PTAP-Floridablanca.

Los gradientes de velocidad para jarras cuadradas llenadas a un litro y las velocidades de agitación programados en los equipos de jarras se presentan en la tabla 6.

Tabla 6. Velocidades de agitación en los equipos de jarras.

| RPM | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 |
|-----------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| G (s⁻¹) | 4,45 | 10,57 | 17,55 | 25,15 | 33,24 | 41,75 | 50,62 |

El tiempo de floculación evaluados en las pruebas de jarras fueron desde 5 hasta 65 minutos, variándose el tiempo de floculación cada 5 minutos para cada gradiente mencionado.

Después de cumplido el tiempo de mezcla seleccionado para cada jarra, se dejó sedimentar la muestra durante 10 minutos. Cumplido el tiempo de sedimentación se midió la turbiedad y color residual.

Con los datos obtenidos se graficó el tiempo de floculación vs turbiedad residual para todas las velocidades de agitación. De esta grafica se seleccionaron los puntos en las curvas que presentaron la mejor remoción de turbiedad en un tiempo acorde a las unidades de tratamiento de la PTAP-Floridablanca.

Se aplicó el método de (Villegas, R. A. y Letterman, 1976) obteniéndose así la ecuación que representa los rangos óptimos de gradiente de velocidad y tiempo de floculación para una determinada calidad de agua.

3.2. Fase 2: Determinación en la Planta de Tratamiento de Agua potable de Floridablanca los parámetros de floculación (Gradientes y Tiempos de mezcla) en condiciones de operación.

Tiempos de mezcla y tipos de flujo

Para determinar el tiempo de mezcla real y el tipo de flujo en los floculadores, se realizaron estudios de trazadores en cada una de las unidades de floculación.

La sal fue la sustancia seleccionada, ya que es práctico su uso, es de bajo costo y no representa un riesgo para la salud humana en una concentración adecuada para el ensayo.

Se construyó una curva de calibración para el trazador, relacionando la dosis de sal adicionada y la conductividad en el agua. Se elaboró la curva de calibración, recolectando agua cruda de la PTAP-Floridablanca y agregando sal hasta llegar al punto de conductividad, el cual fue de 500 uS/cm, a esta conductividad la dosis de sal no representa un riesgo para la salud. Con la dosis de trazador hallada, se determinó la cantidad de trazador requerida en cada floculador teniendo en cuenta el volumen de las unidades y el caudal de operación de la planta.

Se halló la cantidad de sal, multiplicando la dosis del trazador por el volumen de cada unidad de floculación y se determinó el tiempo de la prueba de trazadores multiplicando 3 veces el tiempo de retención teórico como lo sugiere Pérez, 1992.

Durante el tiempo determinado de duración de la prueba se recogieron muestras cada 2 minutos midiendo la conductividad inmediatamente.

El trazador se aplicó de forma instantánea en las dos unidades de floculación de la PTAP- Floridablanca, aprovechando la mezcla rápida en cada sección de la planta. Se registró la conductividad a la salida de cada floculador durante el tiempo calculado.

Para el análisis de datos se utilizó el modelo matemático desarrollado por Wolf & Resnick, el análisis de la curva de tendencia del trazador y el índice de Morrill, mencionados anteriormente (Ver numeral 2.2.6). Con estos se obtuvieron tiempos de mezcla reales en cada floculador de la planta como también los tipos de flujo presentes en cada dispositivo.

3.2.1. Gradientes Reales en Planta

Se midieron las dimensiones de los tanques de floculación y los componentes de los dispositivos de mezcla lenta en cada una de las secciones de la PTAP.

Para calcular los gradientes reales en cada compartimiento del floculador mecánico de balancín recíprocante ubicado en la sección 1 de la planta, se requirió medir el volumen del tanque, el área de las paletas rectangulares de madera en cada compartimiento, registrar el número de revoluciones por minuto de cada motor para cada reductor de velocidad, registrar la temperatura del agua y el caudal de operación.

Para calcular el gradiente de velocidad en el floculador hidráulico de flujo horizontal localizado en la sección 2 de la planta, se midió el volumen del tanque para cada zona de la unidad con dos diferentes caudales, se calculó la pérdida de carga para cada zona y se registró la temperatura del agua.

Después con los datos obtenidos en las mediciones de los floculadores en cada sección de la planta, se calcularon los gradientes reales en condiciones de operación mediante las ecuaciones (10) y (11) propias para cada tipo de floculador.

3.3. Fase 3: *Formulación de alternativas para el mejoramiento de la floculación en la PTAP-Floridablanca.*

Con los resultados obtenidos del estudio de trazadores y las pruebas realizadas en el laboratorio se pudo establecer las pautas para la correcta operación en la mezcla lenta.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación se presentan los resultados y el análisis en cada etapa de la investigación.

4.1. Ensayos en laboratorio.

Se realizaron 2 tipos de ensayos de jarras para la obtención de los parámetros óptimos de floculación. A continuación se presentan los resultados obtenidos para los ensayos; dosis óptima del coagulante y ensayo de determinación de los parámetros óptimos con cada coagulante.

4.1.1. Dosis óptima de los coagulantes.

Se realizaron pruebas de jarras para distintas calidades de agua cruda recolectadas de la PTAP-Floridablanca, teniendo en cuenta valores de alta y baja turbiedad.

Para cada calidad de agua cruda se midieron las características iniciales de pH, turbiedad, color aparente y alcalinidad. La tabla 7 presenta las muestras de agua utilizadas para cada coagulante.

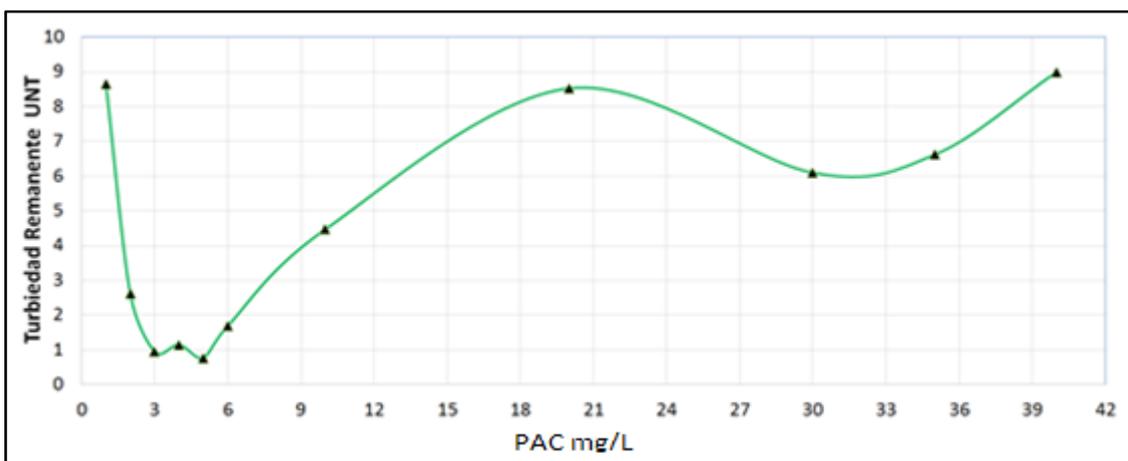
Tabla 7. Muestras de agua utilizadas para la determinación de los parámetros óptimos de floculación

| Sulfato de Aluminio | | | | | Policloruro de Aluminio (PAC) | | | | |
|---------------------|------|-------------|----------------|--------------------------------------|-------------------------------|------|-------------|----------------|--------------------------------------|
| Muestra | pH | Color (UPC) | Turbidez (UNT) | Alcalinidad (mg/lCaCO ₃) | Muestra | pH | Color (UPC) | Turbidez (UNT) | Alcalinidad (mg/lCaCO ₃) |
| 1 | 7,15 | 553 | 48,8 | 24 | 6 | 7,51 | 553 | 180 | 23 |
| 2 | 7,08 | 2534 | 729 | 40 | 7 | 7,45 | 1137 | 732 | 23 |
| 3 | 7,04 | 605 | 330 | 40 | 8 | 7,21 | 521 | 320 | 32 |
| 4 | 7,32 | 249 | 164 | 30 | 9 | 7,10 | 113 | 51,2 | 28 |
| 5 | 7,45 | 249 | 13 | 36 | 10 | 7,58 | 125 | 12 | 22 |

Para cada calidad de agua, se determinó la dosis óptima de cada coagulante teniendo en cuenta la turbiedad mínima obtenida y el valor máximo aceptado en la Resolución 2115 de 2007 que establece un valor máximo aceptable de 2 UNT.

En la gráfica 1 se puede observar la dosis óptima de coagulante para la muestra 6 la cual fue de 3 mg/L de PAC, con esta dosis se logra obtener 0,95 UNT de turbidez residuales.

La muestra 6 se caracteriza por tener una turbiedad inicial de 180 UNT y un color aparente de 553 UPC, una alcalinidad de 23 mg/L de CaCO₃ y un pH de 7,51.



Gráfica 1. Dosis óptima PAC

De igual forma, se obtuvo la dosis óptima de coagulante para cada muestra de agua evaluada, obteniéndose los valores presentados en la tabla 8.

Tabla 8. Dosis óptima de coagulante

| Muestra | Alumbre (mg/L) | Turbiedad Inicial (UNT) | Turbiedad Final (UNT) | Turbiedad Removida % | Turbiedad Remanente % | Muestra | PAC (mg/L) | Turbiedad Inicial (UNT) | Turbiedad Final (UNT) | Turbiedad Removida % | Turbiedad Remanente % |
|---------|----------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|---------|------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| 1 | 4 | 48,8 | 0,6 | 98,7 | 1,3 | 6 | 3 | 180 | 0,81 | 99,5 | 0,5 |
| 2 | 8 | 729 | 1,5 | 99,7 | 0,2 | 7 | 6 | 732 | 0,65 | 99,9 | 0,1 |
| 3 | 6 | 330 | 2 | 99,3 | 0,7 | 8 | 4 | 320 | 0,94 | 99,7 | 0,3 |
| 4 | 4,2 | 164 | 1,02 | 99,3 | 0,7 | 9 | 1,2 | 51,2 | 0,87 | 98,3 | 0,7 |
| 5 | 1,8 | 13 | 0,87 | 93,3 | 5,6 | 10 | 2,4 | 12 | 0,4 | 96,6 | 3,4 |

De acuerdo a los resultados, el sulfato de aluminio líquido requirió dosis óptimas entre 1 y 8 mg/L y el policloruro de aluminio líquido entre 1 y 6 mg/L. La sobredosis del reactivo se originaba cuando se superaban las 20 mg/L en el sulfato de aluminio y los 14 mg/L en el PAC.

La muestra 6 alcanza el mayor porcentaje de remoción de turbiedad, obteniéndose un 99,9 % de la turbidez removida en esta muestra, la cual fue tratada con el coagulante PAC, mientras que en la muestra 2 de similar turbiedad, el sulfato de aluminio consigue remover el 99,7 % de la turbiedad de la muestra.

Los coagulantes empleados en la PTAP-Floridablanca consiguen una alta eficiencia en remoción de turbiedad y color a causa del porcentaje de alúmina (Al_2O_3) presente en los productos para coagulación alumbre y pac, 7,3% de alúmina (Al_2O_3) en el alumbre y >19 % de alúmina en el policloruro. Preparar en solución al 1 % los productos empleados para la coagulación-floculación en la planta, logra una mejor dispersión y acción de la alúmina sobre los coloides en la masa de agua.

4.1.2. Parámetros óptimos de floculación obtenidos en laboratorio

Para cada calidad de agua cruda evaluada, se modificaron las velocidades y tiempos de mezcla lenta, con el fin de obtener los parámetros óptimos de floculación en base a las calidades de agua recolectadas. A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los coagulantes evaluados.

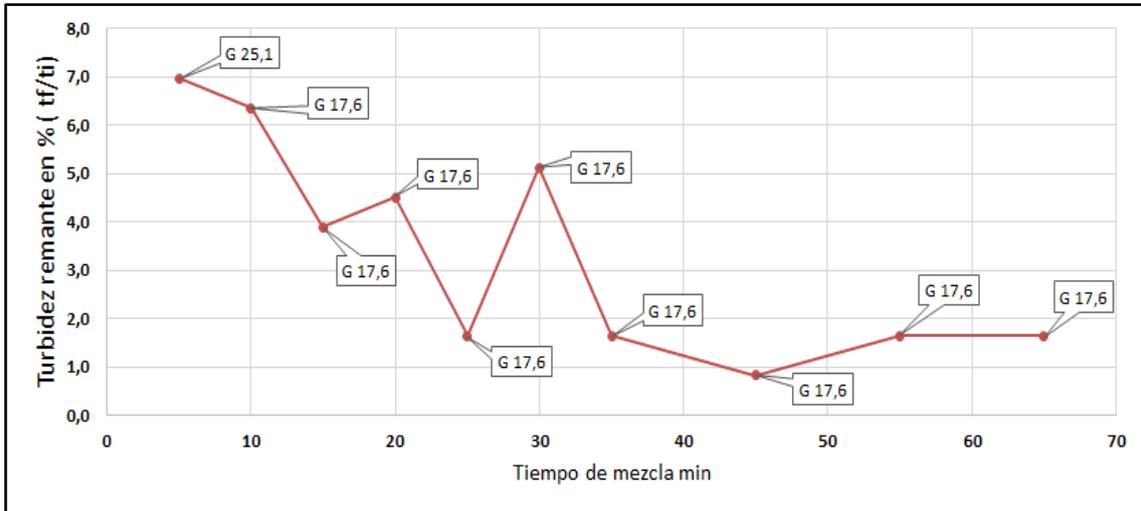
4.1.2.1 Parámetros óptimos de floculación usando el coagulante sulfato de aluminio líquido, concentrado al 1% y preparado en base al contenido de alúmina del coagulante.

La tabla 9 presenta los resultados obtenidos en las pruebas de jarras realizadas en la muestra 1. Véase en la tabla el cambio de la turbiedad residual con respecto al gradiente y tiempo de mezcla lenta.

Tabla 9. Turbiedad residual obtenida con distintos gradientes y tiempos de mezcla, muestra 1.

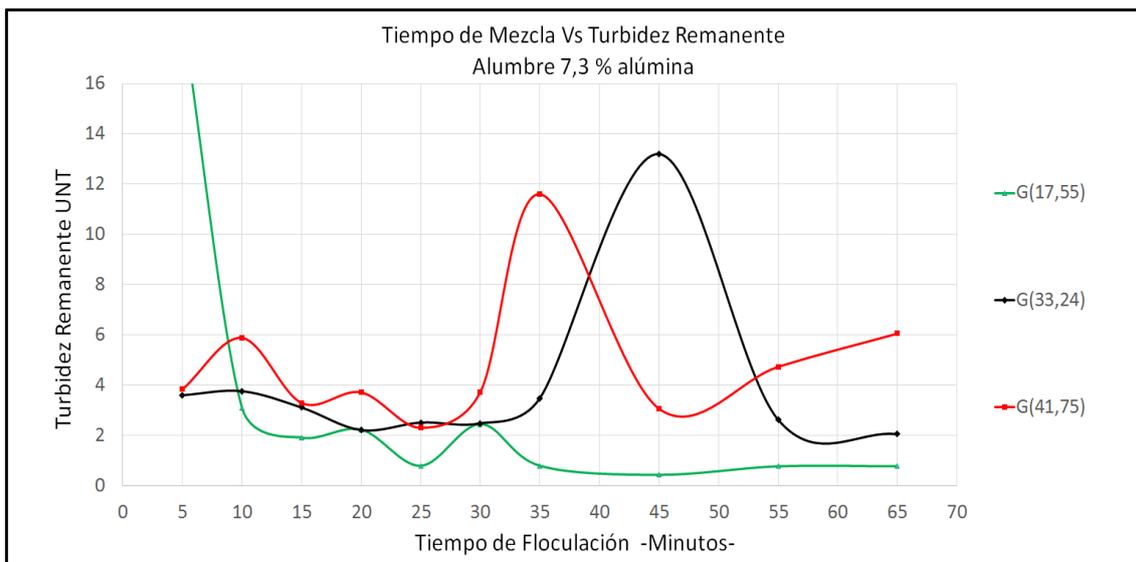
| Gradiente (s-1) | Tiempo de floculación (min) | Tiempo de floculación (min) | | | | | | | | | |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------------|------|-----|------|------|-----|------|------|-----|-----|
| | | (rpm) | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 45 | 55 |
| 10,6 | 20 | 10,1 | 7,9 | 3,6 | 2,3 | 5,6 | 9,6 | 7,7 | 1,2 | 3,0 | 1,1 |
| 17,6 | 30 | 18,8 | 3,1 | 1,9 | 2,2 | 0,8 | 2,5 | 0,8 | 0,4 | 0,8 | 0,8 |
| 25,1 | 40 | 3,4 | 6,0 | 5,0 | 11,5 | 22,7 | 7,8 | 1,8 | 2,9 | 4,1 | 3,3 |
| 33,2 | 50 | 3,6 | 3,8 | 3,1 | 2,2 | 2,5 | 2,5 | 3,5 | 13,2 | 2,6 | 2,1 |
| 41,7 | 60 | 3,8 | 5,9 | 3,3 | 3,7 | 2,3 | 3,7 | 11,6 | 3,1 | 4,7 | 6,1 |
| 50,6 | 70 | 6,5 | 13,1 | 8,3 | 5,3 | 5,6 | 4,5 | 4,2 | 9,3 | 6,1 | 5,6 |

De la tabla 9, para cada tiempo de mezcla, se escogieron los gradientes de velocidad de mayor remoción de turbiedad, a partir de estos se construyó la gráfica 2.



Gráfica 2 . Gradientes de mayor Remoción de Turbiedad

En la gráfica 2 se puede observar el pico de mayor remoción de turbiedad sucede a los 45 minutos con un gradiente de $17,55 \text{ s}^{-1}$ obteniéndose así una remoción de turbiedad del 99,1 %. La gráfica 3 establece el tiempo y gradiente de mezcla óptimos para la muestra 1.



Gráfica 3. Tiempo de Mezcla VS Turbidez Remanente / Turbiedad inicial 48,8 UNT

La grafica 3 muestra tres diferentes velocidades de agitación 41,7, 33,24 y 17,55 s⁻¹, gradientes de mezcla seleccionados por su mayor desempeño en la aglomeración de las partículas. Estos gradientes deben agitar el agua en un tiempo de mezcla de los 15 hasta los 30 minutos lográndose obtener menos de una unidad nefelométrica remanente en la muestra.

La tabla 10 presenta los parámetros óptimos de mezcla lenta. Por medio de la correlación de los valores de los logaritmos del tiempo y gradientes seleccionados se obtiene los valores k y n propios para la muestra evaluada. Se genera la ecuación 20 la cual permite determinar el gradiente o el tiempo óptimo para aguas de condiciones similares a las del ensayo.

Tabla 10. Parámetros Óptimos Turbiedad inicial 48,8 UNT

| (Gⁿ) T = k | | | | | |
|------------------------------|----------|-------------|-------------|---------------|--------------------|
| G | T | logG | logT | n | k |
| 17,55 | 30 | 1,24428 | 1,47712 | 0,7641 | 272,4582733 |
| 33,24 | 20 | 1,52166 | 1,30103 | | |
| 41,75 | 15 | 1,62066 | 1,17609 | | |

$$T = \frac{k}{G^n} = \frac{272,458}{G^{0,7641}} \quad \text{Ecuación 20}$$

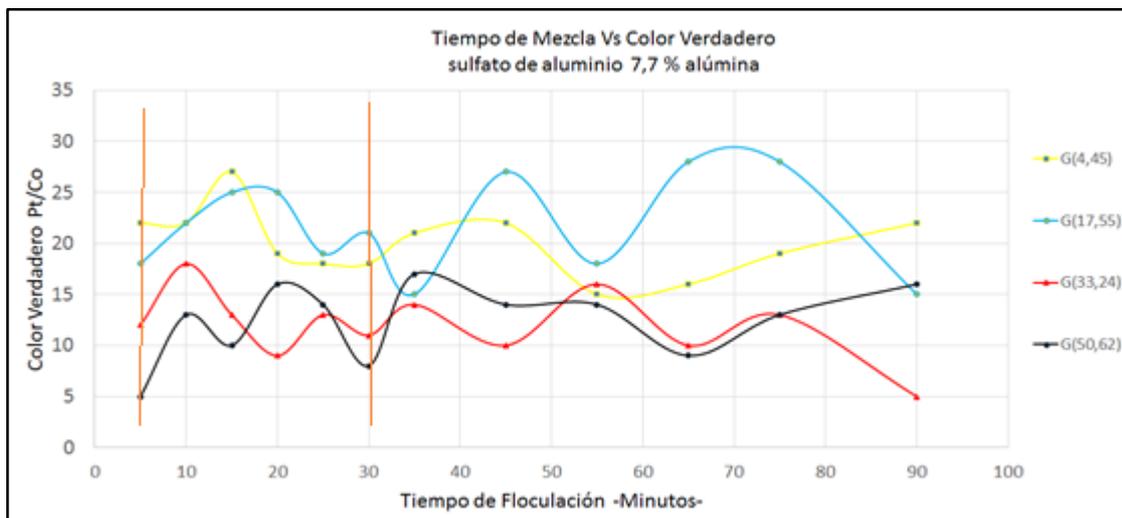
Con estos parámetros óptimos seleccionados se logra la formación de un floc de una concentración estable y ligero de tal modo que la turbiedad remanente será tratada en la etapa de sedimentación.

