

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO**

**FACULTAD DE CIENCIAS DEL AMBIENTE**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA**



**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL TIPO DE COAGULANTE Y  
PARÁMETROS DE FLOCULACIÓN SOBRE LAS CONSTANTES  
CINÉTICAS DE AGREGACIÓN Y RUPTURA, EN LA FLOCULACIÓN  
DE LAS AGUAS DEL RÍO MARCARÁ, USANDO SULFATO DE  
ALUMINIO Y CLORURO FÉRRICO – 2021**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO SANITARIO**

**Br. BENITES PRINCIPE ALEXANDER LEANDRO**

**Ing. ARAUJO JAMANCA NINO FRANKLIN**

**Huaraz – Perú**

**2022**





## ACTA DE SUSTENTACIÓN Y DEFENSA DE TESIS, PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO SANITARIO

Los Miembros del Jurado en pleno que suscriben, reunidos en la fecha, en el auditorium de la FCAM-UNASAM, para la Ceremonia de Sustentación de la Tesis, que presenta El señor Bachiller: **BENITES PRINCIPE ALEXANDER LEANDRO**.

Tesis Titulada: **“ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL TIPO DE COAGULANTE Y PARÁMETROS DE FLOCULACIÓN SOBRE LAS CONSTANTES CINÉTICAS DE AGREGACIÓN Y RUPTURA, EN LA FLOCULACIÓN DE LAS AGUAS DEL RÍO MARCARÁ, USANDO SULFATO DE ALUMINIO Y CLORURO FÉRRICO – 2021”**

En seguida, después de haber atendida la exposición oral y escuchada las respuestas a las preguntas y observaciones formuladas lo declaramos:

**APROBADO**

Con el calificativo de:

**DIECISEIS (16)**

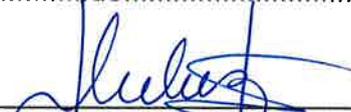
En consecuencia, queda en condiciones de ser **APROBADO** por el Consejo de Facultad y recibir el Título Profesional de:

### INGENIERO SANITARIO

De conformidad con el Art. 113° numeral 113.9 del reglamento General de la UNASAM (Resolución de Consejo Universitario N° 399-2015-UNASAM), el Art. 48° del Reglamento General de Grados y Títulos de la UNASAM (Resolución de Consejo Universitario – Rector N° 761-2017-UNASAM) y el Art. 160° del Reglamento de Gestión de la Programación, Ejecución y Control de las Actividades Académicas (Resolución de Consejo Universitario – Rector N° 432-2016-UNASAM del 28-12-2016).

Huaraz, **22** de **Noviembre** del 2022.

  
MSc. Carlos Bórromeo Poma Villafuerte  
Presidente

  
Dra. Judith Isabel Flores Albornoz  
Primer Miembro

  
M.s.c. Martín Miguel Huamán Carranza  
Segundo Miembro

  
Ing. Nino Franklin Araujo Jamanca  
Asesor

## DEDICATORIA

Quiero dedicar este proyecto especialmente a mis padres y hermanos que me han brindado su apoyo emocional y sobre todo su apoyo económico para financiar y hacer realidad el presente trabajo. Sin su ayuda no habría sido posible la realización de este proyecto, por lo que reitero mi más grande agradecimiento a ellos.

## AGRADECIMIENTO

Aprovecho estas líneas para expresar mi agradecimiento a mi asesor de proyecto de tesis Ing. Nino Araujo, por haber puesto a disposición parte de su tiempo y conocimiento en la elaboración del proyecto y revisión del informe final.

Asimismo, agradezco al M.Sc. Carlos Poma, Dra. Judith Flores y M.Sc. Martín Huamán, integrantes del jurado evaluador de tesis, por su disposición desinteresada para la revisión del proyecto de tesis e informe final.

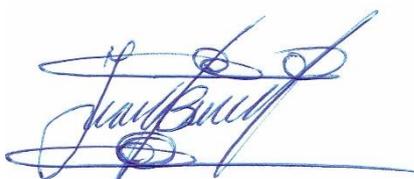
## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, BENITES PRINCIPE ALEXANDER LEANDRO, estudiante de la Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria de la Facultad de Ciencias del Ambiente de la Universidad Nacional Santiago Antúnez De Mayolo, declaro que el trabajo académico titulado “ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL TIPO DE COAGULANTE Y PARÁMETROS DE FLOCULACIÓN SOBRE LAS CONSTANTES CINÉTICAS DE AGREGACIÓN Y RUPTURA, EN LA FLOCULACIÓN DE LAS AGUAS DEL RÍO MARCARÁ, USANDO SULFATO DE ALUMINIO Y CLORURO FÉRRICO – 2021” presentado en 222 folios, para la obtención del título profesional de Ingeniero Sanitario, es de mi autoría.

Por lo tanto, declaro lo siguiente:

- He mencionado todas las fuentes empleadas en el presente trabajo de investigación identificando correctamente toda cita textual o de paráfrasis proveniente de otras fuentes de acuerdo con lo establecido por las normas de elaboración de trabajo académico.
- No he utilizado ninguna otra fuente distinta de aquellas expresadamente señaladas en este trabajo.
- Este trabajo de investigación no ha sido previamente presentado completa ni parcialmente para la obtención de otro grado académico o título profesional.
- Soy consciente de que mi trabajo puede ser revisado electrónicamente en búsqueda de plagios.
- De encontrar uso de material intelectual ajeno sin el debido reconocimiento de su fuente o autor, me someto a las sanciones que determinan el procedimiento disciplinario.

Huaraz, 10 de octubre de 2022



**ALEXANDER LEANDRO BENITES PRINCIPE**  
**DNI: 72767969**

## ÍNDICE

<b>AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN EN REPOSITORIO.....</b>	<b>ii</b>
<b>ACTA DE SUSTENTACIÓN.....</b>	<b>iv</b>
<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>v</b>
<b>AGRADECIMIENTO.....</b>	<b>vi</b>
<b>DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....</b>	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE.....</b>	<b>viii</b>
<b>RELACIÓN DE FIGURAS.....</b>	<b>xii</b>
<b>RELACIÓN DE IMÁGENES.....</b>	<b>xvii</b>
<b>RELACIÓN DE TABLAS.....</b>	<b>xix</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>xxi</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xxii</b>
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>23</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>23</b>
1.1. Objetivos .....	23
1.1.1. Objetivo general.....	23
1.1.2. Objetivos específicos.....	23
1.2. Hipótesis .....	24
1.2.1. Hipótesis general .....	24
1.2.2. Hipótesis específicas .....	24
1.3. Variables .....	25
1.3.1. Variables independientes .....	25
1.3.2. Variables dependientes .....	25
1.4. Operacionalización de variables .....	26
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>30</b>
<b>II. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>30</b>
2.1. Antecedentes .....	30
2.1.1. A nivel internacional.....	30
2.2. Bases teóricas.....	33
2.2.1. Tipos de coagulante usados en la floculación del agua.....	33
2.2.2. Parámetros de importancia que intervienen en el mecanismo de floculación y sus principales efectos.....	36