La tabla 11 presenta los resultados obtenidos de la medición de color residual de la prueba de jarras realizada para la muestra 1.

Tabla 11. Resultados de la Prueba de Jarras / Color Verdadero

| Gradiente | (s-1) | (rpm) | Tiempo de floculación (min) | | | | | | | | | | |
|------------------|--------------|--------------|------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 45 | 55 | 65 | 75 |
| 4,45 | 10 | 22 | 22 | 27 | 19 | 18 | 18 | 21 | 22 | 15 | 16 | 19 | 22 |
| 10,57 | 20 | 12 | 11 | 11 | 12 | 10 | 12 | 12 | 10 | 15 | 12 | 14 | 16 |
| 17,55 | 30 | 18 | 22 | 25 | 25 | 19 | 21 | 15 | 27 | 18 | 28 | 28 | 15 |
| 25,15 | 40 | 18 | 19 | 16 | 12 | 15 | 14 | 14 | 14 | 7 | 10 | 9 | 8 |
| 33,24 | 50 | 12 | 18 | 13 | 9 | 13 | 11 | 14 | 10 | 16 | 10 | 13 | 5 |
| 41,75 | 60 | 19 | 18 | 14 | 17 | 13 | 19 | 15 | 14 | 12 | 16 | 14 | 8 |
| 50,62 | 70 | 5 | 13 | 10 | 16 | 14 | 8 | 17 | 14 | 14 | 9 | 13 | 16 |

Con los resultados reportados en la tabla 11 se grafican el color residual vs la turbiedad remanente, de esta grafica se puede observar la variación del color residual frente a distintos periodos y gradientes de velocidad.



Gráfica 4. Tiempo de Mezcla VS Color Verdadero / Color Aparente 553

Se puede observar a los 5 minutos en la gráfica 4, se obtiene una remoción del color de hasta el **99 %** con un gradiente de $50,62 \text{ s}^{-1}$, se observa que los porcentajes disminuyen en cuanto se reduce la velocidad de agitación, esto quiere decir que requiere de velocidades altas de mezcla para lograr una óptima floculación en la muestra 1.

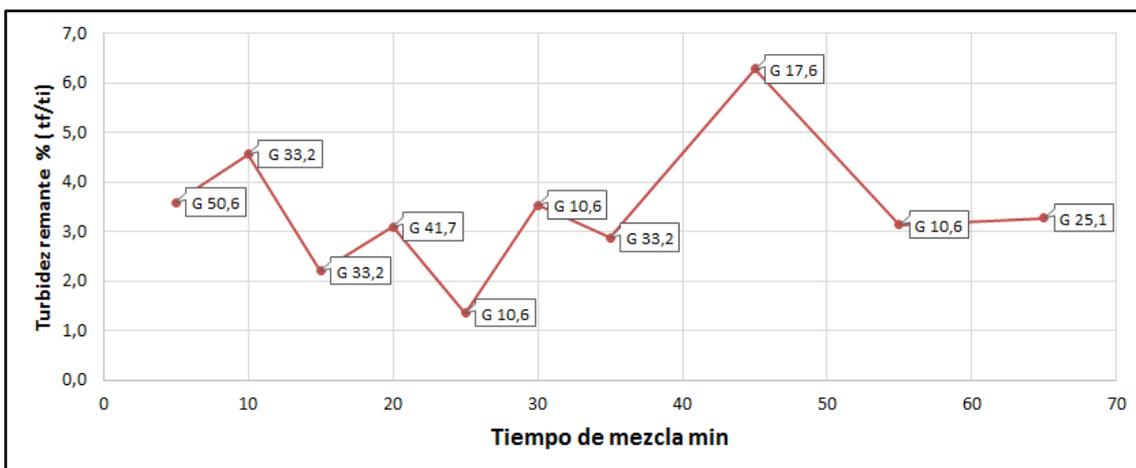
Los resultados de turbiedad residual obtenidos para la muestra 2 se muestran en la tabla 12.

Tabla 12. Variación de la turbiedad residual con los parámetros de mezcla lenta para la muestra 2.

| Gradiente (s-1) | Tiempo de floculación (min) | | | | | | | | | | |
|--------------------|-----------------------------|------|------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | (rpm) | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 45 | 55 | 65 |
| 10,6 | 20 | 64,7 | 64,1 | 52,2 | 22,6 | 9,9 | 77,2 | 55,4 | 45,8 | 60,4 | 59,3 |
| 17,6 | 30 | 30,1 | 39,6 | 41,9 | 87,1 | 28,2 | 46,1 | 21,0 | 50,1 | 22,9 | 78,7 |
| 25,1 | 40 | 33,4 | 56,7 | 42,0 | 30,0 | 41,5 | 60,2 | 41,5 | 61,7 | 23,4 | 23,9 |
| 33,2 | 50 | 27,6 | 33,3 | 53,3 | 140,0 | 42,7 | 25,8 | 112,0 | 80,6 | 156,0 | 113,0 |
| 41,7 | 60 | 43,3 | 60,9 | 16,1 | 50,9 | 87,7 | 119,0 | 31,4 | 111,0 | 132,0 | 64,3 |
| 50,6 | 70 | 26,2 | 52,6 | 65,2 | 89,5 | 83,0 | 81,6 | 45,3 | 69,4 | 139,0 | 90,9 |

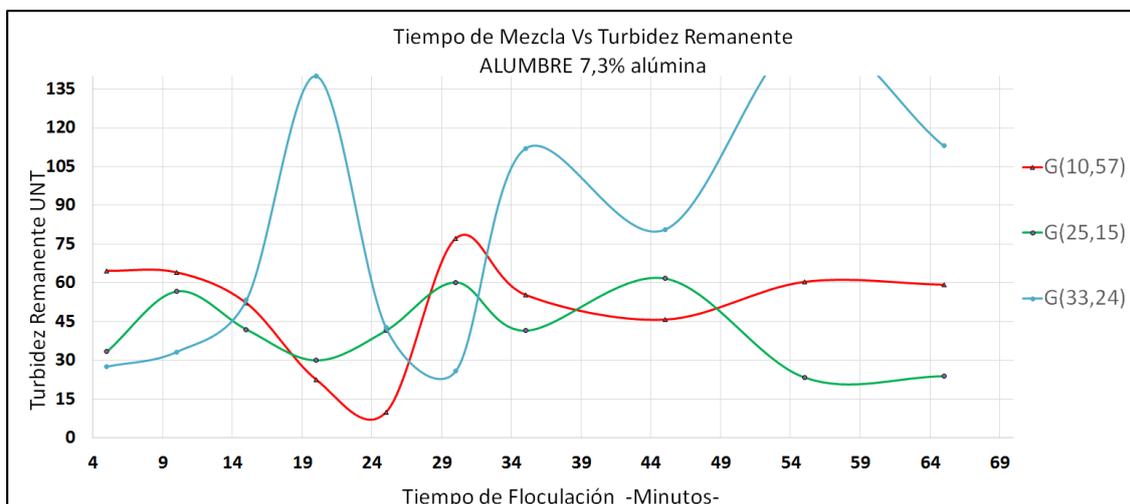
De la tabla 12 de cada tiempo de mezcla se seleccionaron los gradientes de mayor remoción de turbiedad y se construyó la gráfica 5, esta señala una alta

eficiencia remocional graduando de forma decreciente la velocidad de agitación desde el gradiente de 50,6 s⁻¹.



Gráfica 5. Gradientes de mayor remoción de turbidez.

En base a los resultados obtenidos y registrados en la tabla 11 se construye la gráfica 6, esta muestra las curvas de gradiente óptimas seleccionadas 33,24 - 25,15 - 10,6 s⁻¹, siendo velocidades de agitación suaves en comparación con la muestra 1, diferenciando la gran concentración de turbiedad presente en la muestra 2.



Gráfica 6. Tiempo de Mezcla VS Turbiedad Remanente / Turbiedad inicial 729 UNT

Con los valores de las curvas de gradiente de velocidad y tiempo de mezcla se creó la tabla 13, la cual muestra los parámetros óptimos seleccionados de la gráfica 6. Por medio de la correlación de los valores de la tabla 13 se obtiene la

ecuación que modela el gradiente y tiempo de mezcla óptimo para una turbiedad de 729 UNT.

Tabla 13. Parámetros Óptimos Turbiedad inicial 729 UNT

| (G^n) T = k | | | | | |
|-------------|----|---------|---------|---------------|--------------------|
| G | T | logG | logT | n | k |
| 10,57 | 24 | 1,02407 | 1,38021 | 0,4375 | 68,54882265 |
| 25,15 | 18 | 1,40054 | 1,25527 | | |
| 33,24 | 14 | 1,52166 | 1,14613 | | |

Gradientes fuera del rango entre 33,2 – 10,6 s⁻¹ dificultan la floculación. La siguiente ecuación establece el tiempo y gradiente óptimo de floculación a partir turbiedades cercanas a 729 UNT.

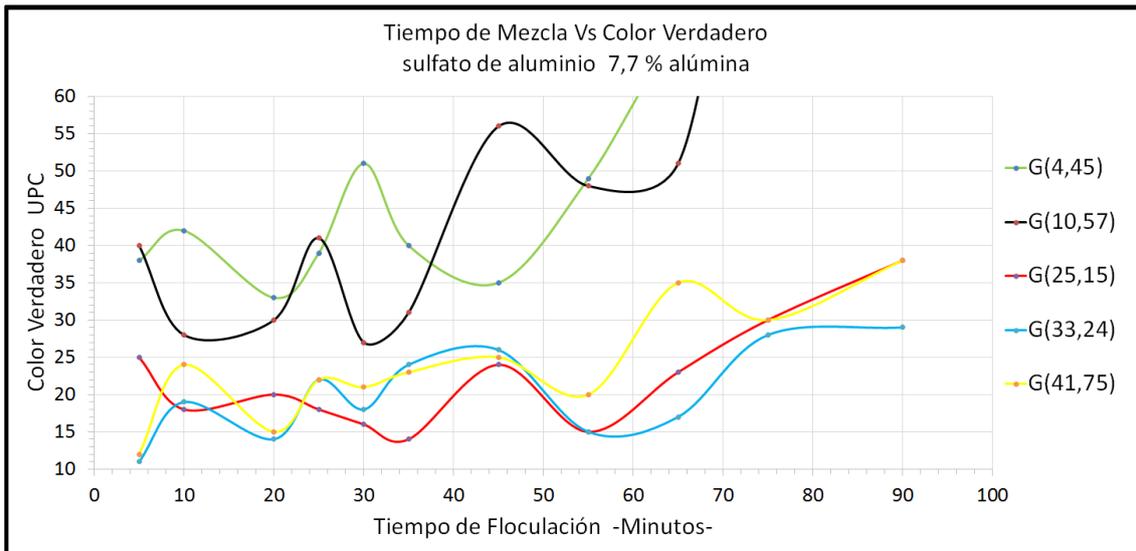
$$T = \frac{k}{G^n} = \frac{68,5488}{G^{0,4375}} \quad \text{Ecuación 21}$$

De la prueba de jarras realizada se reporta en la tabla 14 los valores de color residual. Se seleccionaron las curvas de acuerdo al gradiente y tiempo de mezcla óptimos seleccionados.

Tabla 14 : Resultados de la Prueba de Jarras / Color Verdadero

| Gradiente | | Tiempo de flocucion (min) | | | | | | | | | | |
|-----------|-------|---------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| (s-1) | (rpm) | 5 | 10 | 20 | 25 | 30 | 35 | 45 | 55 | 65 | 75 | 90 |
| 4,45 | 10 | 38 | 42 | 33 | 39 | 51 | 40 | 35 | 49 | 68 | 74 | 63 |
| 10,57 | 20 | 40 | 28 | 30 | 41 | 27 | 31 | 56 | 48 | 51 | 96 | 67 |
| 17,55 | 30 | 28 | 55 | 45 | 75 | 46 | 42 | 46 | 38 | 47 | 53 | 42 |
| 25,15 | 40 | 25 | 18 | 20 | 18 | 16 | 14 | 24 | 15 | 23 | 30 | 38 |
| 33,24 | 50 | 11 | 19 | 14 | 22 | 18 | 24 | 26 | 15 | 17 | 28 | 29 |
| 41,75 | 60 | 12 | 24 | 15 | 22 | 21 | 23 | 25 | 20 | 35 | 30 | 38 |
| 50,62 | 70 | 18 | 25 | 25 | 23 | 19 | 20 | 17 | 24 | 15 | 20 | 20 |

A partir de los datos de la tabla 14, se obtiene la gráfica 7, ella muestra el cambio en el color residual para diferentes tiempos y gradientes de mezcla.



Gráfica 7. Tiempo de mezcla VS Color Verdadero / Color Aparente 2534

La remoción del color se da con gradientes de mezcla entre 41 a 25 s⁻¹. Entre gradientes 4,45 y 10,57 se deteriora la remoción de color residual ver la tendencia de las curvas de color negro y verde alejadas de las demás.

Los resultados obtenidos para la muestra 3 se muestran en la tabla 15.

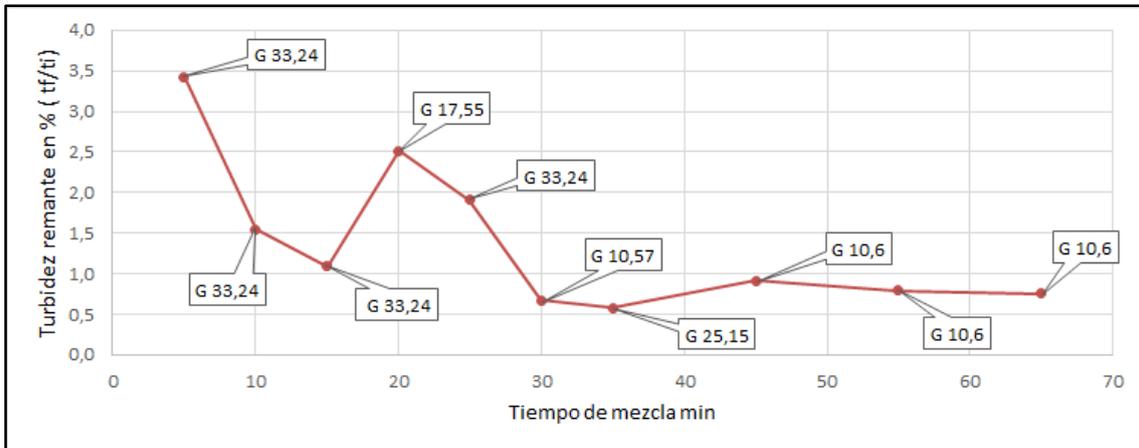
Tabla 15. Resultados de la Prueba de Jarras Turbiedad Residual / Turbiedad inicial 330 UNT

| Gradiente (s-1) | (rpm) | Tiempo de flocucion (min) | | | | | | | | | |
|--------------------|-------|---------------------------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| | | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 45 | 55 | 65 |
| 10,6 | 20 | 18,3 | 17,2 | 6,2 | 6,5 | 13,0 | 2,2 | 2,5 | 3,0 | 2,6 | 2,5 |
| 17,6 | 30 | 18,0 | 16,2 | 5,6 | 8,3 | 14,7 | 70,6 | 6,7 | 9,1 | 15,8 | 12,9 |
| 25,1 | 40 | 23,0 | 5,9 | 11,1 | 69,9 | 53,3 | 31,8 | 1,9 | 4,1 | 8,0 | 7,0 |
| 33,2 | 50 | 11,3 | 5,1 | 3,6 | 8,3 | 6,3 | 36,7 | 57,2 | 53,7 | 64,2 | 88,5 |
| 41,7 | 60 | 17,7 | 29,8 | 31,3 | 65,6 | 68,6 | 51,5 | 300,0 | 381,0 | 487,0 | 551,0 |
| 4,4 | 10 | 51,1 | 31,5 | 15,7 | 12,7 | 8,3 | 7,2 | 12,9 | 13,2 | 7,5 | 21,2 |

Se puede observar a los 30 minutos en la tabla 15, la mayor eficiencia remocional del sulfato de aluminio del 99,3 % con una velocidad de agitación de 10,6 s⁻¹.

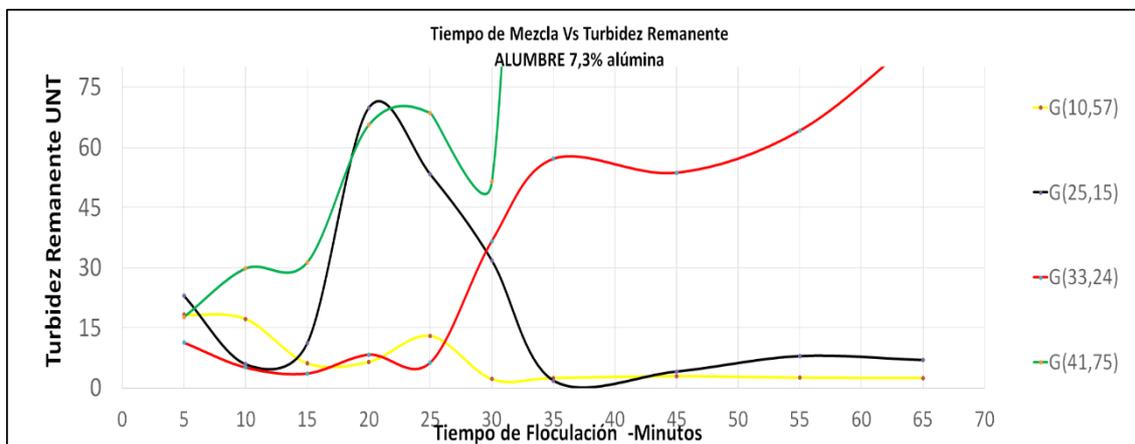
La grafica 8 presenta los porcentajes de turbidez remanente para cada tiempo de mezcla. Se puede observar que la floculación de la muestra sucede con una

mayor eficiencia en remoción de turbidez con una agitación desde un gradiente de $33,24 \text{ s}^{-1}$ de forma decreciente hasta $10,6 \text{ s}^{-1}$.



Gráfica 8 . Gradientes de mayor remoción de turbidez.

La gráfica 9 presenta las curvas de gradiente de velocidad de mayor remoción de la turbiedad. Gradientes óptimos entre $33,24$ hasta $10,6 \text{ s}^{-1}$ de estos rangos de velocidad se seleccionaron los tiempos en donde la remoción de turbiedad se ajusta con los parámetros de norma de calidad y exigencias de la planta.



Gráfica 9. Tiempo de Mezcla VS Turbiedad Remanente / Turbiedad Inicial 330 UNT

La grafica 9 muestra la tendencia del agua a flocularse con velocidades de agitación entre $33,24$ y $10,57 \text{ s}^{-1}$, es decir manteniendo una agitación suave debido al gran contenido de turbiedad presente en la muestra 3. Gradientes mayores como el de $41,75 \text{ s}^{-1}$ curva verde, evidentemente deterioran el proceso y confirman la tendencia de las aguas con turbiedades elevadas deben tratarse con gradientes de mezcla similares a los de las muestras 2 y 3.

La tabla 16 presenta los gradientes y tiempos de mezcla óptimos seleccionados en la gráfica 10.

Tabla 16. Parámetros Óptimos / Turbiedad Inicial 330 UNT

| $(G^n) T = k$ | | | | | |
|---------------|----|----------|-----------|--------|-----------|
| G | T | logG | logT | n | k |
| 10,57 | 23 | 1,024075 | 1,3617278 | 0,6903 | 119,48132 |
| 25,15 | 14 | 1,400538 | 1,146128 | | |
| 33,24 | 10 | 1,521661 | 1 | | |

La ecuación 22 sirve para obtener el tiempo y el gradiente óptimo de floculación, en aguas de turbiedad cercanas a los 330 UNT. Si se pone en práctica debe considerarse también los parámetros iniciales del agua, el pH influye de manera directa sobre la dosis de sulfato de aluminio requiriendo siempre la adición de un álcali para ajustar el pH.

$$T = \frac{k}{G^n} = \frac{119,4813}{G^{0,6903}} \quad \text{Ecuación 22}$$

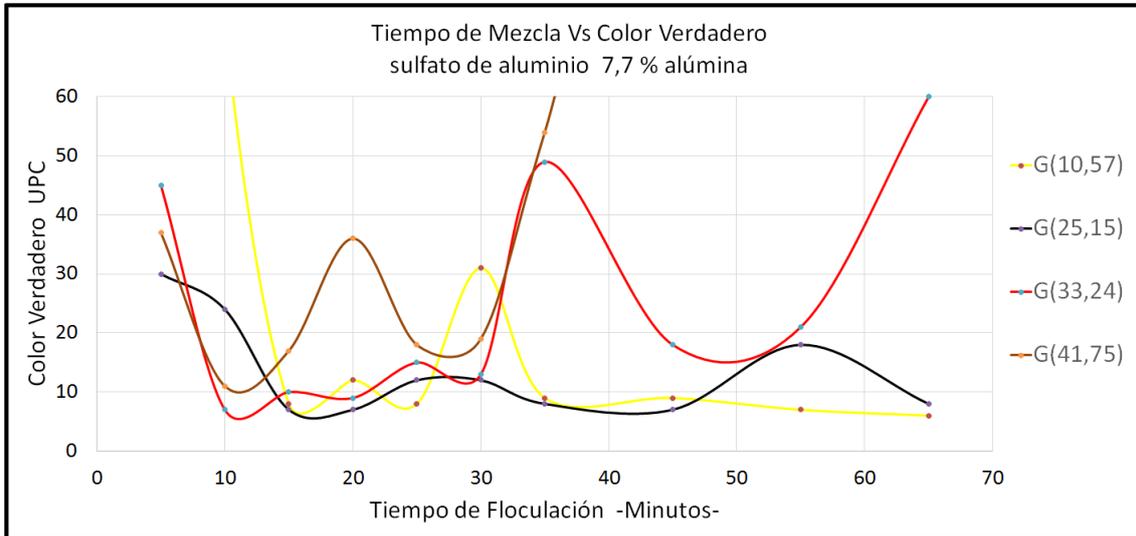
Los datos obtenidos en la medición de color verdadero del ensayo fueron consignados en la tabla 17.

Tabla 17. Resultado de Prueba de Jarras / Color Verdadero / Color aparente 605

| Gradiente (s ⁻¹) | (rpm) | Tiempo de floculación (min) | | | | | | | | | |
|---------------------------------|-------|-----------------------------|----|----|----|----|----|----|-----|----|----|
| | | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 45 | 55 | 65 |
| 4,45 | 10 | 20 | 12 | 15 | 13 | 22 | 18 | 13 | 27 | 13 | 8 |
| 10,57 | 20 | 223 | 73 | 8 | 12 | 8 | 31 | 9 | 9 | 7 | 6 |
| 17,55 | 30 | 28 | 15 | 11 | 23 | 21 | 27 | 15 | 13 | 29 | 31 |
| 25,15 | 40 | 30 | 24 | 7 | 7 | 12 | 12 | 8 | 7 | 18 | 8 |
| 33,24 | 50 | 45 | 7 | 10 | 9 | 15 | 13 | 49 | 18 | 21 | 60 |
| 41,75 | 60 | 37 | 11 | 17 | 36 | 18 | 19 | 54 | 126 | 69 | 70 |

En la gráfica 11 se puede observar que el color va cambiando conforme la velocidad de agitación va aumentando, para gradientes superiores a 41,75 s⁻¹ se altera la remoción de color. El sulfato de aluminio logra una alta eficiencia en la remoción de color ocasionada por la acción de la alúmina sobre la alta turbiedad presente en el agua.

Véase en la gráfica 10 la variación del color residual frente a distintos velocidades y tiempos de mezcla.



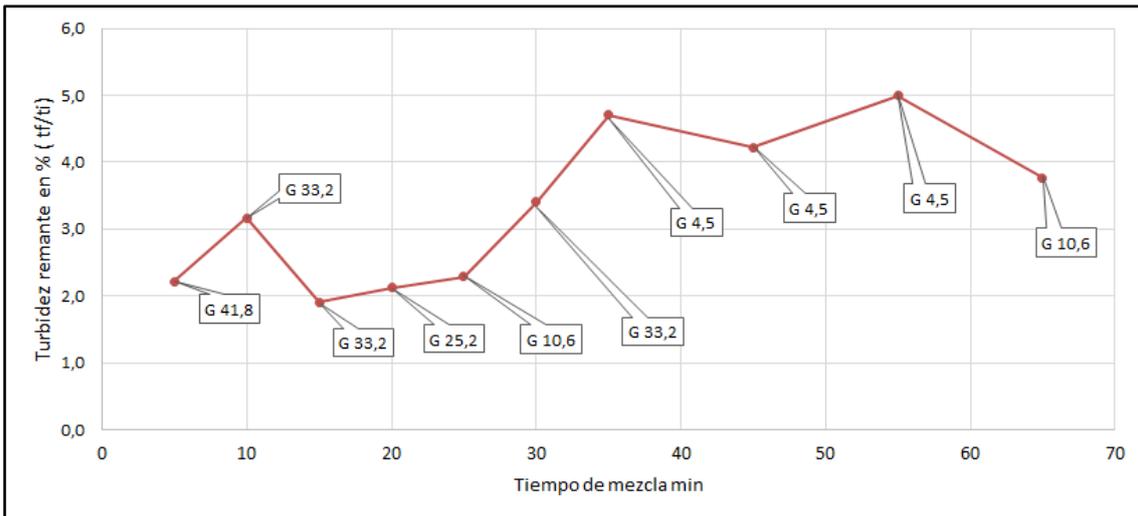
Gráfica 10 Tiempo de Mezcla VS Color Verdadero / Color Aparente 605 UPC

La tabla 18 reporta los resultados de la prueba de jarras para la muestra 4, en esta se consignan los valores de turbiedad residual para distintos gradientes y tiempos de mezcla.

Tabla 18. Resultados de la Prueba de Jarras-Turbiedad Residual / Turbiedad Inicial 164 UNT

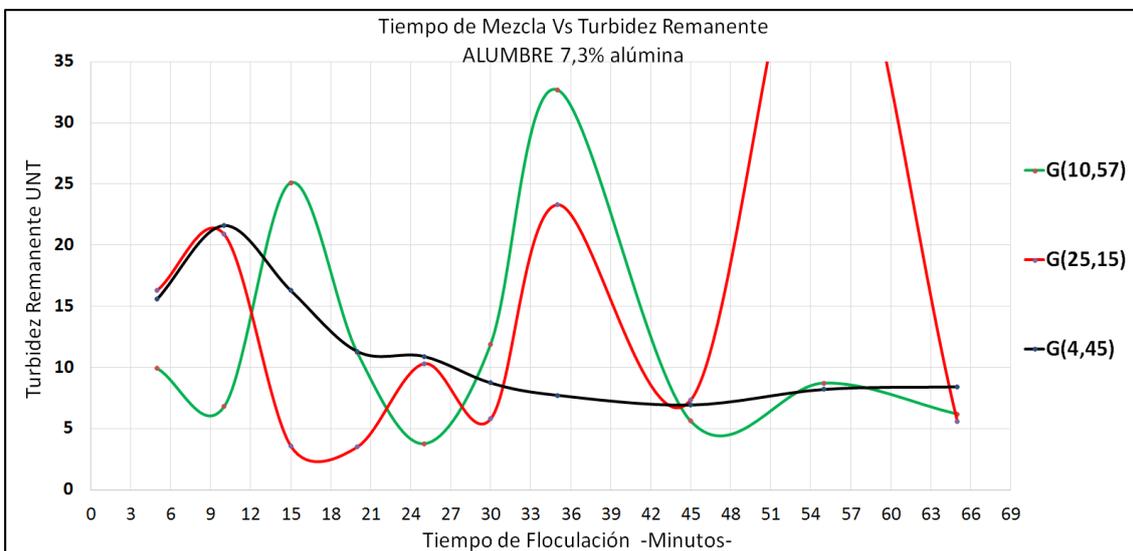
| Gradiente (s ⁻¹) | Tiempo de mezcla (rpm) | Tiempo de floculación (min) | | | | | | | | | |
|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 45 | 55 | 65 |
| 10,6 | 20 | 9,9 | 6,8 | 25,1 | 11,2 | 3,8 | 11,9 | 32,7 | 5,6 | 8,7 | 6,2 |
| 17,6 | 30 | 10,0 | 7,9 | 10,6 | 23,3 | 19,4 | 21,5 | 12,1 | 62,3 | 30,6 | 17,0 |
| 25,1 | 40 | 16,3 | 20,9 | 3,6 | 3,5 | 10,3 | 5,8 | 23,3 | 7,3 | 50,0 | 5,6 |
| 33,2 | 50 | 4,2 | 5,2 | 3,1 | 5,0 | 15,2 | 5,6 | 10,0 | 34,4 | 12,5 | 12,4 |
| 41,7 | 60 | 3,6 | 7,0 | 4,4 | 4,8 | 16,3 | 6,6 | 19,6 | 24,6 | 17,7 | 18,0 |
| 4,4 | 10 | 15,6 | 21,6 | 16,3 | 11,3 | 10,9 | 8,7 | 7,7 | 6,9 | 8,2 | 8,4 |

De la anterior tabla se escogieron los gradientes de velocidad de mayor remoción de turbiedad para cada tiempo de mezcla. El gradiente que ocasionó mayor remoción de la turbidez fue el de 33,2 s⁻¹, véase en la gráfica 11 a continuación.



Gráfica 11. Gradientes de velocidad de mayor remoción de turbidez.

Con los datos de la tabla 18 se construyó la gráfica 12, de ella se escogieron las curvas de gradiente de velocidad 25,15 -10,6 - 4,5 s⁻¹, con tiempos de mezcla 12- 21- 30 minutos, como parámetros óptimos de mezcla. La selección de estos parámetros permite la formación del floc conciso, representada en la tendencia de la turbiedad constante, ver en la gráfica 13, gradiente de 4,5 s⁻¹ a los 30 minutos.



Gráfica 12. Tiempo de Mezcla VS Turbiedad Remanente / Turbiedad inicial 164 UNT

En la gráfica 12 se puede observar que el floc se comienza a estabilizar a los 21 minutos manteniendo un gradiente de velocidad de 4,45 s⁻¹. La floculación debe

llevarse a cabo entre rangos de velocidad de agitación de 25,15 - 4,45 s⁻¹, siendo perjudiciales gradientes fuera de este rango.

La tabla 19 presenta los parámetros óptimos de mezcla para la muestra 4.

Tabla 19. Parámetros Óptimos / Turbiedad Inicial 164 UNT

| (Gⁿ) T = k | | | | | |
|------------------------------|----------|-------------|-------------|---------------|--------------------|
| G | T | logG | logT | n | k |
| 4,45 | 30 | 0,64836 | 1,477121255 | 0,5291 | 68,35967668 |
| 10,57 | 21 | 1,024075 | 1,322219295 | | |
| 25,15 | 12 | 1,400538 | 1,079181246 | | |

La ecuación 23 permite obtener el tiempo y el gradiente óptimo para turbiedades cercanas a 164 UNT

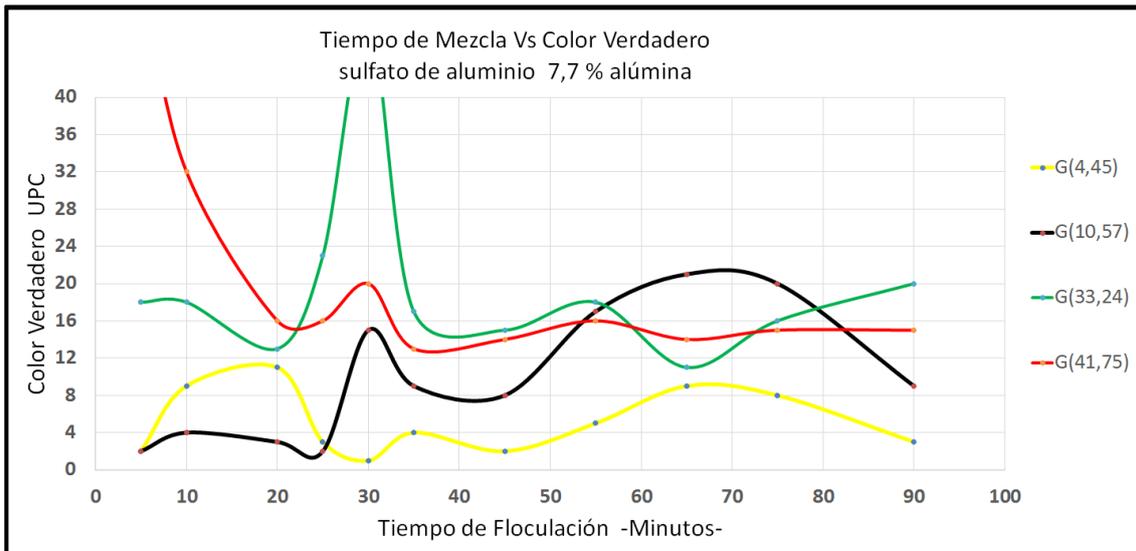
$$T = \frac{k}{G^n} = \frac{68,3596}{G^{0,5291}} \quad \text{Ecuación 23}$$

Con los datos obtenidos en la medición de color residual reportados en la tabla 20 se creó la gráfica 15, turbiedad remanente vs color verdadero, con las curvas de gradiente seleccionadas que optimizan el proceso de floculación.

Tabla 20. Resultados Prueba de Jarras/ Color Aparente 553

| Gradiente | (s-1) | (rpm) | Tiempo de floculacion (min) | | | | | | | | | |
|------------------|--------------|--------------|------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | | 5 | 10 | 20 | 25 | 30 | 35 | 45 | 55 | 65 | 75 |
| 4,45 | 10 | 2 | 9 | 11 | 3 | 1 | 4 | 2 | 5 | 9 | 8 | 3 |
| 10,57 | 20 | 2 | 4 | 3 | 2 | 15 | 9 | 8 | 17 | 21 | 20 | 9 |
| 17,55 | 30 | 25 | 15 | 15 | 21 | 11 | 21 | 20 | 16 | 22 | 25 | 24 |
| 25,15 | 40 | 13 | 15 | 15 | 18 | 16 | 16 | 18 | 14 | 17 | 21 | 16 |
| 33,24 | 50 | 18 | 18 | 13 | 23 | 48 | 17 | 15 | 18 | 11 | 16 | 20 |
| 41,75 | 60 | 53 | 32 | 16 | 16 | 20 | 13 | 14 | 16 | 14 | 15 | 15 |

En la gráfica 13 se puede observar que el gradiente de 33,24 y 41,75 s⁻¹ no ofrece una alta remoción de color. Las velocidades de agitación de 4,45 y 10,57 s⁻¹ en cambio si mantienen una alta remoción en el proceso.



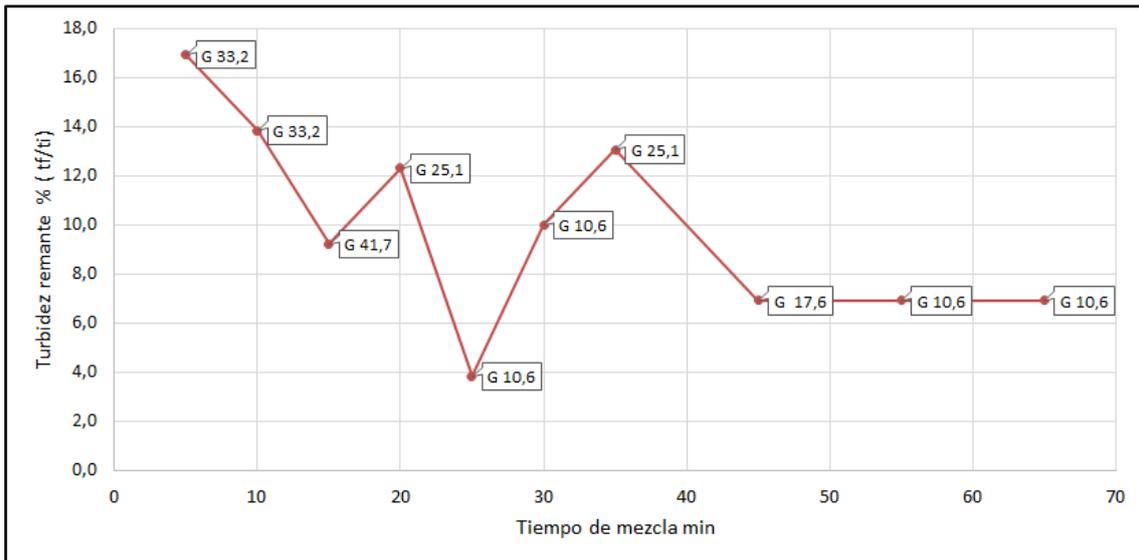
Gráfica 13 : Turbiedad Remanente VS Color Verdadero / Color Aparente 553

La tabla 21 reporta los resultados de la muestra 5, en ella se registran los diferentes valores de turbiedad conseguidos a distintas velocidades de agitación y tiempos de mezcla.

Tabla 21 : Resultados Prueba de Jarras-Turbiedad Residual / Turbiedad Inicial 13 UNT

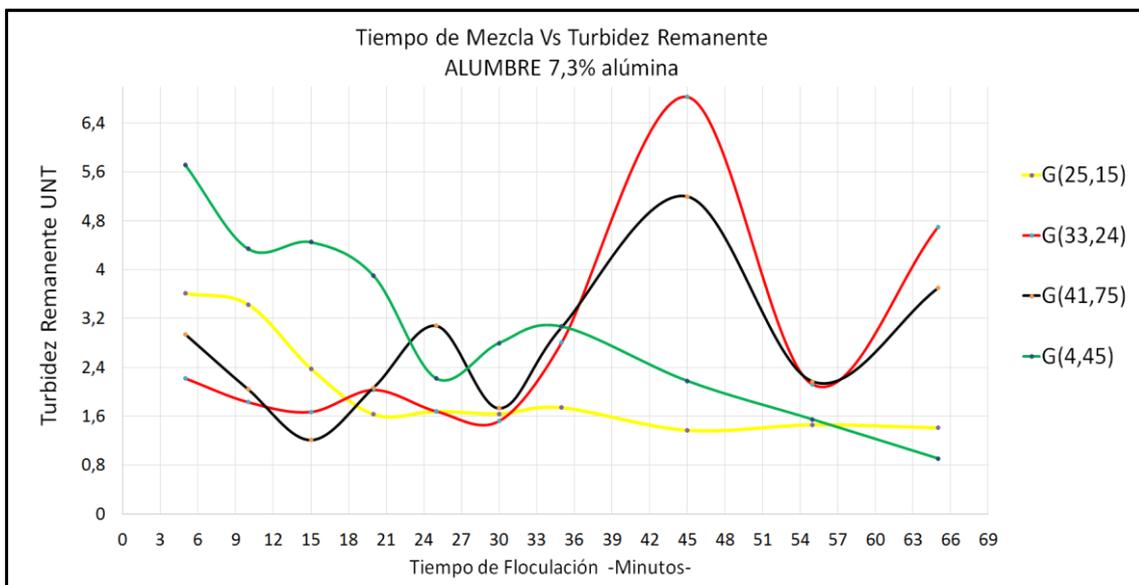
| Gradiente | Tiempo de floculación (min) | | | | | | | | | | |
|-----------|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | (rpm) | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 45 | 55 | 65 |
| 10,6 | 20 | 4,9 | 3,1 | 2,5 | 3,2 | 0,5 | 1,3 | 4,7 | 0,9 | 0,9 | 0,7 |
| 17,6 | 30 | 3,8 | 2,1 | 1,7 | 3,1 | 0,9 | 1,4 | 1,8 | 0,9 | 1,1 | 1,3 |
| 25,1 | 40 | 3,6 | 3,4 | 2,4 | 1,6 | 1,7 | 1,6 | 1,7 | 1,4 | 1,5 | 1,4 |
| 33,2 | 50 | 2,2 | 1,8 | 1,7 | 2,0 | 1,7 | 1,5 | 2,8 | 6,8 | 2,1 | 4,7 |
| 41,7 | 60 | 2,9 | 2,0 | 1,2 | 2,1 | 3,1 | 1,7 | 3,1 | 5,2 | 2,2 | 3,7 |
| 4,4 | 10 | 5,7 | 4,3 | 4,5 | 3,9 | 2,2 | 2,8 | 3,1 | 2,2 | 1,6 | 0,9 |

En la gráfica 14 se presenta los gradientes que ocasionan la mayor remoción de turbiedad en la muestra 5.



Gráfica 14. Gradientes de velocidad de mayor remoción de turbidez muestra 5.

Se graficaron el tiempo de mezcla vs turbiedad remanente para distintos velocidades de agitación con los datos de la tabla 21. De esta gráfica se escogieron curvas de gradiente de velocidad de 41,7 - 33,24 - 25,1 y 4,4 s⁻¹ ya que fueron las de mayor remoción de turbiedad en la muestra 5.



Gráfica 15 : Tiempo de Mezcla VS Turbiedad Remanente / Turbiedad Inicial 13 UNT

Se seleccionaron 4 curvas de gradiente de velocidad como se muestra en la gráfica 15. De estas se seleccionaron 3 gradientes y tiempos de mezcla óptimos consignados en la tabla 22. Se requieren de velocidades agitación de 41,75 -

33,24 - 25,15 s⁻¹ en un tiempo mezcla de 25 minutos logrando obtener un 12% del material remanente destinado para el sedimentador, menos de 1,6 UNT remanentes para su posterior tratamiento.