2.2.3.	Cinética de la floculación y las constantes cinéticas de agregación y ruptura .....	43
2.2.4.	Determinación experimental de las constantes cinéticas de agregación y ruptura.....	61
2.2.5.	Determinación de las constantes cinéticas de agregación y ruptura en un sistema batch o por lotes.....	71
2.2.6.	Metodología estadística para la determinación de las constantes cinéticas de agregación y ruptura en un sistema batch o por lotes. ....	79
2.2.7.	Procedimiento simplificado para la determinación de las constantes cinéticas de agregación y ruptura en un sistema batch o por lotes. ....	81
2.2.8.	Aplicación práctica de las constantes cinéticas de agregación y ruptura. ....	82
2.3.	Definición de términos básicos.....	85
2.3.1.	Constante cinética de agregación.....	85
2.3.2.	Constante cinética de ruptura.....	85
2.3.3.	Coagulantes metálicos .....	86
2.3.4.	Dosis de coagulante .....	86
2.3.5.	Floculación .....	86
2.3.6.	Gradiente de velocidad.....	86
2.3.7.	Mezcla rápida .....	86
2.3.8.	Movimiento browniano.....	86
2.3.9.	Número de potencia .....	86
2.3.10.	Número de Reynolds.....	87
2.3.11.	Partículas primarias.....	87
2.3.12.	pH.....	87
2.3.13.	Prueba de jarras.....	87
2.3.14.	Reactor batch o por lotes .....	87
2.3.15.	Reactor de flujo continuo y mezcla completa .....	87
2.3.16.	Turbiedad .....	88
<b>CAPÍTULO III.....</b>		<b>89</b>
<b>III. MARCO METODOLÓGICO .....</b>		<b>89</b>
3.1.	Tipo de investigación.....	89
3.2.	Diseño de la investigación.....	89
3.3.	Métodos o técnicas .....	92
3.4.	Población y muestra.....	98

3.4.1. Población.....	98
3.4.2. Muestra.....	98
3.5. Instrumentos de recolección de datos.....	99
3.6. Plan de procesamiento y análisis estadístico de la información.....	102
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>105</b>
<b>IV. RESULTADOS.....</b>	<b>105</b>
4.1. De las campañas de muestreo del río Marcará.....	105
4.2. Sobre la determinación de las constantes cinéticas de agregación y ruptura. .....	107
4.3. Comportamiento de las constantes cinéticas de agregación y ruptura con respecto a las variables independientes. ....	122
4.4. Efecto de las variables independientes sobre las constantes cinéticas de agregación y ruptura. ....	129
4.4.1. Contrastación de la hipótesis específica 1:.....	131
4.4.2. Contrastación de la hipótesis específica 2:.....	133
4.4.3. Contrastación de la hipótesis específica 3:.....	134
4.4.4. Contrastación de la hipótesis específica 4:.....	135
4.5. Comportamiento de un reactor de floculación de acuerdo con las constantes cinéticas de agregación y ruptura. ....	137
4.5.1. Contrastación de la hipótesis específica 5.....	149
<b>CAPÍTULO V.....</b>	<b>150</b>
<b>V. DISCUSIÓN.....</b>	<b>150</b>
<b>CAPÍTULO VI.....</b>	<b>155</b>
<b>VI. CONCLUSIONES.....</b>	<b>155</b>
<b>CAPÍTULO VII.....</b>	<b>157</b>
<b>VII. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>157</b>
<b>CAPÍTULO VIII.....</b>	<b>158</b>
<b>VIII.REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>158</b>
<b>CAPÍTULO IX.....</b>	<b>161</b>
<b>IX. ANEXO.....</b>	<b>161</b>
9.1. Panel fotográfico.....	161

9.2.	Proceso de determinación de las constantes cinéticas en Origin .....	169
9.3.	Análisis del comportamiento de un reactor CSTR en función de gradiente y tiempo, con m=1, 2 y 3 compartimientos.....	173
9.4.	Determinación de los tiempos (T) para alcanzar una eficiencia R=4, 5 y 10, con m=1, 2 y 3 cámaras, empleando gradientes constantes. ....	175
9.5.	Estudio de la eficiencia de un reactor CSTR para un tiempo T=30 min, empleando cloruro férrico. ....	176
9.6.	Evaluación económica del planteamiento en la tesis .....	177
9.7.	Reporte de los análisis estadísticos .....	182
9.8.	Informe de control de calidad y certificación del equipo de jarras proporcionado por el fabricante .....	194
9.9.	Certificado de análisis y calidad del cloruro férrico .....	195
9.10.	Certificado de análisis y calidad del sulfato de aluminio .....	196
9.11.	Ficha técnica del pH-metro .....	198
9.12.	Ficha técnica del turbidímetro .....	199
9.13.	Ficha técnica del equipo de jarras .....	201
9.14.	Banco de datos recolectados en las etapas de muestro y laboratorio	202

## RELACIÓN DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Diagrama esquemático de los pasos esenciales de la hidrólisis de aluminio.....	34
<b>Figura 2:</b> Diagrama esquemático de los pasos esenciales de la hidrólisis de aluminio.....	35
<b>Figura 3:</b> Características de la desestabilización donde la adsorción de especies de coagulante está operativa. ....	37
<b>Figura 4:</b> Zonas de desestabilización y re-estabilización de partículas a un pH determinado, S y Ct son la concentración de partículas y dosis de coagulante respectivamente.....	39
<b>Figura 5:</b> Zonas de desestabilización y re-estabilización en función al pH, concentración de partículas (S) y dosis de coagulante (Ct), en una dispersión de sílice usando Fe (III) como coagulante.....	40
<b>Figura 6:</b> Diagrama de coagulación para el aluminio con presencia de especies hidrolíticas mononucleares.....	42
<b>Figura 7:</b> Diagrama de coagulación para el hierro con presencia de especies hidrolíticas mononucleares.....	43
<b>Figura 8:</b> Esquema ilustrativo del proceso de agregación de partículas en el proceso de la floculación.....	45
<b>Figura 9:</b> Contacto entre dos partículas i y j moviéndose bajo la influencia de una gradiente de velocidad $dv/dz$ .....	48
<b>Figura 10:</b> Zona de influencia alrededor de la partícula j.....	48
<b>Figura 11:</b> Representación gráfica de las escalas de kolmogorov. ....	56
<b>Figura 12:</b> Representación gráfica de la cascada de energía de los remolinos en flujo turbulento.....	56
<b>Figura 13:</b> Performance de un sistema de floculación en función de la gradiente, tiempo y número de reactores.....	60
<b>Figura 14:</b> Curvas de performance de floculación que ilustra la significancia del mecanismo de ruptura de flóculos.....	61