Tabla 22 : Parámetros Óptimos / Turbiedad Inicial 13 UNT

| (G ⁿ) T = k | | | | | |
|-------------------------|----|--------|------------|---------------|-----------------|
| G | T | logG | logT | n | k |
| 25,15 | 25 | 1,4005 | 1,39794001 | 1,6111 | 4601,506 |
| 33,24 | 17 | 1,5217 | 1,23044892 | | |
| 41,75 | 11 | 1,6207 | 1,04139269 | | |

La muestra 5 fue la de menor turbiedad tratada por el sulfato de aluminio, 13 UNT. A diferencia de los anteriores ensayos en donde la turbiedad fue considerablemente alta muestras 2 y 3, se pudo observar que para turbiedades relativamente bajas como las de la muestra 5 es mejor aplicar gradientes de velocidad altos con esto incentivar la frecuencia de choque de las partículas y así logren aglomerarse y formar el floc

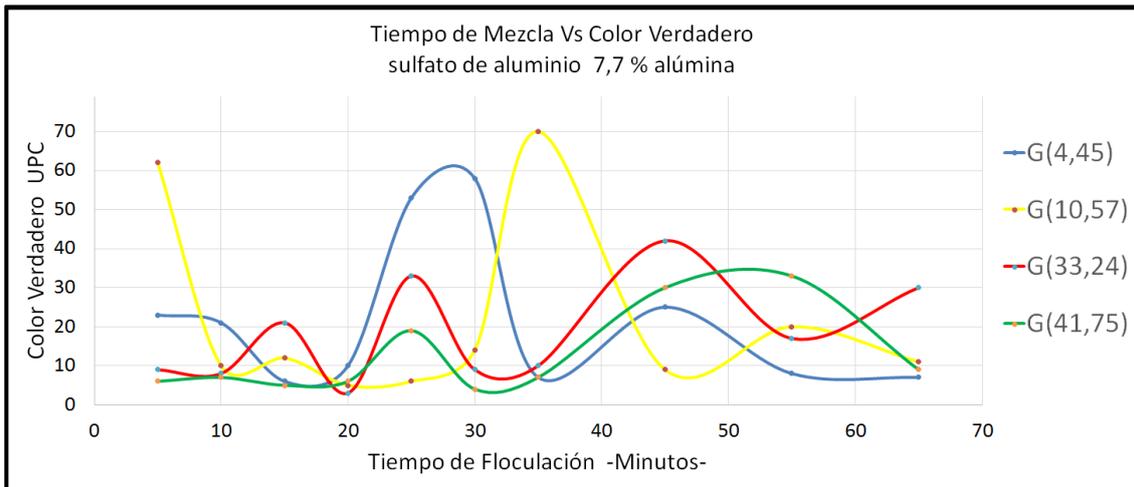
La siguiente ecuación sirve para hallar el gradiente y tiempo óptimo de velocidad para el tratamiento de aguas con similares características a las del ensayo.

$$T = \frac{k}{G^n} = \frac{4601,506}{G^{1,6111}} \quad \text{Ecuación 24}$$

Con los datos obtenidos en la medición de color residual reportados en la tabla 23 se creó la gráfica 16, tiempo de mezcla vs color verdadero.

Tabla 23. Resultados Pruebas de Jarras Color Residual / Color Aparente 249 UPC

| Gradiente (s ⁻¹) | (rpm) | Tiempo de floculación (min) | | | | | | | | | |
|---------------------------------|-------|-----------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 45 | 55 | 65 |
| 4,45 | 10 | 23 | 21 | 6 | 10 | 53 | 58 | 7 | 25 | 8 | 7 |
| 10,57 | 20 | 62 | 10 | 12 | 5 | 6 | 14 | 70 | 9 | 20 | 11 |
| 17,55 | 30 | 12 | 16 | 21 | 26 | 12 | 2 | 12 | 90 | 47 | 16 |
| 25,15 | 40 | 32 | 31 | 16 | 3 | 24 | 5 | 36 | 11 | 89 | 8 |
| 33,24 | 50 | 9 | 8 | 21 | 3 | 33 | 9 | 10 | 42 | 17 | 30 |
| 41,75 | 60 | 6 | 7 | 5 | 6 | 19 | 4 | 7 | 30 | 33 | 9 |



Gráfica 16. Tiempo de Mezcla VS Color Verdadero / Color Aparente 249 UPC

En la gráfica 16 se puede apreciar la curva verde correspondiente al gradiente de $41,75 \text{ s}^{-1}$ con la curva roja gradiente de $33,24 \text{ s}^{-1}$ presenta mejor remoción del color en la muestra en un menor tiempo que las curvas amarilla y azul gradientes de $10,57$ y $4,45 \text{ s}^{-1}$. La aglutinación de las partículas se da fácilmente en rangos de agitación entre $41,75 \text{ s}^{-1}$ y $33,24 \text{ s}^{-1}$.

Como conclusión con los resultados obtenidos con el alumbre, el gradiente y el tiempo de mezcla óptimos cambian considerablemente cuando hay situaciones de alta y baja turbiedad, siendo más fácil flocular aguas de altas concentraciones de turbiedad ($>100 \text{ UNT}$) con gradientes de velocidad suaves en rangos de 25 a 10 s^{-1} de forma decreciente. Para calidades de agua con baja concentración de turbiedad ($< 50 \text{ UNT}$) se concluyó que el agua flocula con mayor facilidad utilizando gradientes turbulentos en rangos de 41 a 25 s^{-1} . Los tiempos de mezcla óptimos en los rangos mencionados están entre los 12 hasta 25 minutos.

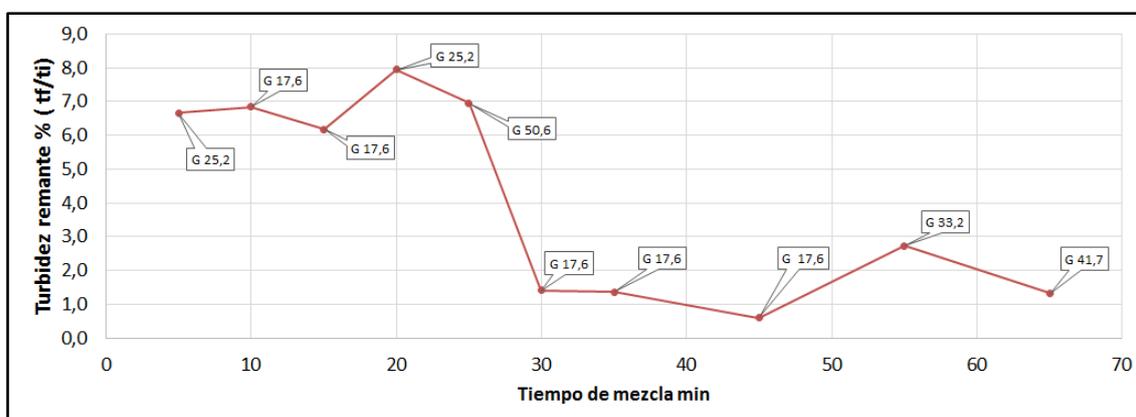
4.1.2.2 Parámetros óptimos de floculación usando el coagulante PAC líquido, concentrado al 1% y preparado en base al contenido de alúmina del coagulante.

La tabla 24 presenta los resultados obtenidos en las pruebas de jarras, esta reporta la turbiedad residual para diferentes tiempos y gradientes de mezcla para la muestra 6.

Tabla 24. Resultados de la Prueba de Jarras-Turbiedad Residual / Turbiedad Inicial 180 UNT

| Gradiente (s ⁻¹) | (rpm) | Tiempo de floculación (min) | | | | | | | | | |
|---------------------------------|-------|-----------------------------|------|------|-------|------|-------|------|------|------|------|
| | | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 45 | 55 | 65 |
| 10,6 | 20 | 13,9 | 13,2 | 25,3 | 38,7 | 19,3 | 47,6 | 8,8 | 36,5 | 32,2 | 24,8 |
| 17,6 | 30 | 12,1 | 12,3 | 11,1 | 15,7 | 13,3 | 2,5 | 2,4 | 1,1 | 9,7 | 4,5 |
| 25,1 | 40 | 12,0 | 16,0 | 14,2 | 14,3 | 17,9 | 17,6 | 4,5 | 3,9 | 6,5 | 12,1 |
| 33,2 | 50 | 17,8 | 14,9 | 20,5 | 18,7 | 20,5 | 37,5 | 11,7 | 5,3 | 4,9 | 67,5 |
| 41,7 | 60 | 43,7 | 37,0 | 49,3 | 53,4 | 46,9 | 107,0 | 38,5 | 7,5 | 14,3 | 2,4 |
| 50,6 | 70 | 51,1 | % | 64,5 | 101,0 | 12,5 | 21,2 | 4,9 | 25,9 | 15,8 | 11,0 |

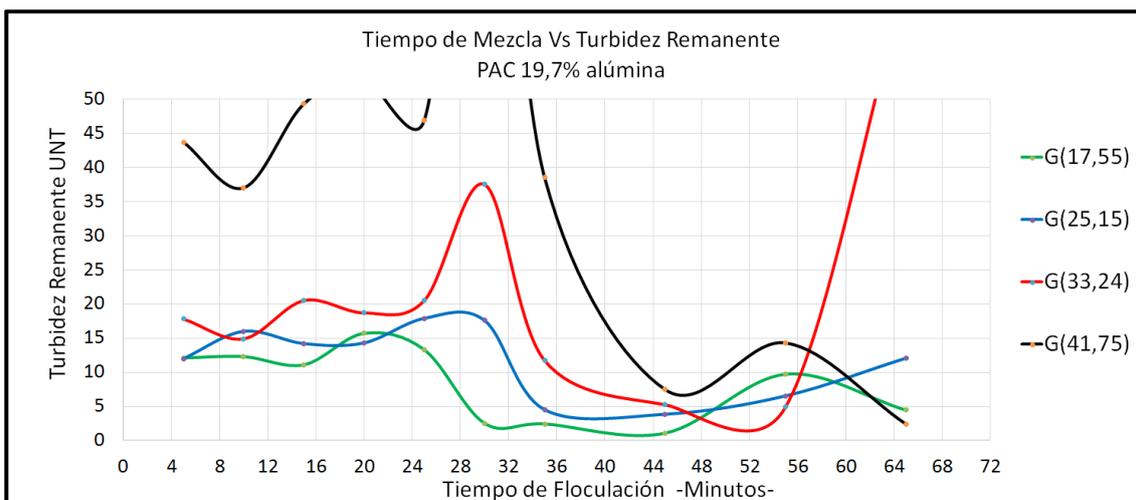
De la tabla 24 se graficaron los gradientes de mayor remoción de turbiedad en cada tiempo de la prueba, como se puede apreciar en la gráfica 17.



Gráfica 17 Gradientes de mayor remoción de turbiedad muestra 6

Se puede observar de la gráfica 17, que el gradiente de 17,6 s⁻¹ logra la mayor remoción de turbiedad a los 45 minutos en la muestra 6.

Con los datos de la tabla 23 se elabora la gráfica 18. De esta se obtienen los parámetros óptimos de floculación para la muestra 6.



Gráfica 18. Tiempo de Mezcla VS Turbiedad Residual / Turbiedad Inicial 180 UNT

Se puede observar en la gráfica 18, que la floculación en la muestra 6 demanda velocidades de agitación entre 33,24 – 17,55 s^{-1} en tiempos de mezcla de 12 a 30 minutos, en estos rangos se logra la conglomeración de las partículas. Gradientes superiores 41,75 seg^{-1} , son perjudiciales en la formación del floc, ocasionando el rompimiento de los flocúlos. El PAC logra un porcentaje de remoción de turbiedad del 99,4 % a los 45 minutos, siendo este reactivo más eficiente en remoción de turbiedad que el alumbre y en tiempos de mezcla más cortos en turbiedades similares a las de la muestra 6.

La tabla 25 muestra los parámetros óptimos de floculación, gradientes y tiempos de mezcla seleccionados de la gráfica 18.

Tabla 25. Parámetros óptimos / turbiedad inicial 180 UNT

| $(G^n) T = k$ | | | | | |
|---------------|----|-------------|-------------|--------|---------|
| G | T | logG | logT | n | k |
| 17,55 | 30 | 1,244277121 | 1,477121255 | 1,4414 | 1836,96 |
| 25,15 | 17 | 1,400537989 | 1,230448921 | | |
| 33,24 | 12 | 1,521661015 | 1,079181246 | | |

La ecuación 25 sirve para hallar el tiempo y gradiente óptimo para calidades de aguas similares a las del ensayo. El coagulante PAC al ser un polímero y al haber

mayor contenido de alúmina que en el sulfato de aluminio, requiere menor dosis para causar la desestabilización de las partículas coloidales.

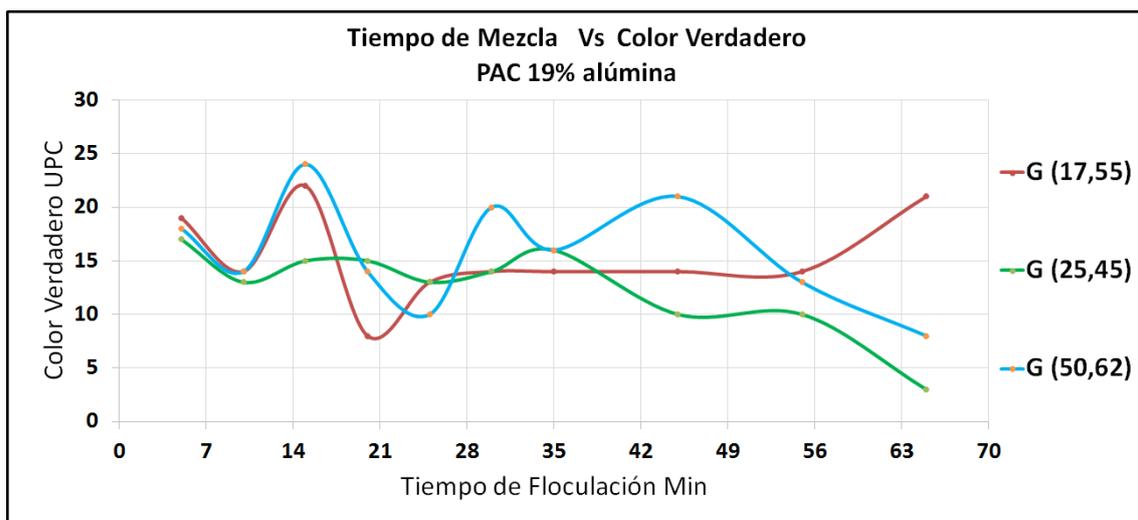
$$T = \frac{k}{G^n} = \frac{1836,96}{G^{1,4414}} \quad \text{Ecuación 25}$$

El color residual del ensayo se reporta en la tabla 26. A partir de estos datos se graficaron la turbidez residual generada con distintos gradientes y tiempos de mezcla vs el color verdadero medido en la muestra 6.

Tabla 26. Resultados Pruebas de Jarras Color Residual / Color Aparente 553 UPC

| Gradiente (s-1) | (rpm) | Tiempo de floculación (min) | | | | | | | | | |
|--------------------|-------|-----------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 45 | 55 | 65 |
| 10,57 | 20 | 22 | 19 | 20 | 11 | 19 | 10 | 13 | 24 | 13 | 12 |
| 17,55 | 30 | 19 | 14 | 22 | 8 | 13 | 14 | 14 | 14 | 14 | 21 |
| 25,15 | 40 | 17 | 13 | 15 | 15 | 13 | 14 | 16 | 10 | 10 | 3 |
| 33,24 | 50 | 18 | 40 | 18 | 17 | 27 | 13 | 24 | 22 | 22 | 37 |
| 41,75 | 60 | 15 | 17 | 10 | 14 | 24 | 16 | 13 | 11 | 11 | 18 |
| 50,62 | 70 | 18 | 14 | 24 | 14 | 10 | 20 | 16 | 21 | 13 | 8 |

A partir de la anterior tabla se construye la gráfica 19, se puede observar que se logra una estabilidad en el color residual cercano a un tiempo de 28 minutos con un gradiente de velocidad de 17,55 seg-1, lo cual es apropiado con el tiempo teórico de las unidades.



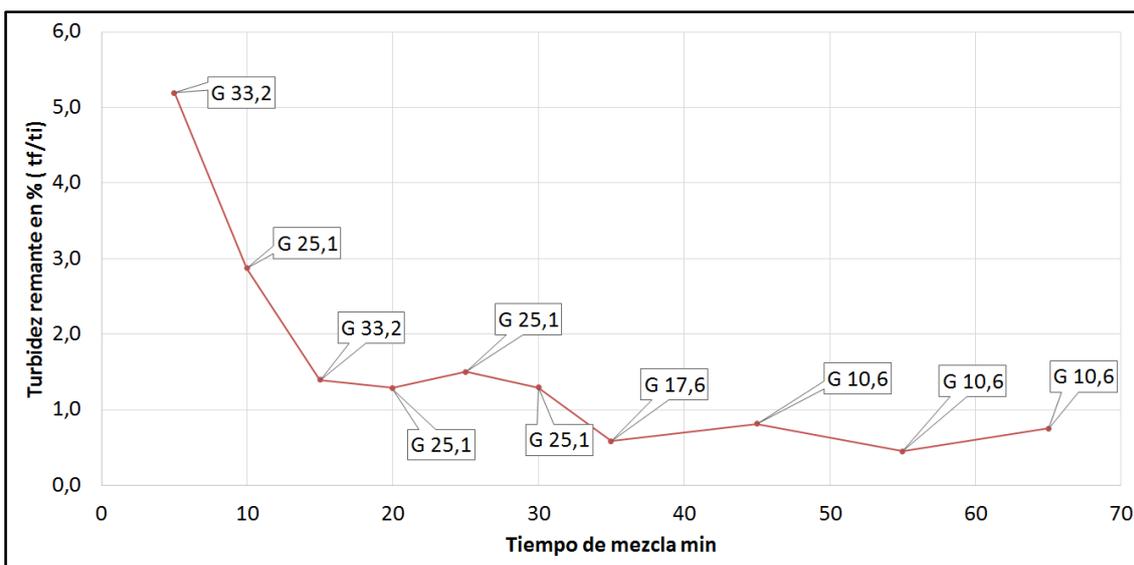
Gráfica 19 : Tiempo de Mezcla VS Color Verdadero / Color Aparente 553

La tabla 27 reporta los valores de turbiedad residual obtenidos a partir de distintas velocidades de agitación y tiempos de mezcla en la muestra 7.

Tabla 27. Resultados prueba de Jarras Turbiedad Residual / Turbiedad inicial 732 UNT

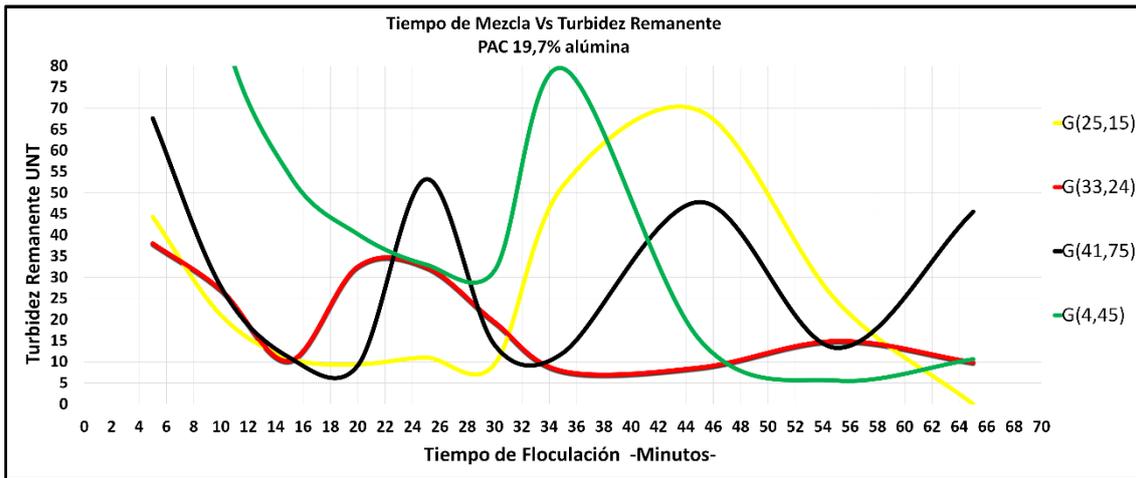
| Gradiente (s-1) | (rpm) | Tiempo de floculación (min) | | | | | | | | | |
|--------------------|-------|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 45 | 55 | 65 |
| 10,6 | 20 | 138,0 | 47,8 | 14,8 | 12,8 | 15,7 | 11,7 | 28,4 | 5,9 | 3,3 | 5,5 |
| 17,6 | 30 | 70,7 | 24,5 | 15,6 | 29,5 | 33,2 | 36,5 | 4,3 | 6,2 | 5,4 | 13,9 |
| 25,1 | 40 | 44,3 | 21,0 | 10,9 | 9,4 | 11,0 | 9,5 | 51,6 | 69,4 | 24,5 | 88,4 |
| 33,2 | 50 | 38,0 | 27,0 | 10,2 | 32,5 | 32,4 | 19,4 | 7,8 | 8,6 | 14,9 | 9,9 |
| 41,7 | 60 | 67,6 | 27,7 | 11,0 | 9,2 | 53,2 | 14,0 | 12,1 | 47,8 | 13,3 | 45,5 |
| 4,4 | 10 | 221,0 | 92,1 | 54,2 | 40,2 | 33,0 | 31,6 | 79,4 | 15,2 | 5,6 | 10,6 |

A continuación se presentan los gradientes de mayor remoción de turbiedad para cada tiempo de mezcla obtenido en la muestra 7.



Gráfica 20. Gradientes de mayor remoción de turbiedad muestra 7

A partir de los datos de la tabla 27 se construye la gráfica 20 la cual presenta las curvas de gradientes seleccionadas de mayor remoción de ellas se obtienen los tiempos óptimos correspondientes a cada curva de gradiente.



Gráfica 21. Tiempo de Mezcla VS Turbiedad Remanente / Turbiedad inicial 732UNT

El policloruro requiere de mayor velocidad de agitación en comparación con el sulfato de aluminio, no obstante la muestra presenta alto contenido de turbiedad por lo que es conveniente usar una agitación con gradientes entre 41,7 y 25,15 s⁻¹. De la gráfica 21 se seleccionó los parámetros óptimos de mezcla consignados en la tabla 28.