<b>Figura 15:</b> Cambio en la magnitud del número de potencia en función del número de Reynolds en un reactor con baffles. ....	66
<b>Figura 16:</b> Reactores de floculación, geometría de los reactores, geometría de impulsores y sus correspondientes rangos de valores del número de potencia (1/3). ....	67
<b>Figura 17:</b> Reactores de floculación, geometría de los reactores, geometría de impulsores y sus correspondientes rangos de valores del número de potencia (2/3). ....	68
<b>Figura 18:</b> Reactores de floculación, geometría de los reactores, geometría de impulsores y sus correspondientes rangos de valores del número de potencia (3/3). ....	69
<b>Figura 19:</b> Optimización de la gradiente de mezcla rápida en función de la performance de floculación No/N. ....	72
<b>Figura 20:</b> Optimización del tiempo de la mezcla rápida en función del performance de floculación No/N. ....	73
<b>Figura 21:</b> Gráfica de turbiedad residual vs pH para un rango de dosis de coagulante ensayados. ....	75
<b>Figura 22:</b> Gráfica de superficie para dosis de coagulante, pH y turbiedad residual. ....	75
<b>Figura 23:</b> Performance de floculación “No/N” versus tiempos de floculación “T” para unas gradientes G específicas. ....	76
<b>Figura 24:</b> Performance de floculación “N/No” versus tiempos de floculación “T” para diferentes dosis de coagulante.....	77
<b>Figura 25:</b> Representación gráfica del diseño factorial de la investigación. ....	91
<b>Figura 26:</b> Gráfica que relaciona la equivalencia entre la velocidad de rotación de los impulsores con la gradiente, para un rango de temperaturas estudiadas. ....	97
<b>Figura 27:</b> Gráfico de valores medidos de turbiedad, pH y temperatura en las muestras de agua recolectadas. ....	107

<b>Figura 28.</b> Valores de $K_A$ y $K_B$ , cuando se emplea Sulfato de Aluminio, pH de 6.0, dosis de 5 mg/l, para ambas réplicas. ....	108
<b>Figura 29.</b> Valores de $K_A$ y $K_B$ , cuando se emplea Sulfato de Aluminio, pH de 6.0, dosis de 10 mg/l, para ambas réplicas. ....	109
<b>Figura 30.</b> Valores de $K_A$ y $K_B$ , cuando se emplea Sulfato de Aluminio, pH de 6.0, dosis de 30 mg/l, para ambas réplicas. ....	110
<b>Figura 31.</b> Valores de $K_A$ y $K_B$ , cuando se emplea Sulfato de Aluminio, pH de 8.0, dosis de 5 mg/l, para ambas réplicas. ....	111
<b>Figura 32.</b> Valores de $K_A$ y $K_B$ , cuando se emplea Sulfato de Aluminio, pH de 8.0, dosis de 10 mg/l, para ambas réplicas. ....	112
<b>Figura 33.</b> Valores de $K_A$ y $K_B$ , cuando se emplea Sulfato de Aluminio, pH de 8.0, dosis de 30 mg/l, para ambas réplicas. ....	113
<b>Figura 34.</b> Valores de $K_A$ y $K_B$ , cuando se emplea Cloruro férrico, pH de 6.0, dosis de 5 mg/l, para ambas réplicas. ....	114
<b>Figura 35.</b> Valores de $K_A$ y $K_B$ , cuando se emplea Cloruro férrico, pH de 6.0, dosis de 10 mg/l, para ambas réplicas. ....	115
<b>Figura 36.</b> Valores de $K_A$ y $K_B$ , cuando se emplea Cloruro férrico, pH de 6.0, dosis de 30 mg/l, para ambas réplicas. ....	116
<b>Figura 37.</b> Valores de $K_A$ y $K_B$ , cuando se emplea Cloruro férrico, pH de 8.0, dosis de 5 mg/l, para ambas réplicas. ....	117
<b>Figura 38.</b> Valores de $K_A$ y $K_B$ , cuando se emplea Cloruro férrico, pH de 8.0, dosis de 10 mg/l, para ambas réplicas. ....	118
<b>Figura 39.</b> Valores de $K_A$ y $K_B$ , cuando se emplea Cloruro férrico, pH de 8.0, dosis de 30 mg/l, para ambas réplicas. ....	119
<b>Figura 40.</b> Relación entre $K_B$ y la gradiente, cuando se emplea sulfato de aluminio, para cada dosis y pH estudiados. ....	120
<b>Figura 41.</b> Relación entre $K_B$ y la gradiente, cuando se emplea sulfato de aluminio, para cada dosis y pH estudiados. ....	121

<b>Figura 42:</b> Tamaño de flocs formados de acuerdo con los valores de las constantes cinéticas de agregación y ruptura, cuando se usa cloruro férrico.....	123
<b>Figura 43:</b> Mapa de superficies para el sulfato de aluminio con respecto a la dosis, pH e índices de floculación, para un tiempo $T=20$ min.....	124
<b>Figura 44:</b> Mapa de superficies para el cloruro férrico con respecto a la dosis, pH e índice de floculación, para $T=20$ minutos. ....	125
<b>Figura 45:</b> Variación en $K_A$ en función del pH y la dosis, tanto para la primera y segunda réplica, cuando se emplea sulfato de aluminio. ....	126
<b>Figura 46:</b> Variación en $K_B$ en función del pH y la dosis, tanto para la primera y segunda réplica, cuando se emplea sulfato de aluminio. ....	127
<b>Figura 47:</b> Variación en $K_A$ en función del pH y la dosis, tanto para la primera y segunda réplica, cuando se emplea cloruro férrico. ....	128
<b>Figura 48:</b> Variación en $K_B$ en función del pH y la dosis, tanto para la primera y segunda réplica, cuando se emplea cloruro férrico. ....	129
<b>Figura 49.</b> Gráfica de efectos principales sobre $K_A$ .....	136
<b>Figura 50.</b> Gráfica de efectos principales sobre $K_B$ .....	137
<b>Figura 51:</b> Gráfica que relaciona tiempo con gradiente para un reactor CSTR con “m” compartimientos.....	139
<b>Figura 52:</b> Comportamiento de un floculador CSTR con m compartimientos cuando se emplea sulfato de aluminio y gradiente de $30\text{ s}^{-1}$ . ....	142
<b>Figura 53:</b> Comportamiento de un floculador CSTR con m compartimientos cuando se emplea sulfato de aluminio y gradiente de $60\text{ s}^{-1}$ . ....	143
<b>Figura 54:</b> Comportamiento de un floculador CSTR con m compartimientos cuando se emplea sulfato de aluminio y gradiente de $100\text{ s}^{-1}$ . ....	144
<b>Figura 55:</b> Comportamiento de un floculador CSTR con m compartimientos cuando se emplea cloruro férrico y gradiente de $30\text{ s}^{-1}$ . ....	145
<b>Figura 56:</b> Comportamiento de un floculador CSTR con m compartimientos cuando se emplea cloruro férrico y gradiente de $60\text{ s}^{-1}$ . ....	146

**Figura 57:** Comportamiento de un floculador CSTR con m compartimientos cuando se emplea cloruro férrico y gradiente de  $100 \text{ s}^{-1}$ . ..... 147