Tabla 28. Tiempo y gradientes óptimos de mezcla / turbiedad inicial 732 UNT

| (G ⁿ) T = k | | | | | |
|-------------------------|----|--------|---------|--------|-------------|
| G | T | logG | logT | n | k |
| 25,15 | 20 | 1,4005 | 1,30103 | 1,3552 | 1626,297521 |
| 33,24 | 15 | 1,5217 | 1,17609 | | |
| 41,75 | 10 | 1,6207 | 1 | | |

La ecuación 26 sirve para hallar el tiempo y gradiente óptimo para calidades de aguas similares a las del ensayo.

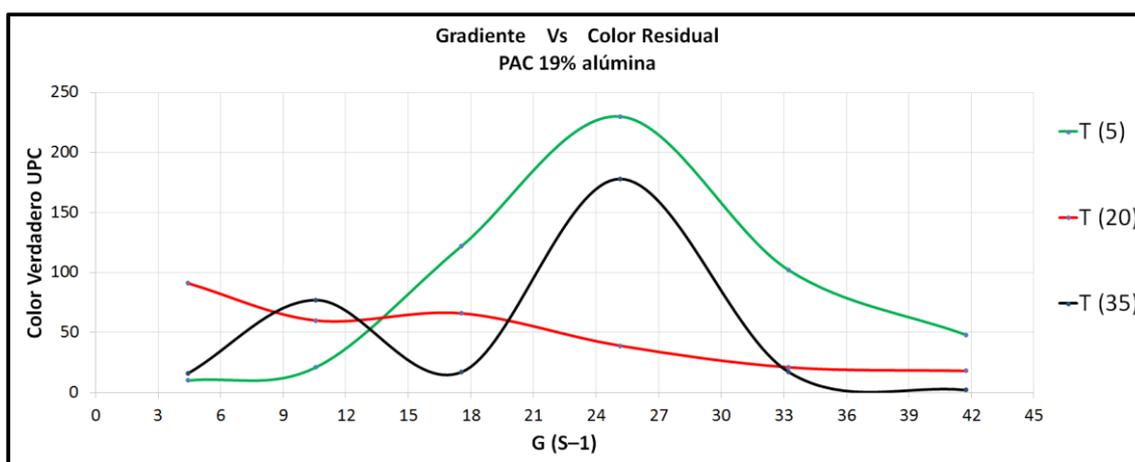
$$T = \frac{k}{G^n} = \frac{1626,29}{G^{1,3552}} \quad \text{Ecuación 26}$$

La tabla 29 reporta los valores obtenidos en la prueba de jarras de color residual para distintos gradientes y tiempos de mezcla para la muestra 7.

Tabla 29. Resultados Prueba de jarras Color Residual / Color Aparente 1137

| Gradiente (s-1) | (rpm) | Tiempo de floculación (min) | | | | | | | | | |
|--------------------|-------|-----------------------------|----|----|----|-----|----|-----|-----|----|-----|
| | | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 45 | 55 | 65 |
| 4,45 | 10 | 10 | 37 | 45 | 91 | 14 | 32 | 16 | 26 | 14 | 15 |
| 10,57 | 20 | 21 | 5 | 3 | 60 | 50 | 7 | 77 | 2 | 7 | 8 |
| 17,55 | 30 | 122 | 91 | 54 | 66 | 13 | 27 | 17 | 4 | 27 | 11 |
| 25,15 | 40 | 230 | 90 | 65 | 39 | 45 | 37 | 178 | 183 | 87 | 252 |
| 33,24 | 50 | 102 | 98 | 16 | 21 | 130 | 23 | 17 | 19 | 52 | 21 |
| 41,75 | 60 | 48 | 17 | 19 | 18 | 24 | 6 | 2 | 14 | 6 | 8 |

El efluente de la PTAP-Floridablanca se caracteriza por tener altas cargas de color y bajas turbiedades pudiendo ser consecuencia de materia orgánica en descomposición, óxidos de hierro o también a excretas de organismos vivos. A partir de los datos de la tabla 29 se elabora la gráfica 22.



Gráfica 22. Gradiente VS Color Residual / Color aparente 1137 UPC

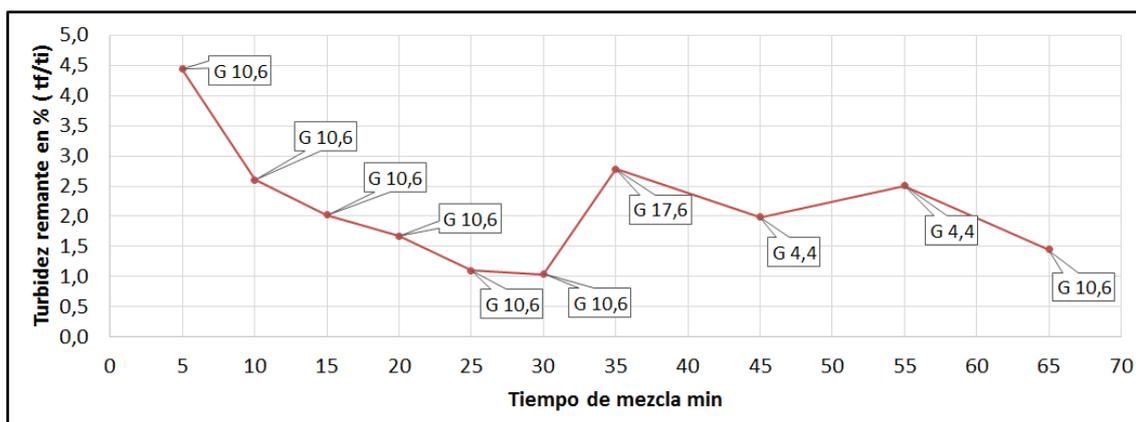
En la gráfica 22 obsérvese la curva verde corresponde a 5 minutos de mezcla, la remoción de color con una velocidad de 6 a 9 s⁻¹ logra una remoción cercana al **98,15 %** un porcentaje ideal aunque no se recomienda operar ningún floculador a velocidades tan bajas debido a que el floc sedimentaria en las cámaras. A los 25 minutos muestra el recorrido ideal de agitación consiguiéndose una óptima remoción de color por debajo de 10 UPC usando gradientes de agitación desde los 42 s⁻¹ hasta los 30 s⁻¹, para estos rangos de agitación se da la floculación en la muestra removiendo color y turbidez .

La tabla 30 reporta los resultados obtenidos para la muestra 8 en la prueba de jarras de turbiedad residual para distintos tiempos y velocidades de agitación. La muestra presenta alto grado de turbiedad 320 UNT.

Tabla 30. Resultados Prueba de Jarras Turbiedad Residual / Turbiedad inicial 320 UNT

| Gradiente (s-1) | (rpm) | Tiempo de floculación (min) | | | | | | | | | |
|--------------------|-------|-----------------------------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|
| | | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 45 | 55 | 65 |
| 10,6 | 20 | 14,2 | 8,3 | 6,5 | 5,4 | 3,5 | 3,3 | 18,8 | 8,3 | 12,2 | 4,6 |
| 17,6 | 30 | 15,0 | 17,0 | 11,9 | 12,3 | 14,7 | 26,4 | 8,9 | 29,1 | 12,0 | 79,1 |
| 25,1 | 40 | 18,4 | 13,5 | 14,0 | 9,4 | 27,0 | 3,7 | 14,6 | 79,8 | 65,9 | 48,2 |
| 33,2 | 50 | 18,3 | 53,2 | 72,7 | 115,0 | 14,3 | 12,4 | 43,3 | 28,0 | 11,3 | 42,0 |
| 41,7 | 60 | 23,4 | 12,2 | 78,7 | 50,6 | 31,7 | 45,7 | 14,5 | 85,9 | 27,5 | 54,7 |
| 4,4 | 10 | 28,9 | 21,9 | 13,8 | 15,1 | 11,5 | 8,1 | 9,3 | 6,4 | 8,0 | 8,6 |

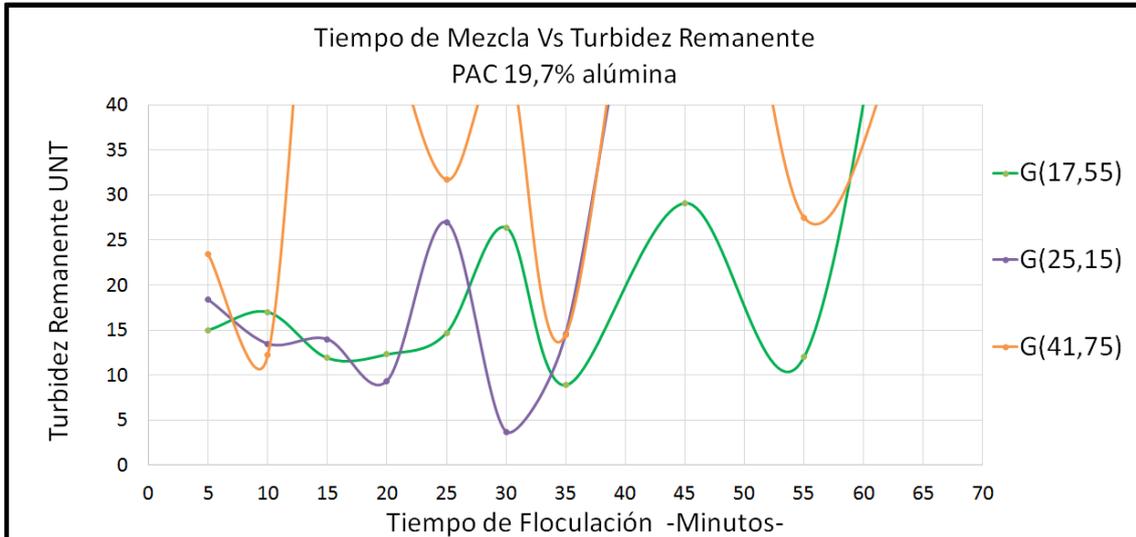
A continuación se presentan en la gráfica 23 los gradientes de mayor remoción de turbiedad en la muestra 8, se puede observar la mayor remoción de turbidez sucede con una velocidad de agitación de $10,6 \text{ s}^{-1}$ a los 25 minutos.



Gráfica 23. Gradientes de mayor remoción de turbiedad

Es alta la turbiedad en la muestra 8, 320 UNT, las partículas se aglomeran con gradientes relativamente de baja velocidad $10,6 \text{ s}^{-1}$ como los que aparecen en la gráfica 23. Aunque en la gráfica 24 se puede observar que también se requiere de una alta velocidad los primeros minutos de mezcla para agilizar el proceso de formación del floc para luego tratarse con los gradientes de mayor remoción turbiedad presentados, los cuales terminan de reunir las partículas suavemente con el fin de no ocasionar rupturas las cuales ocasionaran el aumento en la turbiedad.

La grafica 24 presenta las curvas de gradientes óptimas seleccionadas por su alto rendimiento en la aglomeración de las partículas, de esta grafica se seleccionaron los tiempos óptimos de mezcla para cada curva de gradiente de velocidad.



Gráfica 24. Tiempo de Mezcla VS Turbiedad Remanente / Turbiedad inicial 320 UNT

Las curvas de gradientes óptimas de velocidad en la gráfica 24 permiten la floculación para esta muestra. Se requiere comenzar la mezcla con un gradiente de $41,75 \text{ s}^{-1}$ durante 7 minutos, cambiando la agitación a $25,15 \text{ s}^{-1}$ hasta los 17 minutos, finalizando con un gradiente de $17,55 \text{ s}^{-1}$, hasta los 22 minutos. La tabla 31 reporta los parámetros óptimos seleccionados.

Tabla 31. Parámetros óptimos de floculación / turbiedad inicial 320 UNT

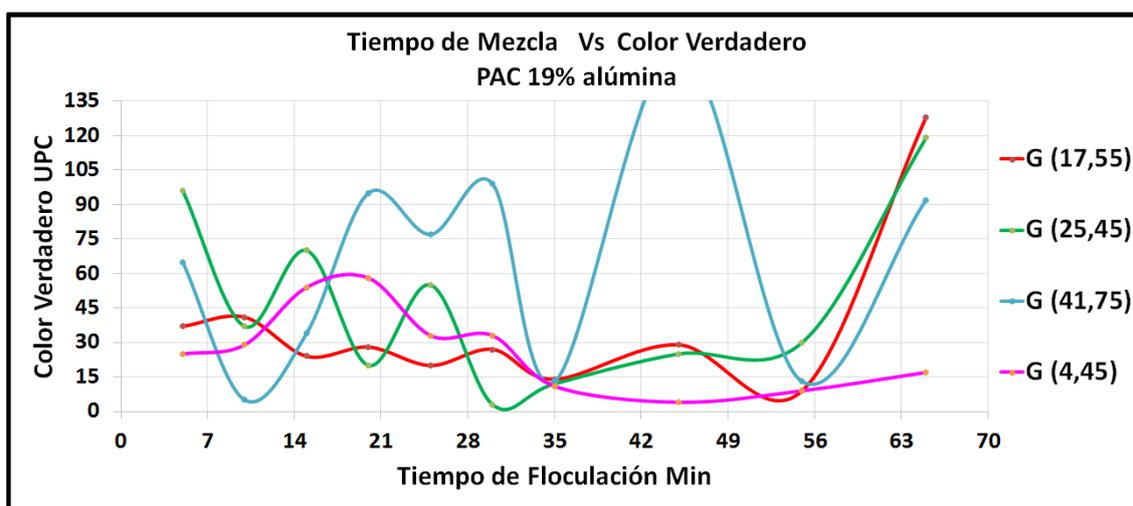
| $(G^n)T = k$ | | | | | |
|--------------|----|---------|-------------|--------|-------------|
| G | T | logG | logT | n | k |
| 17,55 | 22 | 1,24428 | 1,342422681 | 1,3495 | 1142,878335 |
| 25,15 | 17 | 1,40054 | 1,230448921 | | |
| 41,75 | 7 | 1,62066 | 0,84509804 | | |

La tabla 32 presenta los resultados de la medición del color residual después de las pruebas de jarras para cada gradiente de mezcla.

Tabla 32. Resultados Prueba de jarras Color Residual / Color aparente 521 UPC

| Gradiente (s-1) | (rpm) | Tiempo de flocucion (min) | | | | | | | | | |
|--------------------|-------|---------------------------|----|----|----|----|----|----|-----|----|-----|
| | | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 45 | 55 | 65 |
| 4,45 | 10 | 25 | 29 | 54 | 58 | 33 | 33 | 11 | 4 | 9 | 17 |
| 10,57 | 20 | 46 | 24 | 17 | 16 | 14 | 10 | 19 | 5 | 21 | 8 |
| 17,55 | 30 | 37 | 41 | 24 | 28 | 20 | 27 | 14 | 29 | 9 | 128 |
| 25,15 | 40 | 96 | 37 | 70 | 20 | 55 | 3 | 12 | 25 | 30 | 119 |
| 33,24 | 50 | 80 | 87 | 23 | 25 | 28 | 16 | 20 | 14 | 14 | 55 |
| 41,75 | 60 | 65 | 5 | 34 | 95 | 77 | 99 | 13 | 158 | 13 | 92 |

En base a los resultados reportados en la tabla 32 se elaboró la gráfica 25 la cual relaciona el tiempo de mezcla vs el color residual de la muestras.



Gráfica 25 : Tiempo de Mezcla VS Color Residual / Color aparente 521

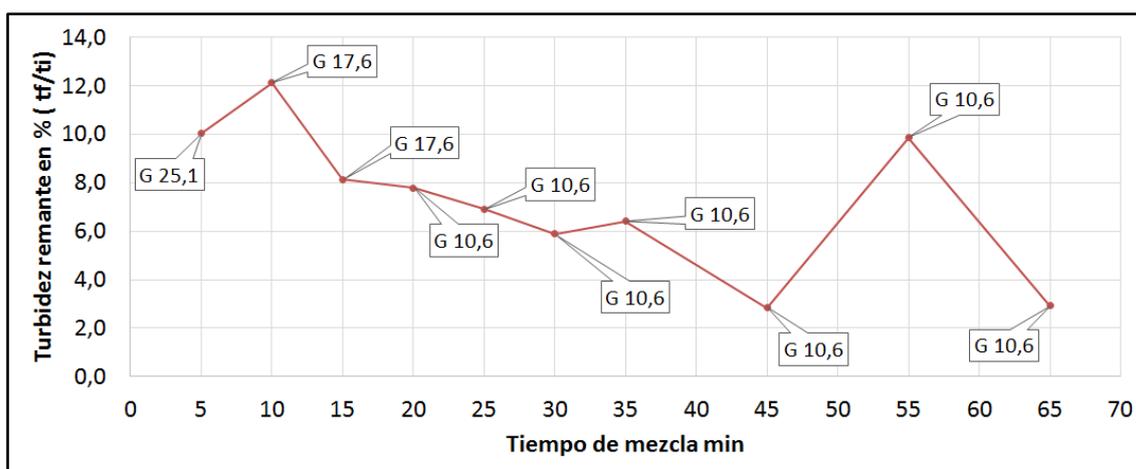
En la gráfica 25 se observa las curvas de gradiente de velocidad óptimas seleccionadas en función de la remoción de color. Se puede alcanzar una remoción de color con un gradiente de 41,75 s⁻¹ en los primeros 7 minutos de mezcla de hasta el 92,32 %. El gradiente de 25,45 s⁻¹ optimiza la remoción de color a los 20 minutos alcanzando una remoción del 96,16%. Al cambiar la velocidad de agitación a 17,55 s⁻¹, mantiene estable el floc, aunque en la remoción de color con este gradiente no es estable, el gradiente bajo de 4,45 s⁻¹, sugiere que la remoción del color se dará con mayor eficiencia en el sedimentador.

En la tabla 33 se reportan los resultados de turbiedad residual para diferentes velocidades y tiempos de mezcla en las pruebas de jarras realizadas en la muestra 9.

Tabla 33. Resultados Pruebas de Jarras Turbiedad Residual / Turbiedad inicial 51,2 UNT

| Gradiente (s-1) | Tiempo de floculacion (min) | | | | | | | | | | |
|--------------------|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | (rpm) | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 45 | 55 | 65 |
| 10,6 | 20 | 13,6 | 6,2 | 6,0 | 4,0 | 3,5 | 3,0 | 3,3 | 1,5 | 5,1 | 1,5 |
| 17,6 | 30 | 15,2 | 6,2 | 4,2 | 4,9 | 4,3 | 3,0 | 9,6 | 5,3 | 13,7 | 16,9 |
| 25,1 | 40 | 5,1 | 5,8 | 7,0 | 4,3 | 6,7 | 7,8 | 7,7 | 4,9 | 8,8 | 22,5 |
| 33,2 | 50 | 13,9 | 11,6 | 10,7 | 10,3 | 17,0 | 11,0 | 10,1 | 19,0 | 14,3 | 13,5 |
| 41,7 | 60 | 15,0 | 16,8 | 14,0 | 14,4 | 11,4 | 14,7 | 13,8 | 23,6 | 21,6 | 14,7 |
| 4,4 | 10 | 23,2 | 20,1 | 14,9 | 11,1 | 7,4 | 8,3 | 8,1 | 5,1 | 15,4 | 4,7 |

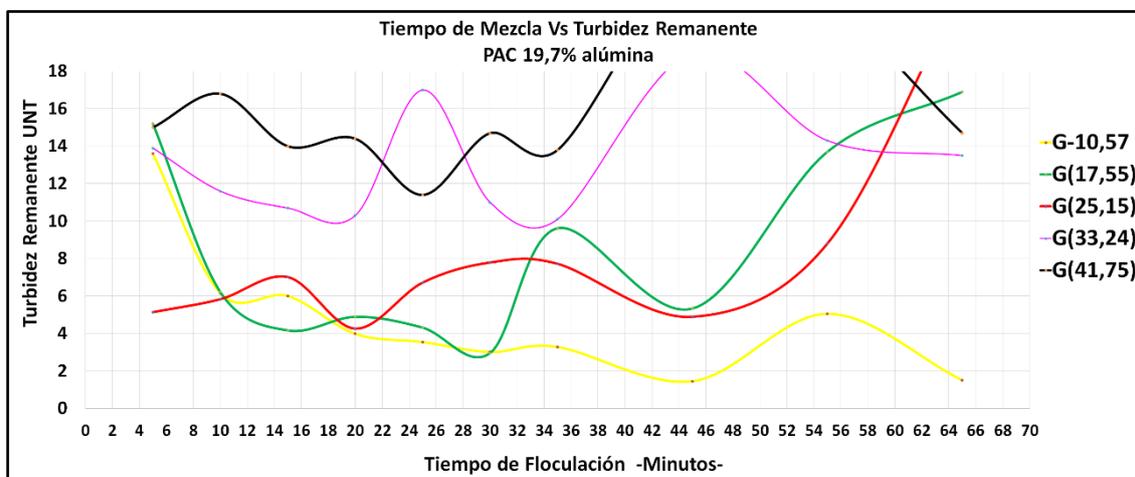
Se presenta a continuación en la gráfica 26 los gradientes de velocidad de mayor remoción de turbiedad para cada tiempo de mezcla.



Gráfica 26. Gradientes de mayor remoción de turbiedad.