## RELACIÓN DE IMÁGENES

<b>Imagen 1:</b> Mapa de ubicación del punto de muestreo de las aguas del río Marcará. .....	161
<b>Imagen 2:</b> Muestreo de agua en el río Marcará.....	161
<b>Imagen 3:</b> Calibración de pH-metro con soluciones buffer. ....	162
<b>Imagen 4:</b> Calibración de turbidímetro con los estándares de calibración.....	162
<b>Imagen 5:</b> Extracción de 30 ml de muestra para medición de turbiedad y medición de pH y temperatura del agua cruda. ....	163
<b>Imagen 6:</b> Corrección de pH del agua con NaOH y/o H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0.1N en 1L de muestra a un valor deseado.....	163
<b>Imagen 7:</b> Extracción del sulfato de aluminio para su dilución (izquierda) y proceso de disolución con agua destilada (derecha) .....	164
<b>Imagen 8:</b> Preparación de solución de Sulfato de Aluminio y Cloruro Férrico al 1% a partir de concentraciones de 99.5% y 40% de Sulfato de Aluminio y Cloruro férrico comerciales respectivamente.....	164
<b>Imagen 9:</b> Soluciones stock de Sulfato de Aluminio (izquierda) y Cloruro Férrico (derecha) al 1% de concentración.....	165
<b>Imagen 10:</b> Realización de la mezcla rápida para un tipo de coagulante (Cloruro Férrico en este caso), un pH y una dosis establecida para un tiempo de floculación T=0 y tiempo de sedimentación de 20 min.....	165
<b>Imagen 11:</b> Ensayo de floculación con un tipo de coagulante, un pH, una dosis y una gradiente establecida para tiempos de floculación T de 5, 10, 15, 20, 30 y 40 min y un tiempo de sedimentación de 20 min. ....	166
<b>Imagen 12:</b> Extracción de muestra a 5 cm de profundidad, después de un tiempo T de floculación y 20 min de sedimentación (izquierda) y sistema de sifón (derecha). .....	166
<b>Imagen 13:</b> Generación de flocs para una dosis, un pH, una gradiente y un tiempo T de floculación, cuando se emplea Sulfato de Aluminio (derecha) y Cloruro Férrico (izquierda). ....	167

**Imagen 14:** Floccs sedimentados. Vista frontal (izquierda) y vista superior (derecha).  
..... 167

**Imagen 15:** Medición de turbiedad, del agua cruda, después de la desestabilización  
sin floculación con sedimentación y/o después de la floculación con sedimentación,  
según corresponda..... 168



## RELACIÓN DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Valores de las constantes cinéticas de agregación y ruptura para un tipo de partículas y coagulante, reportado por algunos autores.....	59
<b>Tabla 2.</b> Valores requeridos de tiempo para un reactor en serie con m cámaras y obtener una eficiencia de 90% (R=10). .....	85
<b>Tabla 3:</b> Tabla del diseño factorial de la investigación.....	91
<b>Tabla 4:</b> Resumen del diseño factorial.....	94
<b>Tabla 5:</b> Tabla de diseño aleatorizado de la interacción de cada uno de los niveles de los factores. ....	94
<b>Tabla 6:</b> ANOVA de un (01) factor con n réplicas, para la variable tipo de coagulante.....	103
<b>Tabla 7:</b> ANOVA para un diseño de tres (03) factores con n réplicas, para las variables pH, dosis y gradiente. ....	103
<b>Tabla 8:</b> Prueba t relacionada con medias.....	104
<b>Tabla 9:</b> Valores de turbiedad, pH y temperatura en las 12 muestras recolectadas, en los meses de marzo y abril de 2021.....	105
<b>Tabla 10:</b> Valores de turbiedad, pH y temperatura en las 12 muestras recolectadas, en los meses de mayo y junio de 2021. ....	106
<b>Tabla 11.</b> ANOVA de un solo factor: log $K_A$ Vs. Tipo de Coagulante .....	130
<b>Tabla 12.</b> ANOVA de un solo factor: log $K_B$ Vs. Tipo de Coagulante .....	131
<b>Tabla 13.</b> ANOVA de tres factores: log $K_A$ Vs. pH; Dosis; Gradiente.....	132
<b>Tabla 14.</b> ANOVA de tres factores: log $K_B$ Vs. pH; Dosis; Gradiente.....	133
<b>Tabla 15:</b> Valores de $K_A$ y $K_B$ para una dosis de 5mg/l, pH 8.0, correspondientes a la primera réplica.....	138
<b>Tabla 16:</b> Tiempo de floculación total (T) como función de la gradiente de velocidad y número de compartimientos, para una eficiencia de 75% (R=4) .....	140
<b>Tabla 17:</b> Tiempo de floculación total (T) como función de la gradiente de velocidad y número de compartimientos, para una eficiencia de 80% (R=5) .....	140

**Tabla 18:** Tiempo de floculación total (T) como función de la gradiente de velocidad y número de compartimientos, para una eficiencia de 90% (R=10) ..... 141

**Tabla 19:** Eficiencia de un floculador CSTR para diversos perfiles de gradiente con uno a tres compartimientos, para un tiempo de floculación de 30 min. .... 148

**Tabla 20:** Prueba T Student para las eficiencias de floculación obtenidas con uno a tres compartimientos. .... 149

## RESUMEN

El estudio de tratabilidad del agua con fines de diseño, en muchos casos requiere de implementación de plantas piloto, pero tienen la desventaja de requerir aparatos costosos y largos procedimientos de prueba, sin embargo, el estudio de la cinética de floculación del agua puede ser estudiada mediante modelos matemáticos que predicen el comportamiento de un reactor de floculación a partir de ensayos batch en laboratorio, para diversas condiciones de operación.

La presente investigación se enfocó en estudiar la influencia de las variables: Tipo de coagulante, pH, Dosis y Gradiente sobre  $K_A$  y  $K_B$ ; también modelar el comportamiento de un reactor CSTR bajo diversas condiciones de gradiente para la floculación de las aguas del río Marcará, a partir de las constantes cinéticas.

En el estudio se determinaron valores del orden de  $10^{-6}$  a  $10^{-4}$  para  $K_A$  y de  $10^{-9}$  s a  $10^{-6}$  s para  $K_B$ , en los distintos tratamientos asignados, obteniendo las mejores tasas de agregación con cloruro férrico, pH 8.0 y dosis de 5 mg/l. La modelación del comportamiento del reactor CSTR bajo diversas condiciones de gradiente y compartimientos para obtener una eficiencia "R", mostraron tiempos desde los 4.89 min en la mejor condición y de 159.23 min en la condición más desfavorable, asimismo un perfil de gradientes de 100 / 60 / 60 para un  $T=30$  min mostró una eficiencia de 95.49%. La prueba ANOVA determinó que el tipo de coagulante, pH y dosis influyen significativamente en al menos una constante cinética, siendo únicamente la gradiente la variable no influyente.

El efecto significativo del tipo de coagulante y el pH significó que con cloruro férrico y pH alcalino se obtuvieron las tasas más altas de agregación que al usar sulfato de aluminio y un pH ácido. Efecto significativo de la dosis significó que con dosis altas las tasas de ruptura son grandes que con dosis bajas. Cuando en el reactor CSTR se emplean más de un compartimiento y un perfil de gradiente escalonado, el tiempo requerido para obtener una eficiencia determinada, se reduce significativamente.

**Palabras clave:** floculación, cinética, agregación, ruptura.

## ABSTRACT

The study of water treatability for design purposes, in many cases requires the implementation of pilot plants, but they have the disadvantage of requiring expensive equipment and long test procedures, however, the study of water flocculation kinetics can be studied by means of mathematical models that predict the behavior of a flocculation reactor from laboratory batch tests, for various operating conditions.

The present research focused on studying the influence of the following variables on  $K_A$  and  $K_B$ : type of coagulant, pH, dosage and gradient; also to model the operation of a CSTR reactor under different gradient conditions for the flocculation of water from the Marcará river.

In the study, values of the order of  $10^{-6}$  to  $10^{-4}$  for  $K_A$  and  $10^{-9}$  s to  $10^{-6}$  s for  $K_B$  were determined for the different treatments assigned, obtaining the best aggregation rates with ferric chloride, pH 8.0 and 5 mg/l dose. The modeling of the CSTR reactor behavior under different gradient conditions and "m" chambers to obtain an efficiency "R", showed times from 4.89 min in the best condition and 159.23 min in the most unfavorable condition, also a gradient profile of 100 / 60 / 60 for a  $T=30$  min showed an efficiency of 95.49%. The ANOVA test determined that the type of coagulant, pH and dosage significantly influence at least one kinetic constant, with only the gradient being the non-influential variable.

Significant effect of coagulant type and pH means that with ferric chloride and alkaline pH the highest aggregation rates were obtained than when using aluminum sulfate and an acidic pH. Significant dose effect means that with high doses the rupture rates are higher than with low doses. When more than one compartment and a stepped gradient profile are used in the CSTR reactor, the time required to obtain a given efficiency is significantly reduced.

**Key words:** flocculation, kinetics, aggregation, breakup

## CAPÍTULO I

### I. INTRODUCCIÓN

#### 1.1. Objetivos

##### 1.1.1. Objetivo general

Estudiar la influencia del tipo de coagulante y los parámetros de floculación sobre las constantes cinéticas de agregación y ruptura, en la floculación de las aguas del río Marcará, usando sulfato de aluminio y cloruro férrico – 2021.

##### 1.1.2. Objetivos específicos

- Determinar de qué manera el tipo de coagulante (sulfato de aluminio y cloruro férrico) influyen sobre las constantes cinéticas de agregación y ruptura, en la floculación de las aguas del río Marcará, usando sulfato de aluminio y cloruro férrico – 2021.
- Determinar de qué manera el pH influye sobre las constantes cinéticas de agregación y ruptura, en la floculación de las aguas del río Marcará, usando sulfato de aluminio y cloruro férrico – 2021.
- Determinar de qué manera la dosis influye sobre las constantes cinéticas de agregación y ruptura, en la floculación de las aguas del río Marcará, usando sulfato de aluminio y cloruro férrico – 2021.
- Determinar de qué manera la gradiente influye sobre las constantes cinéticas de agregación y ruptura, en la floculación de las aguas del río Marcará, usando sulfato de aluminio y cloruro férrico – 2021.

- Estudiar el comportamiento de un reactor de mezcla completa y flujo continuo en función de las constantes cinéticas, bajo diversas condiciones de gradiente y cantidad de compartimientos del reactor.

## 1.2. Hipótesis

### 1.2.1. Hipótesis general

Hi: El tipo de coagulante y los parámetros de floculación influyen significativamente sobre las constantes cinéticas de agregación y ruptura, en la floculación de las aguas del río Marcará, usando sulfato de aluminio y cloruro férrico – 2021.

### 1.2.2. Hipótesis específicas

- He-1: El tipo de coagulante (sulfato de aluminio y cloruro férrico) influye significativamente sobre las constantes cinéticas de agregación y ruptura, en la floculación de las aguas del río Marcará, usando sulfato de aluminio y cloruro férrico – 2021.
- He-2: El pH influye significativamente sobre las constantes cinéticas de agregación y ruptura, en la floculación de las aguas del río Marcará, usando sulfato de aluminio y cloruro férrico – 2021.
- He-3: La dosis influye significativamente sobre las constantes cinéticas de agregación y ruptura, en la floculación de las aguas del río Marcará, usando sulfato de aluminio y cloruro férrico – 2021.
- He-4: La gradiente influye significativamente sobre las constantes cinéticas de agregación y ruptura, en la floculación de las aguas del río Marcará, usando sulfato de aluminio y cloruro férrico – 2021.
- He-5: La media de las eficiencias de floculación obtenidas en un reactor CSTR son significativamente mayores cuando se

emplean más de un compartimiento para diversas condiciones de gradiente.

### 1.3. Variables

#### 1.3.1. Variables independientes

- Tipo de coagulante
- pH
- Dosis
- Gradiente

#### 1.3.2. Variables dependientes

- Constantes cinéticas de agregación ( $K_A$ ) y ruptura ( $K_B$ )

#### 1.4. Operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Indicadores	Unidad de medida	Escala de medición
Tipo de coagulante	<p>“Sales metálicas como el sulfato de aluminio y el cloruro férrico que se hidrolizarán, formando especies mononucleares y polinucleares de carga variable. Cuando se agregan en exceso, los coagulantes metálicos forman precipitados químicos” (Crittenden et al, 2012, p. 543).</p>	<p>A partir de una cantidad pequeña de coagulante comercial (sulfato de aluminio o cloruro férrico) a una concentración comercial dada, se prepara una solución stock a una concentración del 1% (10 g/l), y a partir de esta última, se calcula el volumen para una dosis determinada.</p>	<p>Concentración stock de sulfato de aluminio</p>	<p>% m/v</p>	<p>De razón</p>
		<p>“En el caso de expresar las dosis en términos de la sustancia química, sería adecuada una solución madre de 10 g/l; en este caso, 1 ml agregado a los frascos de 1 litro produciría una dosis de 10 mg/l” (Bratby, 2016, p. 361).</p>	<p>Concentración stock de cloruro férrico</p>	<p>% v/v</p>	<p>De razón</p>
pH	<p>“El pH de un líquido es una medida</p>	<p>“El pH de un líquido es una medida cuantitativa de la acidez</p>	<p>Valor del pH</p>	<p>adimensional</p>	<p>De razón</p>