Se puede observar en la gráfica 26 el gradiente de mezcla de $10,6 \text{ s}^{-1}$, logra el mayor desempeño en remoción de turbiedad desde los 20 - 45 minutos, dejando así menos del 2,5% del material remanente para su tratamiento en la etapa posterior la sedimentación.

De la tabla 33 se graficaron las curvas de gradientes que optimizan la floculación para la muestra 9.



Gráfica 27. Tiempo de Mezcla VS Turbiedad Residual / Turbiedad inicial 51,2 UNT

Se puede observar en la gráfica 27 en las curvas de color fucsia y negro gradientes de 33,24 y 41,75 s^{-1} no favorecen la remoción de las partículas alejándose de los rangos óptimos de remoción de turbidez. Los gradientes de 25,15 - 17,55 - 10,57 s^{-1} optimizan la remoción de acuerdo al tiempo de retención hidráulico de los floculadores.

La tabla 34 presenta los parámetros óptimos de mezcla seleccionados para una turbiedad inicial de 52,2 UNT.

Tabla 34. Parámetros óptimos de floculación / turbiedad inicial 52,2 UNT

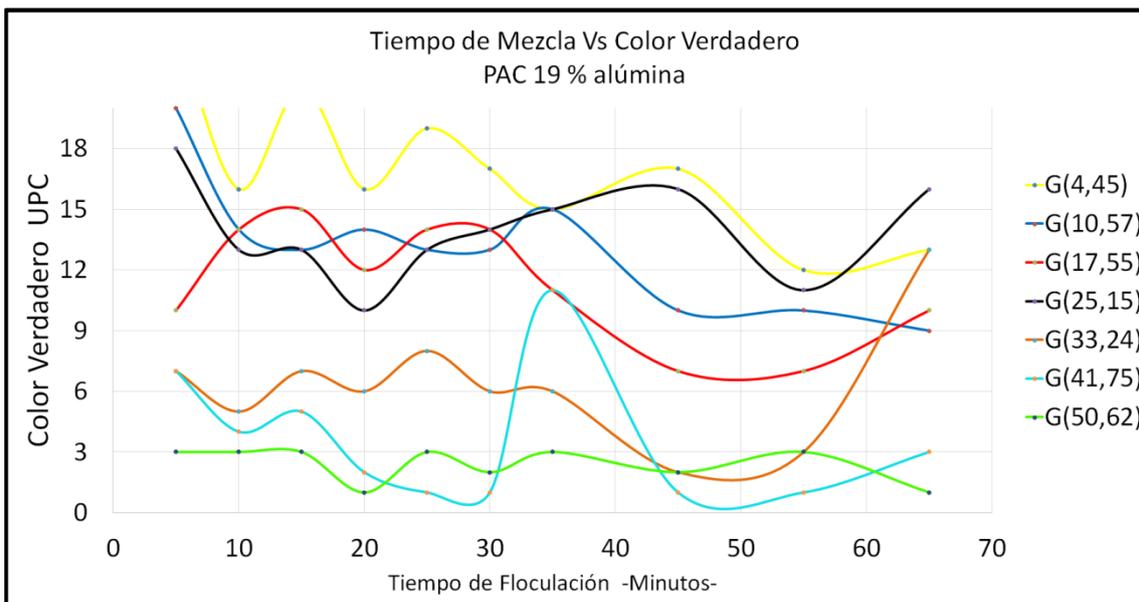
| (G ⁿ) T = k | | | | | |
|-------------------------|-----------|--------|---------|---------------|--------------------|
| G | T | logG | logT | n | k |
| 10,57 | 25 | 1,0241 | 1,39794 | 1,3495 | 1142,878335 |
| 17,55 | 16 | 1,2443 | 1,20412 | | |
| 25,15 | 10 | 1,4005 | 1 | | |

Los resultados obtenidos en la medición de color residual en las pruebas de jarras se reportan en la tabla 35.

Tabla 35. Resultados Prueba de Jarras Color Residual / Color aparente 113 UPC

| Gradiente (s-1) | (rpm) | Tiempo de floculación (min) | | | | | | | | | |
|--------------------|-------|-----------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 45 | 55 | 65 |
| 4,45 | 10 | 24 | 16 | 21 | 16 | 19 | 17 | 15 | 17 | 12 | 13 |
| 10,57 | 20 | 20 | 14 | 13 | 14 | 13 | 13 | 15 | 10 | 10 | 9 |
| 17,55 | 30 | 10 | 14 | 15 | 12 | 14 | 14 | 11 | 7 | 7 | 10 |
| 25,15 | 40 | 18 | 13 | 13 | 10 | 13 | 14 | 15 | 16 | 11 | 16 |
| 33,24 | 50 | 7 | 5 | 7 | 6 | 8 | 6 | 6 | 2 | 3 | 13 |
| 41,75 | 60 | 7 | 4 | 5 | 2 | 1 | 1 | 11 | 1 | 1 | 3 |
| 50,62 | 70 | 3 | 3 | 3 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 1 |

A partir de los datos registrados en la tabla 35 se elabora la gráfica 28.



Gráfica 28. Tiempo de mezcla VS Color Residual / Color aparente 113 UPC

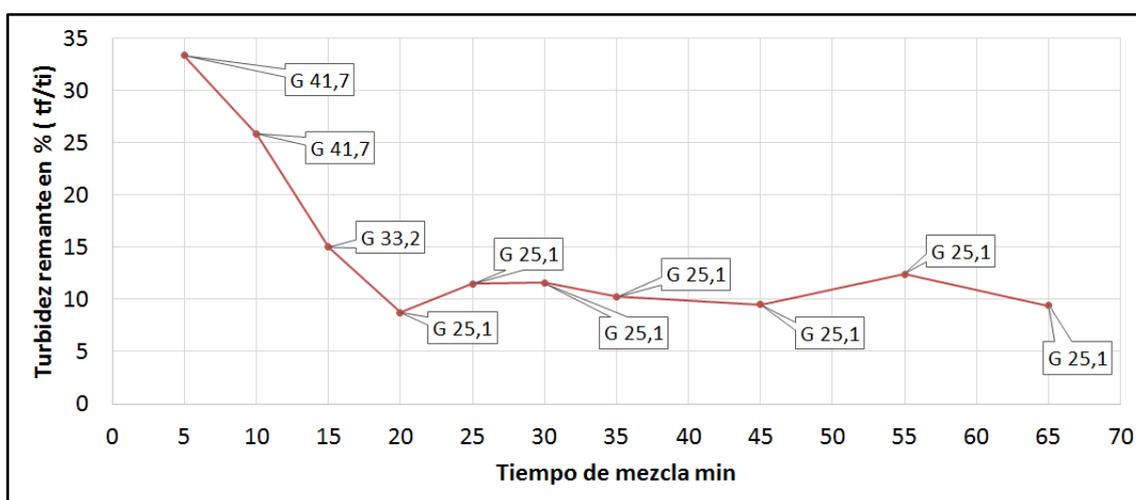
Nótese en la gráfica 28 que para rangos de gradientes de velocidad entre $4,45 - 25,15 \text{ s}^{-1}$ no se efectúa una buena remoción de color. Para esta muestra se puede obtener una alta remoción de color si se operan con gradientes decrecientes entre el rango de $50,62 - 33,24 \text{ s}^{-1}$.

La tabla 36 presenta los resultados obtenidos en las pruebas de jarras realizadas para cada gradiente de mezcla en la muestra 10. En ella se reporta los valores de turbiedad residual para diferentes tiempos de mezcla.

Tabla 36. Resultados Prueba de Jarras Turbiedad Residual / Turbiedad Inicial 12UNT

| Gradiente (s-1) | (rpm) | Tiempo de floculación (min) | | | | | | | | | |
|--------------------|-------|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 45 | 55 | 65 |
| 10,6 | 20 | 7,4 | 7,6 | 12,2 | 5,7 | 14,1 | 16,5 | 9,1 | 14,6 | 13,1 | 28,6 |
| 17,6 | 30 | 5,0 | 4,5 | 5,8 | 4,8 | 13,6 | 13,4 | 13,8 | 14,2 | 13,3 | 24,8 |
| 25,1 | 40 | 7,9 | 3,4 | 3,8 | 1,1 | 1,4 | 1,4 | 1,2 | 1,1 | 1,5 | 1,1 |
| 33,2 | 50 | 4,5 | 3,1 | 1,8 | 4,5 | 4,0 | 4,2 | 3,8 | 4,5 | 5,3 | 7,8 |
| 41,7 | 60 | 4,0 | 3,1 | 3,6 | 6,9 | 7,4 | 6,5 | 6,4 | 5,4 | 6,0 | 6,2 |
| 4,4 | 10 | 6,7 | 10,1 | 11,1 | 15,0 | 30,2 | 29,0 | 14,3 | 28,7 | 14,6 | 30,3 |

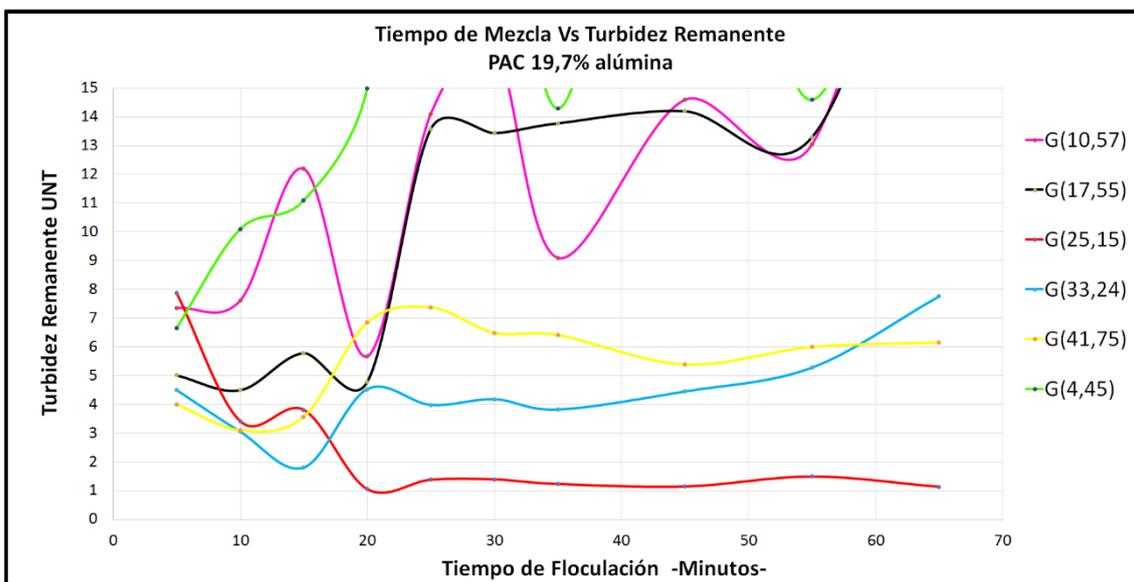
De cada tiempo de mezcla presentado en la tabla 36 se graficaron los gradientes de mayor remoción de turbiedad como se puede observar en la gráfica 29 a continuación.



Gráfica 29. Gradientes de mayor remoción de turbiedad.

Con una velocidad de agitación de $25,1 \text{ s}^{-1}$ a los 20 minutos se logra dejar el 8% de turbiedad remanente en la muestra, no obstante la remoción de la turbiedad empieza desde los 5 minutos usando un gradiente de mayor agitación como el de $41,7 \text{ s}^{-1}$.

La grafica 30 presenta las curvas de gradiente óptimo seleccionadas, las cuales mejoran la eficiencia en la aglomeración de las partículas empleando como coagulante el policloruro de aluminio. De esta grafica se escoge el tiempo óptimo para cada curva de gradiente.



Gráfica 30. Tiempo de Mezcla VS Turbiedad Residual / Turbiedad inicial 12 UNT

La turbiedad es baja en la muestra 10 y 5 y al igual que en la muestra 5, para poder formar el floc, se requiere de una agitación fuerte con gradientes entre 50 y 20 s⁻¹ y por medio de esta agitación aumentar la frecuencia de choque de las partículas y así se aglomeren.

La tabla 37 presenta los parámetros óptimos de floculación obtenidos de la gráfica 30.

Tabla 37. Parámetros óptimos de floculación / turbiedad inicial 12UNT

| (G ⁿ) T = k | | | | | |
|-------------------------|----|--------|-------|--------|-------------|
| G | T | logG | logT | n | k |
| 25,15 | 23 | 1,4005 | 1,362 | 1,3495 | 1142,878335 |
| 33,24 | 15 | 1,5217 | 1,176 | | |
| 41,75 | 10 | 1,6207 | 1,000 | | |

En la ecuación 27 las constantes k y n se mantienen constantes para las muestras 8,9 y 10 con turbiedades similares exceptuando la muestra 10.

$$T = \frac{k}{G^n} = \frac{1142,87}{G^{1,3495}} \quad \text{Ecuación 27}$$

La tabla 38 presenta los datos obtenidos en la medición de color residual registrado para diferentes gradientes y tiempos de mezcla para la muestra 10.

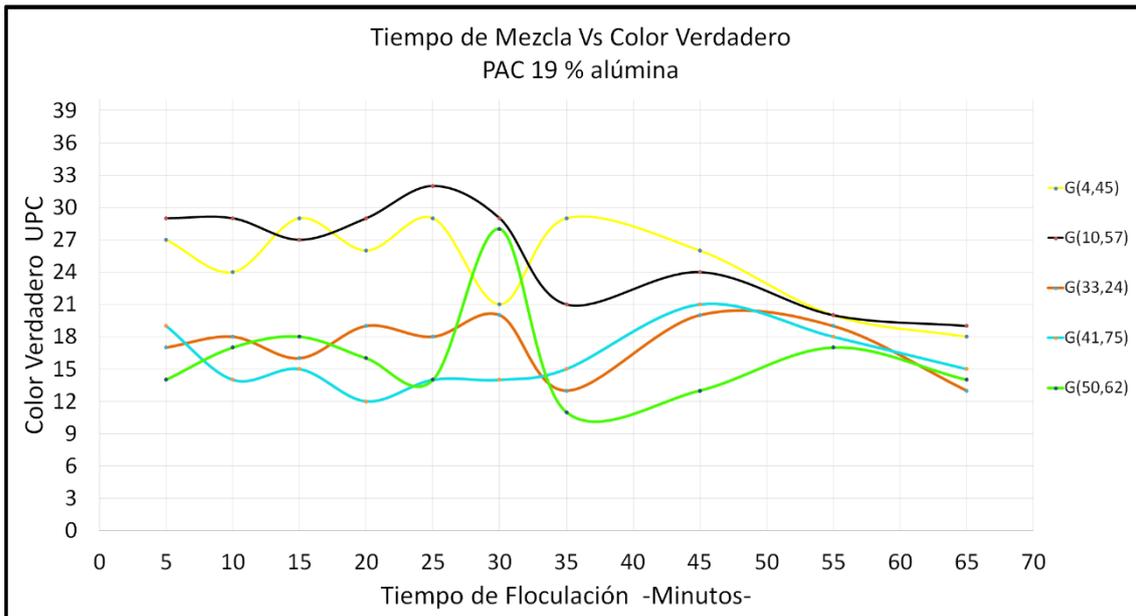
Tabla 38. Resultados Prueba de Jarras Color Residual / Color aparente 125 UPC

| Gradiente | | Tiempo de floculación (min) | | | | | | | | | |
|-----------|-------|-----------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| (s-1) | (rpm) | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 45 | 55 | 65 |
| 4,4 | 10 | 27 | 24 | 29 | 26 | 29 | 21 | 29 | 26 | 20 | 18 |
| 10,6 | 20 | 29 | 29 | 27 | 29 | 32 | 29 | 21 | 24 | 20 | 19 |
| 17,6 | 30 | 29 | 26 | 21 | 28 | 22 | 27 | 23 | 24 | 30 | 21 |
| 25,1 | 40 | 17 | 17 | 18 | 18 | 21 | 17 | 24 | 18 | 17 | 19 |
| 33,2 | 50 | 17 | 18 | 16 | 19 | 18 | 20 | 13 | 20 | 19 | 13 |
| 41,7 | 60 | 19 | 14 | 15 | 12 | 14 | 14 | 15 | 21 | 18 | 15 |
| 50,6 | 70 | 14 | 17 | 18 | 16 | 14 | 28 | 11 | 13 | 17 | 14 |

Las aguas tratadas por la PTAP-Floridablanca particularmente son aguas con gran carga de color y baja turbiedad. Una de las propiedades importantes del PAC es su eficiente acción para remover el color y esto se debe a su naturaleza de polímero el cual barre con los diferentes tamaños de partículas encontrados en el agua.

En base a los resultados reportados en la tabla 38 se elabora la gráfica 31 la cual relaciona el tiempo de mezcla contra el color residual obtenidos en las pruebas de jarras.

El policloruro de aluminio es un reactivo que no aporta color al agua ni modifica el pH, mientras que el coagulante sulfato de aluminio si disminuye el pH y aumenta el color levemente en los primeros momentos de aplicación del coagulante.



Gráfica 31. Tiempo de Mezcla VS Color Residual / Turbiedad inicial 12 UNT

La grafica 31 muestra el rango adecuado de gradiente y tiempo de mezcla en función de la remoción de color. Las curvas de color verde, azul y café correspondientes a los gradientes de 50,62 - 41,75 - 33,24 s^{-1} proporcionan una mejor remoción que la mezcla influenciada por los gradientes 10,57 y 4,45 s^{-1} . La remoción de color es apropiada con intensidades de agitación altas, gradientes bajos pueden ser perjudiciales removiendo color.

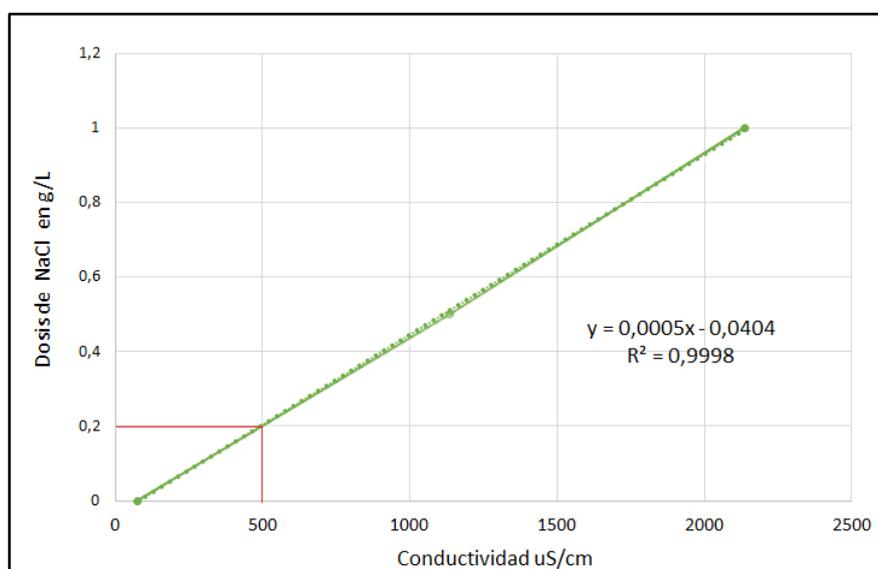
Se puede concluir con los resultados obtenidos con el PAC, que este logra flocular fácilmente el agua cruda para las diferentes turbiedades analizadas, con gradientes de velocidad altos entre 41 a 25 s^{-1} y en menor tiempo de mezcla desde los 7 hasta los 25 minutos en comparación con el alumbre el cual se debe operar con mayor precaución ya que un cambio drástico en la turbiedad del agua dañaría la eficiencia del proceso como se demostró en los resultados generados por el sulfato el cual para poder flocular el agua de una manera eficiente con las turbiedades en las muestras analizadas resulta menos versátil que el policloruro.

4.2. Parámetros de floculación obtenidos en la planta.

4.2.1. Prueba de trazadores.

A continuación se presenta los resultados preliminares necesarios para la prueba de trazadores. Se halló la dosis de cloruro de sodio para la determinación de la masa de trazador para cada dispositivo de mezcla y el tiempo de duración de la prueba de trazadores en cada floculador.

En la gráfica 32 se puede observar la dosis necesaria de sal para alcanzar una conductividad igual a 500 uS/cm. La dosis obtenida 0,2 g/L de NaCl.



Gráfica 32 Curva de Calibración del Trazador

El floculador hidráulico tiene un volumen aproximado de 295 m³ y un caudal de operación promedio de 215 Lps, por lo tanto, la cantidad de sal a agregar es de 60 kg de sal y el tiempo de duración de la prueba calculado fue **57 minutos**.

El floculador mecánico recíprocante tiene un volumen aproximado de 305 m³ y un caudal de operación promedio de 320 Lps, por lo tanto, la cantidad de sal a agregar es de 62 kg de sal.

Igualmente, el tiempo de duración de la prueba fue 3 veces el tiempo de retención hidráulico, el cual es de 20 minutos para un caudal de 260 Lps. Por lo tanto, la duración de la prueba de trazadores fue de **60 minutos**.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en la prueba de trazadores realizada en los floculadores de PTAP-Floridablanca.