	<p>cuantitativa de la acidez del medio y está determinada cuantitativamente por la concentración de iones de hidrógeno libres” (Bagchi, 2013, p. 71).</p>	<p>del medio y está determinada cuantitativamente por la concentración de iones de hidrógeno libres” (Bagchi, 2013, p. 71). “Cada muestra para una prueba en particular se dosifica con un reactivo ácido o alcalino (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> o NaOH, etc.) para producir un rango de valores de pH” (Bratby, 2016, p. 367).</p>			
Dosis	<p>“El tipo y la dosis de coagulantes a utilizar en los clarificadores dependen de la calidad del agua cruda y de las condiciones ambientales” (Illangasinghe et al., 2018, p. 28).</p>	<p>Para una concentración al 1% de la solución stock de coagulante, se extraen volúmenes de 0.5, 1.0 y 3.0 ml que añadidos a un beaker de 1L representan dosis de 5, 10 y 30 mg/l.</p> <p>“Manteniendo los impulsores a alta velocidad, el coagulante se agrega luego de forma individual y secuencial a cada jarra, o simultáneamente a todas las jarras usando la jeringa” (Bratby, 2016, p. 367).</p>	Volumen extraído desde la solución stock.	ml	De razón

Gradiente	“Esfuerzo cortante entre dos capas de fluido con velocidades diferenciales. La viscosidad de cizallamiento viene dada por la relación entre el esfuerzo de cizallamiento y el gradiente de velocidad transversal” (Leung, 2001).	Se selecciona una velocidad de rotación en el equipo de prueba de jarras, en rpm (revoluciones por minuto), que corresponda a un valor de gradiente deseado, para ello se hace uso del gráfico que relaciona la gradiente ( $s^{-1}$ ) con la velocidad de rotación (rpm) en función a la temperatura que presenta el agua al momento de los ensayos.	Velocidad de rotación de las paletas	RPM (revoluciones por minuto)	De razón
Constantes cinéticas de agregación ( $K_A$ ) y ruptura ( $K_B$ )	“La agregación de las partículas primarias y pequeños flóculos para formar flóculos más grandes, esta agregación se	Para un tipo de coagulante, pH, dosis y gradiente en particular, se determinan los valores de “No” y “N”, posteriormente se grafican “N/No” (índice o performance de floculación)	<b>No:</b> Concentración de partículas primarias después de la desestabilización, sin floculación y posterior sedimentación.	NTU	De razón

	<p>caracteriza por la constante <math>K_A</math> conocida como constante de agregación” (Sekiou y Kellil, 2009, p. 891).</p> <p>“La erosión y la fragmentación de los flóculos, este estado se caracteriza por la constante <math>K_B</math> conocida como constante de ruptura” (Sekiou y Kellil, 2009, p. 892</p>	<p>versus T (tiempo de floculación), generándose la nube de puntos que al ser ajustadas mediante regresión no lineal utilizando la expresión de Argaman y Kaufman para ensayos en batch, se determina el valor de la constante cinética de agregación (<math>K_A</math>).</p> <p>“Se utilizó el software Origin, método de convergencia no lineal, para obtener las constantes cinéticas <math>K_A</math> y <math>K_B</math> convergentes a los valores de desempeño del proceso de floculación previamente definido” (Dutra, 2017, p. 48).</p>	<p><b>N:</b> Concentración de partículas primarias después de un período T de floculación y posterior sedimentación.</p>	<p>NTU</p>	<p>De razón</p>
--	---	---	--	------------	-----------------

## CAPÍTULO II

### II. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes

##### 2.1.1. A nivel internacional

Una investigación llevada a cabo en Brasil, por Dutra (2017), tuvo como objetivo el estudio del efecto del tipo de coagulante y gradientes de floculación sobre las constantes cinéticas de agregación ( $K_A$ ) y ruptura ( $K_B$ ). Para ello se empleó agua desionizada con suspensiones de caolinita, para proporcionar la turbiedad deseada; en cuanto a los coagulantes se empleó sulfato de aluminio, con dosis en el intervalo de 0.25 ml hasta un máximo de 5 ml; cloruro férrico, con dosis en el intervalo de 0.5 ml hasta un máximo de 10 ml y PAC con dosis en intervalo de 1 ml hasta un máximo de 12 ml. En el ensayo de floculación se empleó el equipo de prueba de jarras, empleando gradientes de floculación de 20, 30, 40 y 80  $s^{-1}$  y tiempos de 15, 20, 30, 40, 50 y 60 min en cada ensayo, asimismo, se empleó el programa Origin para determinar  $K_A$  y  $K_B$  para cada condición estudiada en laboratorio. En la investigación se encontró que el tipo de coagulante tuvo efecto sobre las constantes cinéticas, debido a que los valores determinados fueron ligeramente diferentes para cada tipo de coagulante empleado, específicamente con el cloruro férrico se obtuvo valores más grandes en  $K_A$  y valores más pequeños en  $K_B$ . Con respecto a las gradientes se observaron que en general a medida que aumenta la gradiente de floculación los valores de  $K_A$  disminuyen ligeramente, debido a que, con gradientes altos, existe una mayor tasa de ruptura de flóculos.

Un estudio realizado por Marques y Ferreira-Filho (2017) en Brasil, para el estudio de la cinética de floculación en aguas con baja

turbiedad de fuentes eutróficas superficiales, se enfocó en el estudio del efecto del pH, dosis y gradiente sobre los índices de floculación que definen las constantes cinéticas de agregación y ruptura. Para ello se realizaron ensayos de floculación empleando el equipo de prueba de jarras, con dosis de 10, 20, 40, 60 y 80 mg/l, pH variable entre 6.0 a 6.5 en el caso del sulfato de aluminio y en el rango de 7.5 a 8.36 para el caso del cloruro férrico. Con respecto al estudio del efecto del pH, se encontró que al usar un pH cuyo valor se encuentra alrededor de 6, los índices de floculación que definen los valores de las constantes cinéticas de agregación ( $K_A$ ) y ruptura ( $K_B$ ) son relativamente menos eficientes que cuando se usa un valor de pH de alrededor de 8, independientemente de la dosis y gradientes empleadas, lo que significó que, empleando cloruro férrico y un pH de 8, se obtuvieron valores más grandes en  $K_A$ , a comparación de emplear un valor de pH de 6.

Una investigación llevada a cabo por Filho, Hespanhol y Moreira (2000) en el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Sanitaria de la Universidad Sao Paulo, cuyo objetivo se enfocó en el estudio del efecto de la dosis de coagulante y partículas primarias sobre las constantes cinética de agregación ( $K_A$ ) y ruptura ( $K_B$ ), en el proceso de floculación de suspensiones coloidales. Las muestras de agua fueron preparadas en laboratorio con concentraciones de turbiedad de 15, 50 y 100 NTU para representar aguas con baja, media y alta turbiedad respectivamente, asimismo, se usó sulfato de aluminio como coagulante con concentraciones en el rango de 0.81 a 8.11 mg/l como  $Al^+$  y las gradientes de velocidad empleadas fueron de 20, 30, 40, 60, 80 y 100  $s^{-1}$ . En el ensayo de floculación se usó el equipo de prueba de jarras y tiempos de floculación en el intervalo de 2.5 a 60 min, para posteriormente determinar  $K_A$  y  $K_B$  en función a la gráfica de valores de  $N/N_0$  versus tiempo de floculación, ajustando la ecuación de Argaman y Kaufman a los datos experimentales con el programa SOLVER. Se encontró que la dosis de coagulante aplicado tuvo un efecto significativo sobre  $K_A$  y  $K_B$ , específicamente

un incremento en la dosis produjo un incremento en  $K_A$ , pero dosis muy altas produjo un decrecimiento en esta constante, por otro lado, un aumento en la dosis significó un aumento constate en el valor de  $K_B$ , lo que significó que cuanto mayor sea la cantidad de hidróxido metálico, menor es la resistencia a la tensión de cizallamiento de los flocs formados.

Una investigación llevada a cabo por Marques y Ferreira-Filho (2022), en Brasil, sobre el estudio de la ruptura irreversible de flóculos en el modelado de la cinética de floculación, se enfocaron en estudiar el comportamiento de los índices de floculación “N/No” que definen los valores de  $K_A$  y  $K_B$  en función a diversas gradientes y dosis. Para los ensayos de floculación se emplearon el equipo de prueba de jarras, gradientes de floculación de 20, 30, 40, 60, 80 y 100  $s^{-1}$ , dosis de sulfato de aluminio de 10, 20, 30, 40, 60 y 80 mg/l y agua sintética con turbiedades de 15, 50 y 100 NTU que representaron aguas con turbiedades bajas, medias y altas respectivamente. Se graficaron valores de N/No versus el tiempo de floculación para cada condición estudiada, y luego ajustando los datos con la ecuación de Argaman y Kufman y se determinaron las constantes cinéticas  $K_A$  y  $K_B$ , obteniendo valores del orden de  $10^{-3}$  a  $10^{-5}$  con respecto a  $K_A$  y de  $10^{-16}$  s a  $10^{-6}$  s para  $K_B$ . Al respecto el estudio mediante un análisis de varianza (ANOVA), determinó que la gradiente no tuvo influencia significativa sobre  $K_A$ , sin embargo, si tuvo una influencia muy significativa sobre  $K_B$ , esto debido a que para las distintas gradientes analizadas la variación en los valores de  $K_B$  de una gradiente a otra fue considerable, llegando incluso determinar valores de  $K_B$  del orden de  $10^{-16}$  s, lo que representan tasas de ruptura prácticamente despreciables.

Un estudio llevado a cabo por Moruzzi y De Oliveira (2012) en Brasil, para la modelación matemática y análisis del proceso de floculación en reactores en serie, tuvo por objetivo analizar el comportamiento de un reactor CSTR con uno y varios compartimientos, usando las

constantes cinéticas de agregación y ruptura del modelo de Argaman y Kaufman. El estudio se llevó a cabo con muestras de agua cuyo pH y turbiedad fue de 7.7 y 27 NTU respectivamente, asimismo los valores típicos de  $K_A$  empleados fue de  $3.68 \times 10^{-5}$  a  $1.83 \times 10^{-4}$  y de  $1.83 \times 10^{-7}$  s a  $2.30 \times 10^{-7}$  s para  $K_B$  correspondientes a gradientes de 20, 30, 40, 50 y  $60 \text{ s}^{-1}$ . El estudio determinó que en sistemas de floculación en continuo, la eficiencia depende del número de cámaras (compartimientos) en serie y de la gradiente de velocidad aplicada en cada cámara el cual puede ser fijo o disminuir gradualmente, además el uso de una sola cámara restringe la eficiencia del sistema y requieren tiempos de retención más largos; por otro lado determinaron que un perfil de gradiente de forma descendiente permite obtener eficiencias más altas en tiempos más cortos, tal que para un reactor de tres cámaras con gradientes de 60, 30 y  $20 \text{ s}^{-1}$  para una eficiencia de 90% requiere un tiempo de 30.15 min, mientras que para el mismo reactor con dos cámaras y gradientes de 40 y  $30 \text{ s}^{-1}$  requirió un tiempo de 56.21 min para obtener la misma eficiencia.

## 2.2. Bases teóricas

### 2.2.1. Tipos de coagulante usados en la floculación del agua.

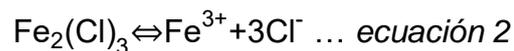
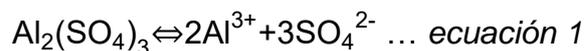
En la actualidad existe un gran número de coagulantes usados en la coagulación y floculación del agua, son agrupados de acuerdo con su composición, debido a que algunos son de origen natural, otros son sales de metales e incluso polímeros de origen orgánico e inorgánico. En esta sección se va a tocar únicamente los coagulantes metálicos, específicamente sobre las sales de aluminio y hierro.

En cuanto a las sales de aluminio, incluyen, el sulfato de aluminio, cloruro de aluminio, aluminato de sodio, clorhidrato de aluminio, cloruro de polialuminio y otros. Las sales de hierro incluyen, sulfato férrico, sulfato ferroso, cloruro férrico, sales férricas con polímeros

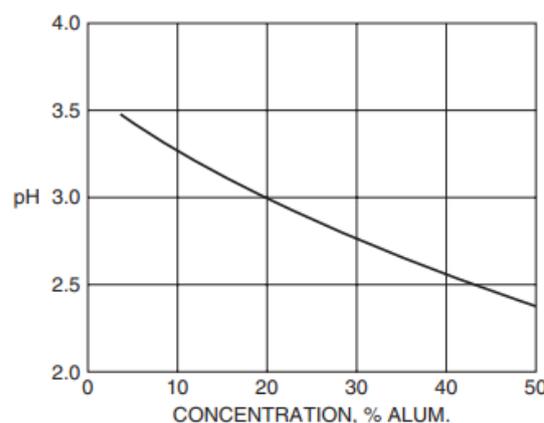
orgánicos y otros más. “La eficacia de estos coagulantes surge principalmente de su capacidad para formar complejos polinucleares multi-carga en solución con características de adsorción mejoradas” (Bratby, 2016, p. 34). Es decir, que son coagulantes que se disocian rápidamente al entrar en contacto con el agua a tratar.

El sulfato de aluminio es producido a partir de la digestión de minerales de bauxita con ácido sulfúrico y como resultado de la evaporación del agua al final de proceso da como resultado el  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$  con un contenido de aluminio puro de entre 7.4 a 9.5%. La Figura 1 muestra el pH de una solución de sulfato de aluminio comercial de acuerdo con su concentración.