4.2.1.1 Resultados Prueba de Trazadores Floculador Hidráulico

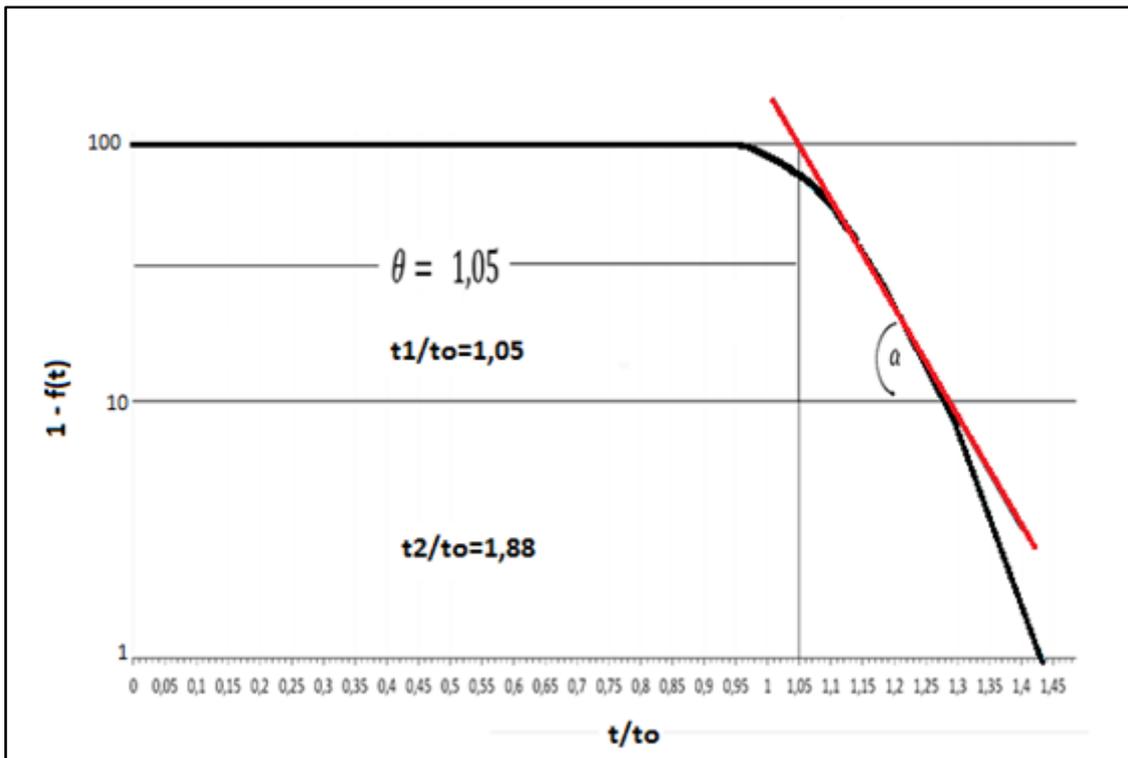
La tabla 39 presenta los resultados del ensayo en el floculador hidráulico. Este se realizó con un caudal de 270 L/s, el volumen del tanque es de 295 m³ aproximadamente, con un tiempo de retención hidráulico de 18,21 minutos, el tiempo real obtenido en la prueba fue de 20 minutos. La tabla 39 muestra el cambio en la conductividad a medida que el trazador va saliendo de la unidad.

Tabla 39. Resultados Prueba de Trazadores Floculador Hidráulico

| t | C | C-Co | Sumatoria(C-Co) | t/to | ft | 1-ft |
|----|-------|--------|-----------------|--------|-------|-------|
| 0 | 79,2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 |
| 2 | 81,3 | 2,1 | 2,1 | 0,1098 | 0,054 | 99,95 |
| 4 | 79,7 | 0,5 | 2,6 | 0,2197 | 0,066 | 99,93 |
| 6 | 79,2 | 0 | 2,6 | 0,3295 | 0,066 | 99,93 |
| 8 | 79,2 | 0 | 2,6 | 0,4393 | 0,066 | 99,93 |
| 10 | 86,4 | 7,2 | 9,8 | 0,5492 | 0,25 | 99,75 |
| 12 | 79,7 | 0,5 | 10,3 | 0,659 | 0,263 | 99,74 |
| 14 | 79,8 | 0,6 | 10,9 | 0,7688 | 0,278 | 99,72 |
| 16 | 81,1 | 1,9 | 12,8 | 0,8786 | 0,326 | 99,67 |
| 18 | 337 | 257,8 | 270,6 | 0,9885 | 6,9 | 93,1 |
| 20 | 1506 | 1426,8 | 1697,4 | 1,0983 | 43,28 | 56,72 |
| 22 | 1477 | 1397,8 | 3095,2 | 1,2081 | 78,93 | 21,07 |
| 24 | 674 | 594,8 | 3690 | 1,318 | 94,09 | 5,906 |
| 26 | 268 | 188,8 | 3878,8 | 1,4278 | 98,91 | 1,091 |
| 28 | 105,9 | 26,7 | 3905,5 | 1,5376 | 99,59 | 0,411 |
| 30 | 84,3 | 5,1 | 3910,6 | 1,6475 | 99,72 | 0,28 |
| 32 | 81,9 | 2,7 | 3913,3 | 1,7573 | 99,79 | 0,212 |
| 34 | 79,7 | 0,5 | 3913,8 | 1,8671 | 99,8 | 0,199 |
| 36 | 82 | 2,8 | 3916,6 | 1,9769 | 99,87 | 0,127 |
| 38 | 80,4 | 1,2 | 3917,8 | 2,0868 | 99,9 | 0,097 |
| 40 | 79,8 | 0,6 | 3918,4 | 2,1966 | 99,92 | 0,082 |
| 42 | 79,4 | 0,2 | 3918,6 | 2,3064 | 99,92 | 0,076 |
| 44 | 80,4 | 1,2 | 3919,8 | 2,4163 | 99,95 | 0,046 |
| 46 | 79,3 | 0,1 | 3919,9 | 2,5261 | 99,96 | 0,043 |
| 48 | 79,7 | 0,5 | 3920,4 | 2,6359 | 99,97 | 0,031 |
| 50 | 79,2 | 0 | 3920,4 | 2,7458 | 99,97 | 0,031 |
| 52 | 79,3 | 0,1 | 3920,5 | 2,8556 | 99,97 | 0,028 |
| 54 | 79,6 | 0,4 | 3920,9 | 2,9654 | 99,98 | 0,018 |
| 56 | 79,9 | 0,7 | 3921,6 | 3,0753 | 100 | 0 |
| 58 | 79,2 | 0 | 3921,6 | 3,1851 | 100 | 0 |
| 60 | 79,2 | 0 | 3921,6 | 3,2949 | 100 | 0 |

Análisis Hidráulico por el método de Wolf Resnick-Floculador Hidráulico-

Se grafican en escala semi-logarítmica los datos de las columnas t/t_0 vs $(1-f)$ de la tabla 39, en esta gráfica se traza la línea tangente a la curva, de donde se podrán obtener los valores de θ y de α como se puede observar en la gráfica 33 a continuación.



Gráfica 33. Método Grafico de Wolf & Resnick Floculador Hidráulico

Según la gráfica 33 los valores de las incógnitas θ y α son:

$$\theta = 1,05 ; \frac{t1}{t_0} = 1,05 ; \frac{t2}{t_0} = 1,8891 ; \text{Tan}(\alpha) = 1,1917$$

Determinación del flujo a pistón

$$P = \frac{\theta \tan \alpha}{0,435 + \theta \tan \alpha} = \frac{(1,05)(1,1917)}{0,435 + (1,05)(1,1917)} = 74,20\%$$

La unidad presenta un porcentaje de flujo a pistón del 74,20%

Determinación del flujo mezclado

$$M = (1 - P) = 1 - 0,7420 = 25,8\%$$

La unidad presenta un porcentaje de flujo Mezclado del 25,8%.

Determinación de los espacios muertos

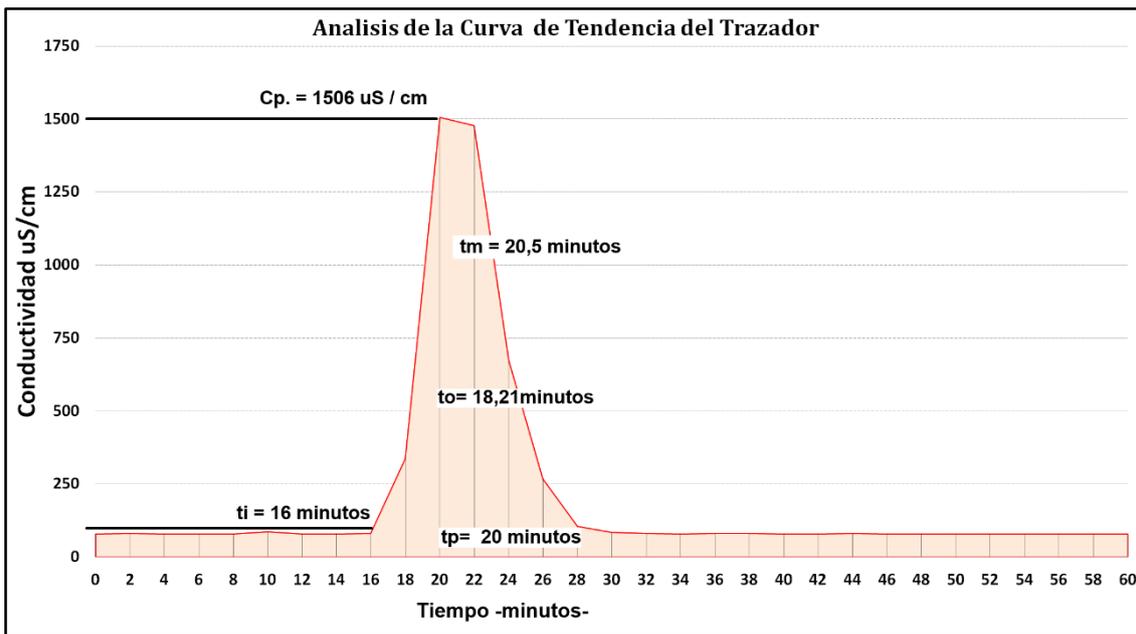
$$m = 1 - \frac{\theta}{P} = 1 - \frac{1,05}{0,7420} = -0,415$$

El floculador hidráulico no posee espacios muertos, el resultado obtenido es un valor negativo, lo cual indica que la presencia de espacios muertos es del **0,0%**

El dispositivo de floculación hidráulico se comporta en gran medida con el flujo pistón. Las pantallas de concreto de cada zona corrigen la posibilidad de espacios muertos y cortos circuitos.

Análisis Hidráulico por el método de la Curva de Tendencia

Se puede observar en la gráfica 34, a los 16 minutos como empieza aparecer el trazador en el efluente del floculador y a los 20 minutos se logra el mayor pico de conductividad cercano al tiempo de retención teórico, indicando el comportamiento hidráulico a pistón.



Gráfica 34. Análisis de la Curva de Tendencia del Trazador Floculador Hidráulico

La tabla 40 reporta los resultados del análisis de la curva de tendencia del trazador.

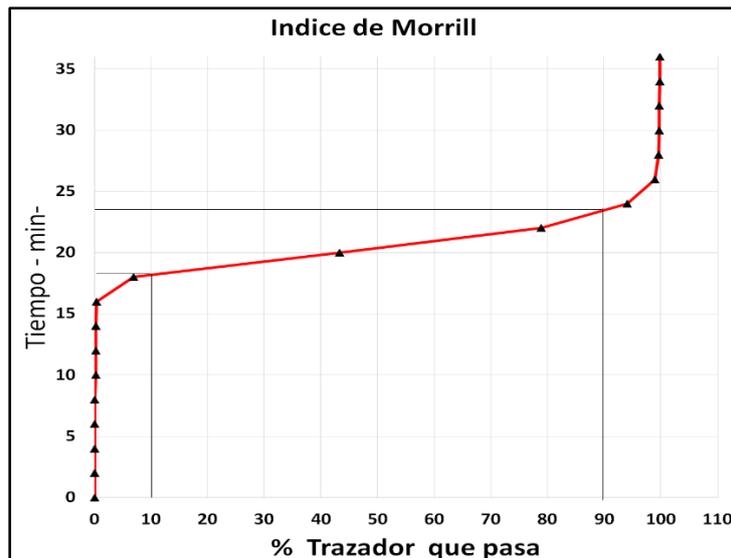
| | | |
|---|--|--------------|
| Conductividad pico (Cp) | 1506 uS / cm | |
| Tiempo máxima conductividad (tp) | 20 minutos | |
| Tiempo en que ha pasado el 50% del trazador (tm) | 20,5 minutos | |
| Tiempo de retención hidráulico (to) | 18,21 minutos | |
| Tiempo de aparición del trazador (ti) | 16 minutos | |
| Tiempo que transcurre hasta que atraviesa la totalidad del trazador (tf) | 32 minutos | |
| RELACION DE ANÁLISIS | tp/to = | 1,098 |
| | ti/to = | 0,878 |
| | tm/to = | 1,12 |
| | $e = \frac{(tf-tp)-(tp-ti)}{to} =$ | 0,439 |

Tabla 40 : Resultados de la Curva de Tendencia Floculador Hidráulico

El floculador hidráulico realiza el tratamiento de las partículas influenciado por el tipo de flujo a pistón. Según el resultado de la relación tp/to tiende a 1 y la relación $ti/to > 0,5$.

Índice de Morrill

Los resultados del estudio de trazabilidad analizados en base al índice de Morrill comprueban la predominancia del flujo pistón en el floculador hidráulico. El 10 % del trazador tarda en pasar la unidad 18,2 minutos y el 90 % 5,2 minutos después. La grafica 35 presenta el índice de Morrill



Gráfica 35 : Índice de Morrill Floculador Hidráulico

$$IM = \frac{\text{tiempo en que pasa el 90\%}}{\text{tiempo en que pasa el 10\%}} = \frac{23,4}{18,2} = 1,28$$

El resultado del índice de Morrill es cercano a la unidad, indicando el tipo de flujo pistón en el floculador. A medida que hay mayor proporción de flujo mezclado, mayor el ángulo que la curva hace con la horizontal, debido a que hay una distribución más amplia del tiempo de retención. Los resultados obtenidos mostraron que gran parte de la cantidad del trazador, salió en un tiempo (t) semejante al tiempo de retención hidráulico (to) del floculador.

4.2.1.2 Resultados Prueba de Trazadores Floculador Reciprocante

La tabla 41 presenta los resultados del ensayo en el floculador reciprocante. Este se realizó con un caudal de 260 L/s, el volumen del tanque es de 205 m³ aproximadamente, con un tiempo de retención hidráulico de 19,6 minutos, el

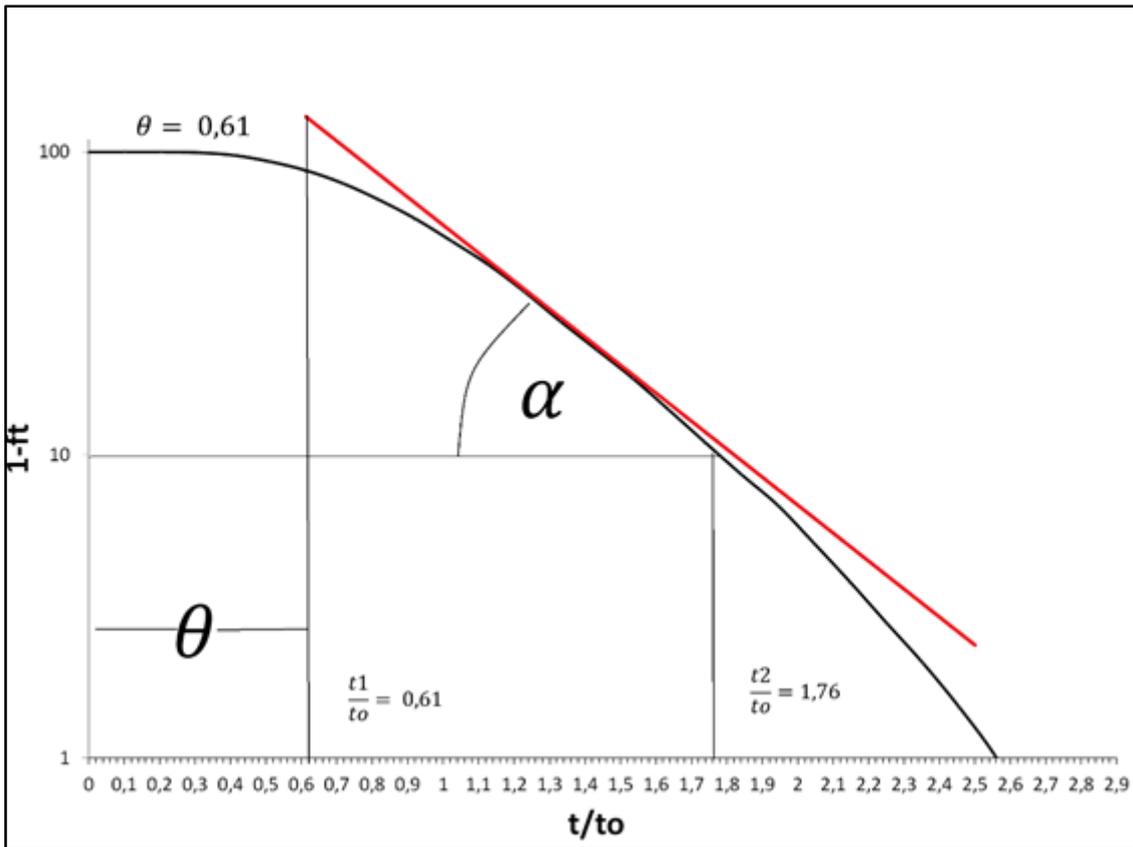
tiempo real de retención obtenido fue de 20 minutos. La tabla 43 muestra el cambio en la conductividad a medida que el trazador va saliendo de la unidad.

Tabla 41. Resultados Prueba de Trazadores Floculador Reciprocante.

| t | C | C-Co | Sumatoria(C-Co) | t/to | ft | 1-ft |
|----|-------|-------|-----------------|---------|--------|--------|
| 0 | 79,2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 |
| 2 | 79,6 | 0,4 | 0,4 | 0,1023 | 0,009 | 99,991 |
| 4 | 80 | 0,8 | 1,2 | 0,20459 | 0,0269 | 99,973 |
| 6 | 98,8 | 19,6 | 20,8 | 0,30689 | 0,466 | 99,534 |
| 8 | 168,7 | 89,5 | 110,3 | 0,40918 | 2,4713 | 97,529 |
| 10 | 284,1 | 204,9 | 315,2 | 0,51148 | 7,062 | 92,938 |
| 12 | 352 | 272,8 | 588 | 0,61377 | 13,174 | 86,826 |
| 14 | 436 | 356,8 | 944,8 | 0,71607 | 21,168 | 78,832 |
| 16 | 492 | 412,8 | 1357,6 | 0,81836 | 30,417 | 69,583 |
| 18 | 495 | 415,8 | 1773,4 | 0,92066 | 39,733 | 60,267 |
| 20 | 498 | 418,8 | 2192,2 | 1,02295 | 49,116 | 50,884 |
| 22 | 448 | 368,8 | 2561 | 1,12525 | 57,379 | 42,621 |
| 24 | 433 | 353,8 | 2914,8 | 1,22754 | 65,306 | 34,694 |
| 26 | 394 | 314,8 | 3229,6 | 1,32984 | 72,359 | 27,641 |
| 28 | 318 | 238,8 | 3468,4 | 1,43213 | 77,709 | 22,291 |
| 30 | 274,2 | 195 | 3663,4 | 1,53443 | 82,078 | 17,922 |
| 32 | 250,7 | 171,5 | 3834,9 | 1,63672 | 85,921 | 14,079 |
| 34 | 216,6 | 137,4 | 3972,3 | 1,73902 | 88,999 | 11,001 |
| 36 | 185,4 | 106,2 | 4078,5 | 1,84131 | 91,379 | 8,6214 |
| 38 | 159,2 | 80 | 4158,5 | 1,94361 | 93,171 | 6,829 |
| 40 | 155,6 | 76,4 | 4234,9 | 2,0459 | 94,883 | 5,1173 |
| 42 | 137,6 | 58,4 | 4293,3 | 2,1482 | 96,191 | 3,8088 |
| 44 | 124,4 | 45,2 | 4338,5 | 2,25049 | 97,204 | 2,7961 |
| 46 | 111,9 | 32,7 | 4371,2 | 2,35279 | 97,937 | 2,0635 |
| 48 | 105,4 | 26,2 | 4397,4 | 2,45508 | 98,524 | 1,4765 |
| 50 | 99,7 | 20,5 | 4417,9 | 2,55738 | 98,983 | 1,0172 |
| 52 | 96 | 16,8 | 4434,7 | 2,65967 | 99,359 | 0,6408 |
| 54 | 89,2 | 10 | 4444,7 | 2,76197 | 99,583 | 0,4167 |
| 56 | 89,1 | 9,9 | 4454,6 | 2,86426 | 99,805 | 0,1949 |
| 58 | 87,1 | 7,9 | 4462,5 | 2,96656 | 99,982 | 0,0179 |
| 60 | 80 | 0,8 | 4463,3 | 3,06885 | 100 | 0 |

Análisis Hidráulico por el método de Wolf Resnick-Floculador Reciprocante.

Se grafican en escala semi-logarítmica los datos de las columnas t/to VS (1-ft) de la tabla 43, en esta grafica se traza la línea tangente a la curva, de donde se podrán obtener los valores de θ y de α



Gráfica 36. Método Gráfico de Wolf & Resnick Floculador Reciprocante.

Según la gráfica 36 se puede calcular el valor de las incógnitas θ y de α .

$$\theta = 0,61 \ ; \ \frac{t1}{to} = 0,61 \ ; \ \frac{t2}{to} = 1,76 \ ; \ \text{Tan}(\alpha) = 0,8692$$

Determinación del flujo a pistón

$$P = \frac{\theta \tan \alpha}{0,435 + \theta \tan \alpha} = \frac{(0,61)(0,8682)}{0,435 + (0,61)(0,8682)} = \mathbf{54,9\%}$$

La unidad presenta un porcentaje de flujo a pistón del 54,9%.

Determinación del flujo mezclado

$$M = (1 - P) = 1 - 0,549 = \mathbf{45,1\%}$$

La unidad presenta un porcentaje de flujo Mezclado del 45,1%.

Determinación de los Espacios Muertos

$$m = 1 - \frac{\theta}{P} = 1 - \frac{0,61}{0,549} = -0,11$$

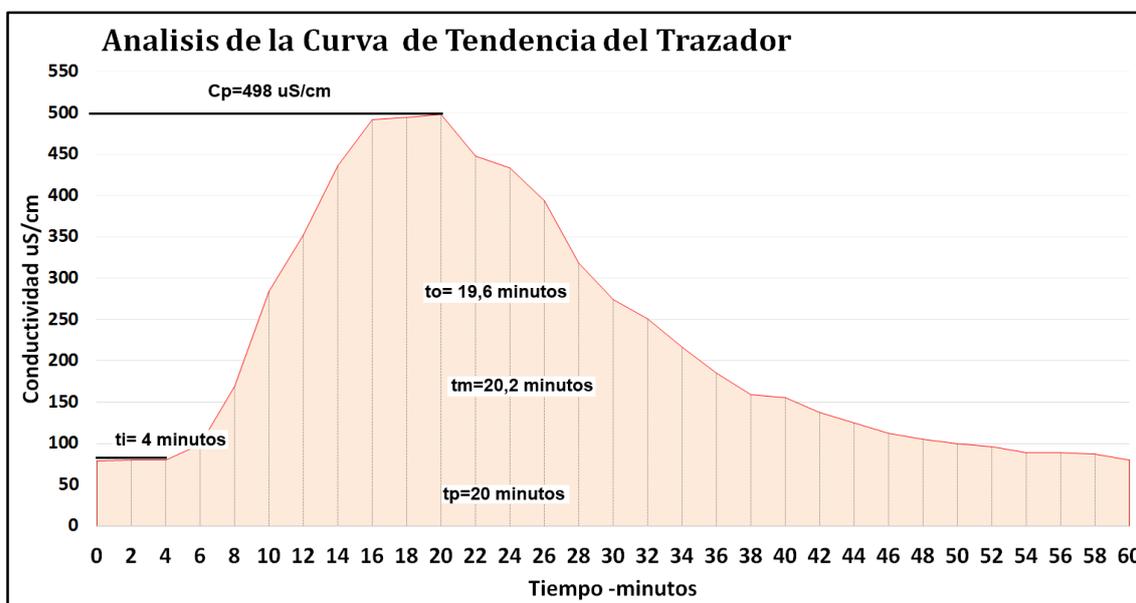
El floculador recíprocante no posee espacios muertos, el resultado obtenido es un valor negativo, lo cual indica que la presencia de espacios muertos es del **0,0%**. El dispositivo al estar dividido en cuatro compartimientos reduce la posibilidad del corto circuito y espacios muertos.

El porcentaje de flujo a pistón es del 54,9 % esto quiere decir que más de la mitad de las partículas salen en un mismo tiempo de mezcla.

La fracción del flujo mezclado 45,1 % esto quiere decir que en cualquier punto del floculador la concentración de las partículas es maso menos constante.

Análisis Hidráulico por el Método de la Curva de Tendencia

Con los resultados obtenidos en la tabla 41 se elabora la gráfica 37, en esta se relaciona el tiempo de la prueba vs la conductividad registrada a la salida.



Gráfica 37. Análisis Hidráulico por el Método de la Curva de Tendencia Floculador Reciprocante

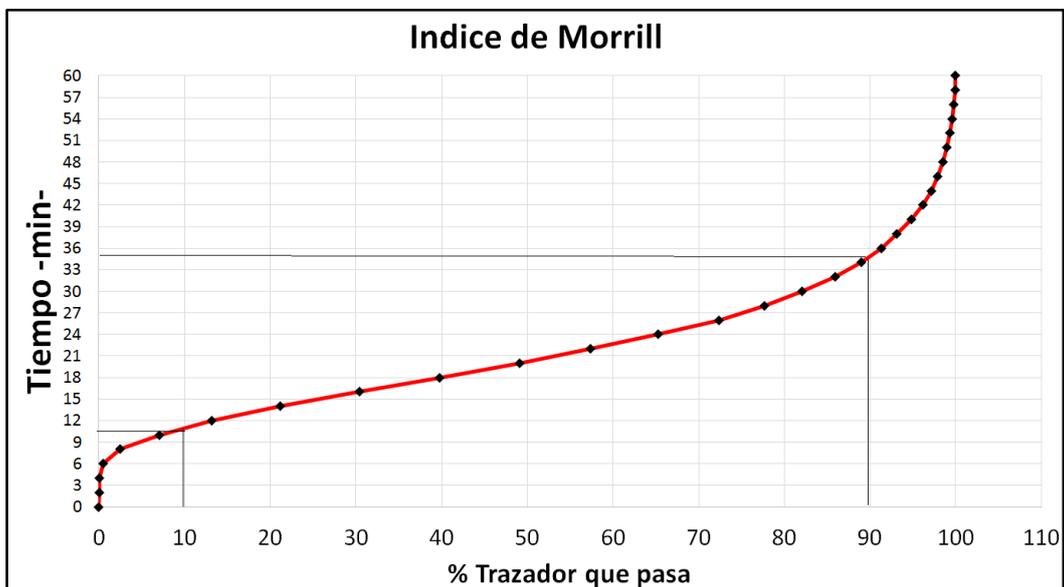
| | |
|---|---|
| Conductividad pico (Cp.) | 498 uS/cm |
| Tiempo máxima conductividad (tp) | 20 minutos |
| Tiempo en que ha pasado el 50% del trazador (tm) | 20,2 minutos |
| Tiempo de retención hidráulico (to) | 19,6 minutos |
| Tiempo de aparición del trazador (ti) | 6 minutos |
| Tiempo que transcurre hasta que atraviesa la totalidad del trazador (tf) | 60 minutos |
| RELACION DE ANÁLISIS | $tp/to = 1,02$ |
| | $ti/to = 0,32$ |
| | $tm/to = 1,030$ |
| | $e = \frac{(tf-tp)-(tp-ti)}{to} = 1,32$ |

Tabla 42. Resultados de la Curva de Tendencia Floculador Reciprocante

Nótese la diferencia en la tendencia de la curva del floculador hidráulico y del reciprocante. En la curva de tendencia de la gráfica 37 se puede observar que el pico de conductividad se mantiene estable durante 4 minutos indican el flujo mezclado a diferencia del floculador hidráulico el cual después de alcanzar un pico máximo de conductividad decae drásticamente característico del flujo a pistón.

Índice de Morrill

La grafica 38 muestra que medida que hay mayor proporción de flujo mezclado, mayor el ángulo que la curva hace con la horizontal, debido a que hay una distribución más amplia del tiempo de retención.



Gráfica 38. Índice de Morrill Floculador Reciprocante

$$IM = \frac{\text{tiempo en que pasa el 90\%}}{\text{tiempo en que pasa el 10\%}} = \frac{34,5}{10,8} = 3,19$$

El resultado obtenido comprueba la predominancia del flujo mezclado en el floculador reciprocante $3,19 > 1$.

4.2.2. Gradientes reales de floculación en condiciones de operación.

La Sección 1 tiene un tanque de floculación con un volumen aproximado de 305 m³, 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

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. El agua floculada pasa por un canal de paso directo entre el canal de aforo y el canal de entrada al sedimentador de aproximadamente 0,71 m de ancho.

Por medio de las ecuaciones (10) y (11) mencionadas anteriormente, se calcula el gradiente de velocidad para cada floculador en cada sección de la planta.

La tabla 43 presenta los gradientes reales del floculador mecánico recíprocante calculados en cada uno de sus compartimientos a un caudal de operación de 0,2761 m³/s, temperatura del agua de 25 grados Celsius.

Tabla 43. Gradientes Reales Floculador Mecánico Recíprocante

| Compartimiento | Volumen, m³ | Gradiente s⁻¹ |
|-----------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 71,37 | 80 |
| 2 | 77,78 | 57,2 |
| 3 | 67,71 | 29,8 |
| 4 | 86,93 | 26,5 |

La agitación en el primer compartimiento resulta demasiado turbulenta pudiendo influenciar el rompimiento de los flóculos si se deja por un tiempo de mezcla superior al encontrado por medio de las ecuaciones obtenidas en los ensayos de laboratorio.

Se contaron el número de revoluciones por minuto entregadas de cada motor en los compartimientos del floculador. En el primer y segundo compartimiento se generaban 6,5 y 5,5 vueltas en un minuto respectivamente pero en el cuarto compartimiento se generan 3,55 vueltas en un minuto mientras que en el tercero 3,25 vueltas en un minuto, siendo de mayor velocidad el 4 compartimiento, no obstante el volumen en el 4 compartimiento es mayor que en el 3, esto logra disminuir la agitación producida por las paletas a la masa de agua en el tanque y por este motivo el gradiente que se genera en ese compartimiento no es mayor que en el tercero, esto indica que el floculador está programado de forma decreciente como se puede observar en la tabla 39.

La tabla 44 presenta los gradientes reales del floculador hidráulico calculados en cada zona del dispositivo. Se calcularon los gradientes de mezcla para dos caudales diferentes 0,2761 y 0,308 m³/s a una temperatura del agua de 20 grados Celsius.

Tabla 44. Gradientes Reales Floculador Hidráulico

| Caudal de operación $Q_o = 0,2761 \text{ m}^3/\text{s}$ | | | | |
|---|--|-------------------------------|-----------------------------|---|
| Zonas | Volumen m^3 | Tiempo De Retención(s) | Perdida De Carga (m) | Gradiente s^{-1} |
| 1 | 54,3 | 201 | 0,08 | 59,4 |
| 2 | 135,9 | 503 | 0,11 | 45,1 |
| 3 | 143,2 | 530 | 0,1 | 39,4 |
| Caudal de operación $Q_o = 0,308 \text{ m}^3/\text{s}$ | | | | |
| 1 | 56,5 | 183 | 0,09 | 66,9 |
| 2 | 141,3 | 459 | 0,13 | 50,6 |
| 3 | 148 | 481 | 0,1 | 44,5 |

Las velocidades de agitación generadas en el floculador hidráulico dependen del caudal de operación como se puede observar en la tabla 40, a mayor caudal mayor es el gradiente ocasionado en cada zona del floculador.

El caudal es inversamente proporcional al tiempo de retención de la unidad y a partir de esto y en base en los resultados obtenidos de los parámetros óptimos hallados en laboratorio, el tiempo y el gradiente de mezcla influye de manera directa en la formación del floc. Esto quiere decir que al aumentar el caudal implica la reducción del tiempo de retención hidráulico, si el agua contiene altos rangos de turbiedad el tiempo de mezcla no será el suficiente y la agitación será muy brusca, lo cual deteriorará la eficiencia del floculador hidráulico.

Los gradientes de mezcla calculados en condiciones de operación son eficaces para tratar aguas de turbiedades relativamente bajas de 2 a 11 UNT, se pudo comprobar lo mencionado con los resultados obtenidos en laboratorio y las ecuaciones generadas en la experimentación.

4.3. Alternativas para el mejoramiento operativo del proceso de floculación.

Las siguientes pautas son el resultado del análisis de los parámetros de mezcla obtenidos en laboratorio y los parámetros determinados en la PTAP-Floridablanca.

Los productos utilizados en la coagulación-floculación deben usarse según la calidad de agua que esté llegando para tratamiento como se pudo comprobar con los ensayos realizados en el proyecto.

La preparación de los reactivos de coagulación debe realizarse en base al contenido de alúmina Al_2O_3 presente en el sulfato de aluminio y el policloruro de aluminio o de los productos que se usen para la coagulación. Los productos preparados a una concentración del 1% logran mejores resultados que si se adicionan puros, el coagulante logra una mejor dispersión concentrado al 1%.

Alternativa 1: Operación en la Mezcla lenta con bajas turbiedades y baja carga de color.

Los resultados obtenidos para diferentes calidades de agua comprueban la alta eficiencia del alumbre en esta clase de situaciones, las sales de aluminio forman un floc de precipitado rápido y consistente el cual logra capturar la gran mayoría de los coloides y el color presentes en el agua. El sulfato logra alcanzar porcentajes de remoción en turbiedad y color por encima del 90 %. El sulfato de aluminio aporta color al agua.

Alternativa 2: Operación en la Mezcla lenta con altas turbiedades y alta carga de color.

El Policloruro de aluminio es la alternativa, en coagulación, apropiada para estas calidades de agua optimizando así el consumo de coagulante. La formación del floc se logra en un menor tiempo, lo que resultaría conveniente para el tratamiento de caudales con alta carga de coloides. El policloruro no aporta color al agua tratada por lo que es conveniente para este tipo de situaciones.

Alternativa 3: Operación en la Mezcla lenta para bajas temperaturas.

La temperatura afecta la aglomeración de las partículas como lo indica el mecanismo de transporte browniano, este tipo de transporte se da en función de la energía térmica de las partículas, su principal propósito es lograr que las partículas alcancen un tamaño de una micra para que así continúe formándose el floc, si el agua está muy fría se dificultará el mecanismo de transporte browniano por lo que es conveniente incrementar el gradiente de velocidad cuando el agua llegue con bajas temperaturas.

Alternativa 4: Operación en la Mezcla lenta para turbiedades altas (>100 UNT)

Es más fácil flocular aguas con altas turbiedades, no obstante no se puede aumentar la producción de agua cuando las turbiedades son altas, ya que estas requieren de tiempos de retención mayores. Si se aumenta el caudal, por ejemplo, en el floculador hidráulico, la agitación será mayor y de acuerdo con los

resultados de las pruebas de laboratorio, es conveniente una agitación suave para turbiedades altas.

Alternativa 5: Operación en la Mezcla lenta turbiedades bajas (<100 UNT)

Para estas situaciones se debe operar los dispositivos de mezcla con velocidades de agitación turbulentas, entre los rangos 41,7 a 33 s⁻¹, de forma decreciente en cada compartimiento o cámara del floculador. Los resultados obtenidos demuestran que gradientes con altas velocidades como los mencionados, fomentan la probabilidad de choque entre las partículas en agua de bajas turbiedades.

Principales hallazgos

Se comprobó que el alumbre requiere mayor atención a la hora de operar cuando las fluctuaciones de turbiedad se mantienen variantes mientras que la operación con el pac es más práctica en cuanto a que puede operar en un rango amplio de turbiedad con velocidades de agitación turbulentas en el caso del floculador mecánico.

Se puede establecer que los tiempos reales encontrados del ensayo de trazadores en los dispositivos de mezcla se ajustan a los tiempos de retención hidráulicos de cada floculador además dichos tiempos de mezcla también están acordes a los tiempos óptimos encontrados para cada muestra analizada.

Los gradientes reales calculados en las 3 zonas del floculador hidráulico de flujo horizontal se ajustan a los gradientes óptimos encontrados en laboratorio para el coagulante pac como se evidencio en los resultados.

Se requiere corregir la agitación en el primer compartimiento del floculador mecánico, el cual se aleja de la agitación óptima. Se recomienda reducir la velocidad del motor. La planta de tratamiento de agua potable de Floridablanca realiza el proceso de floculación de manera eficaz y ajustada con los parámetros óptimos encontrados en laboratorio para cada coagulante. Las unidades de mezcla no presentan alteraciones hidráulicas que deterioren la eficiencia del proceso.

5. CONCLUSIONES

El sulfato de aluminio líquido presentó dosis óptimas entre 1 a 8 ppm y el policloruro de aluminio líquido entre 1 a 6 ppm, concentrados al 1% en base al contenido de alúmina de los productos de coagulación. La sobredosis del reactivo se originaba cuando se superaban las 20 ppm en el alumbre y en el PAC 14 ppm.

El proceso de floculación óptima se determinó para diferentes calidades de agua teniendo en cuenta los rangos de tiempo de retención hidráulico y gradientes de mezcla en los dispositivos. El rango de gradientes óptimo para tratar diversas calidades de agua está entre $17,5$ y 41 s^{-1} en un tiempo total de mezcla para las dos unidades cercano a los 25 minutos.

Los gradientes de velocidad en rangos de $25,1$ a $10,6 \text{ s}^{-1}$ para turbiedades altas, tuvieron mayor eficiencia en la remoción de color y turbidez. Para muestras donde la turbiedad fue baja, se requiere mayor velocidad de agitación que cuando la turbiedad es alta, en estas situaciones las velocidades de agitación variaron entre $41,7$ a $33,2 \text{ s}^{-1}$.

Según el resultado del análisis de la curva de tendencia, la relación t_p/t_o tiende a 1 y la relación $t_i/t_o > 0,5$ concluyéndose el predominio del flujo a pistón en el floculador hidráulico. Se estableció el porcentaje de zonas muertas el cual fue del 0.0% en el dispositivo. El tiempo real del floculador está sobre los 20 minutos y el tiempo de retención teórico sobre los 18,21 minutos. Los gradientes reales determinados en el dispositivo se ajustan a los parámetros óptimos encontrados en laboratorio.

El floculador recíprocante presenta un índice de dispersión de Morrill de 3,19 indicando el predominio de flujo mezclado en el reactor. Se determinó los espacios muertos, el cual fue del 0%. Se comprobó que el tiempo real del floculador es de 20 minutos y el tiempo de retención teórico de 19,6 minutos. De los gradientes reales calculados en el dispositivo, el primer compartimiento genera 80 s^{-1} siendo un gradiente demasiado turbulento pudiendo deteriorar la calidad y la eficiencia del floc que se forme en ese compartimiento.

6. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar pruebas de jarras de forma periódica en la planta de tratamiento con el propósito de recopilar y analizar los datos acerca del comportamiento de los coagulantes que se estén empleando en función de la remoción de turbiedad y color.

Se sugiere usar los reactivos de coagulación a una concentración del 1 % ya que en este valor es más fácil que suceda la disociación de las especies activas del coagulante en el agua cruda. Lo anterior agiliza la desestabilización de las partículas, así como la fácil dispersión del coagulante en las unidades de mezcla rápida.

Se recomienda no variar abruptamente los caudales en las dos secciones de la planta, la influencia de cambios bruscos de caudal deterioran la calidad en la floculación.

Se debe programar el floculador mecánico recíprocante en el primer compartimiento reduciendo la velocidad que entrega el motor al brazo del balancín, el gradiente que se está generando actualmente es demasiado turbulento 80 s^{-1} .

Se sugiere evaluar los dispositivos hidráulicos en la planta mediante estudio de trazabilidad de forma anual, el ensayo permite detectar las fallas hidráulicas ocasionadas por la operación diaria en las estructuras.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. (2014). AMB. Retrieved March 31, 2014, from <http://www.amb.com.co/frminformacion.aspx?inf=36>

Álvarez, M. M. (2014). *Regulación del sistema de tratamiento y suministro de agua potable de la planta de potabilización del municipio de betulia-acuabe*. Universidad Pontificia Bolivariana.

American Water Works Association. (2002). *Calidad y Tratamiento del Agua. Manual de Suministros*. (Mc Graw Hill, Ed.).

Andia, Y. (2000). *Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico. Tratamiento de Agua: Coagulación y Floculación*. Lima. Retrieved from <http://www.frm.utn.edu.ar/archivos/civil/Sanitaria/Coagulaci%C3%B3n y Floculaci%C3%B3n del Agua Potable.pdf>

Arboleda, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua*. (Mc Graw-Hill Interamericana S.A., Ed.).

Cánepa de Vargas, L. (2004). Tratamiento de agua para consumo humano. *Ops /cepis/*, 1(6).

Capacho, G. A. ., & Uribe, E. (2005). *Evaluación diagnóstico y optimización de los procesos de la planta de tratamiento de agua potable de Floridablanca*. Universidad Industrial de Santander.

CEPIS, C. P. de I. S. y C. del A. (1973). Teoría Diseño y Control de los Procesos de Clarificación del Agua. In *Aglutinación de Partículas* (pp. 125 – 150). Retrieved from <http://bvs.per.paho.org/bvsacd/scan/002320/002320-03c.pdf>

Lopez Santamaria, C. A. (2011). *Modelo de Estabilidad de Emulsiones Poliméricas*. Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/6759/1/tesis.pdf>

Maldonado, V. (2000). *Análisis De Flujos Y Factores Que Determinan Los Periodos De Retención*. Retrieved from <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manualIII/capitulo2.pdf>

Ministerio de Vivienda, C. y T. (2010). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico: TÍTULO C. Sistemas de Potabilización / Vargas Liévano, Armando (Ed.)*. Bogotá, D.C. Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2010.

Pérez, J. (1992). *Factores que afectan el tiempo de retención*. (Cepis, Ed.) (I., pp. 1–72). Lima.

Villegas, R. A. y Letterman, R. D. (1976). Optimizing flocculator power input. *Journal of Environmental Engineering Division*, 102(2), 13.