Cuando una sal de aluminio o hierro se adiciona al agua, se lleva a cabo una serie de reacciones en serie, estas reacciones hacen posible que se produzca el mecanismo de coagulación y posterior floculación. “Inicialmente, cuando se agrega al agua una sal de Al (III) y Fe (III), se disocia para producir iones trivalentes  $\text{Al}^{3+}$  y  $\text{Fe}^{3+}$ ” (Crittenden et al., 2012, pp. 562-563), de acuerdo con lo que se muestra a continuación:



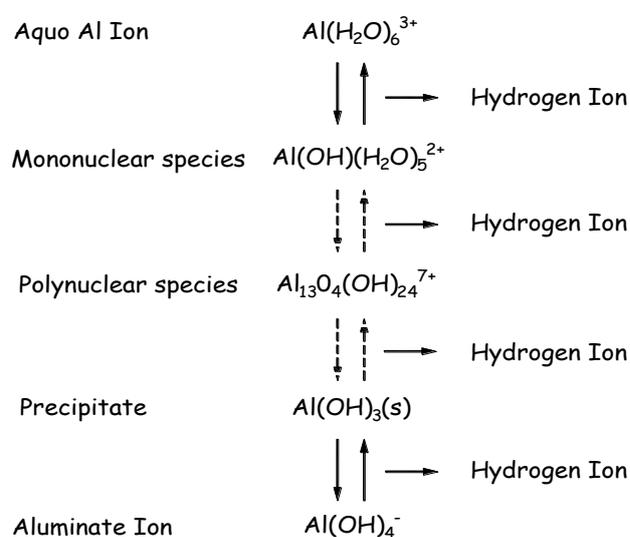
**Figura 1:** Diagrama esquemático de los pasos esenciales de la hidrólisis de aluminio.



**Fuente:** Bratby, J. (2016).

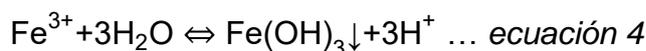
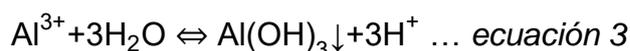
Posteriormente, según Crittenden et al. (2012), “Los iones trivalentes de  $\text{Al}^{3+}$  y  $\text{Fe}^{3+}$  luego se hidratan para formar los complejos acuometálicos  $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$  y  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ ” (p. 563). Estos complejos a su vez continúan con una serie de reacciones hidrolíticas, esta serie de reacciones, para el caso del complejo del aluminio, se muestra en la Figura 2.

**Figura 2:** Diagrama esquemático de los pasos esenciales de la hidrólisis de aluminio.

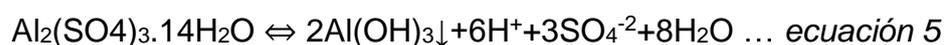


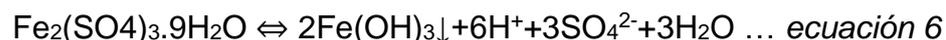
**Fuente:** Crittenden, J. C., Trushell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J. y Tchobanoglous, G. (2012).

La reacción estequiometría general para iones de aluminio y hierro en la formación de precipitados de hidróxido está definido por las ecuaciones 3 y 4, así mismo se observa que por cada mol de los iones trivalentes se produce 1 mol de hidróxido de metal que precipita y 3 moles de iones hidrógeno.



La reacción general cuando el aluminio o hierro es adicionado en el agua y el hidróxido precipita, está dado por:



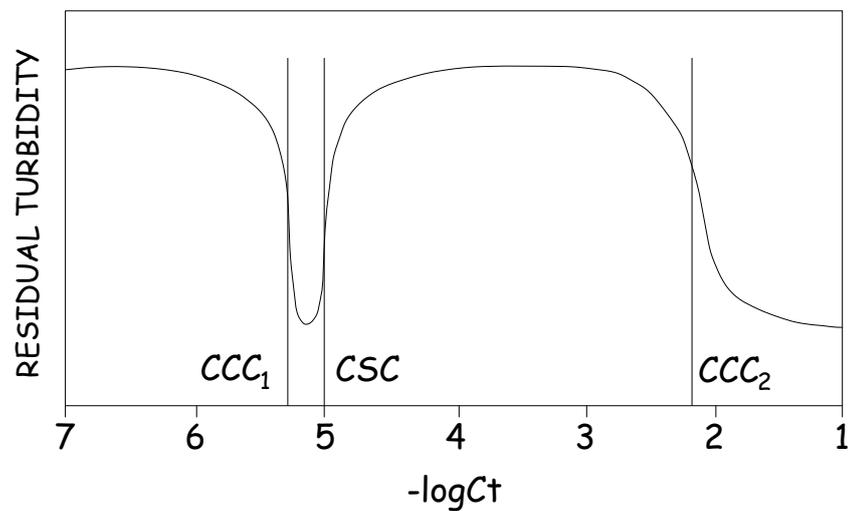


La disociación de estas sales metálicas conduce a la generación de iones sulfato e iones cloro tal como lo haría el ácido sulfúrico y ácido clorhídrico, en ese sentido, es de esperar que el pH de la solución tienda a disminuir consumiendo la alcalinidad presente en el agua. “La alcalinidad es la capacidad neutralizadora de ácidos del agua y se consume en una base equivalente; es decir, 1 meq/L de aluminio o hierro consumirá 1 meq/L de alcalinidad” (Crittenden et al, 2012, pp. 566-667).

### **2.2.2. Parámetros de importancia que intervienen en el mecanismo de floculación y sus principales efectos.**

En la floculación del agua, los parámetros que intervienen y condicionan el mecanismo de floculación son variables como el pH del ensayo, la dosis del coagulante, las gradientes de floculación y la concentración de partículas en el agua. Estos parámetros son de mucha importancia, tal es así, que existe un rango adecuado de pH y dosis fuera de los cuales el mecanismo de desestabilización y posterior floculación no es posible. Al respecto Bratby (2016) indica: “El efecto de la dosis de coagulante sobre la desestabilización depende mucho del mecanismo de desestabilización en operación” (p. 84). En la Figura 3 se muestra los resultados obtenidos para la desestabilización de una dispersión de sílice con una concentración superficial de 10m<sup>2</sup>/l, usando Fe (III) a un pH de 4.0, como resultado se observa que el incremento en la concentración de coagulante reproduce regiones críticas de desestabilización óptima y re-estabilización de partículas.

**Figura 3:** Características de la desestabilización donde la adsorción de especies de coagulante está operativa.



**Nota.** (1) CCC<sub>1</sub> y CSC significan las concentraciones Ct de coagulante necesarias para la desestabilización y re-estabilización de la dispersión, (2) CCC (concentración crítica de coagulante) y CSC (concentración crítica de re-estabilización)

**Fuente:** Bratby, J. (2016).

La primera región identificada como CCC<sub>1</sub>, representa el punto de quiebre en la que una concentración mayor de coagulante producirá una re-estabilización de las partículas primarias, ocasionando el incremento de turbiedad de la muestra. “La primera región, identificada como CCC<sub>1</sub>, ocurre cuando hay suficientes especies coagulantes de hidróxido metálico para adsorberse y, por lo tanto, desestabilizar la suspensión” (Bratby, 2016, p. 86). Asimismo, la concentración inicial de coagulante que produce una re-estabilización en la figura está señalada como SCS (concentración crítica de re-estabilización), sobre la causa de la re-estabilización de las partículas, Bratby (2016) menciona:

La re-estabilización podría ocurrir debido a un exceso de adsorción de contraiones que da lugar a una inversión de carga, o debido a un exceso de adsorción de especies poliméricas que ocupan demasiados sitios de adsorción, lo

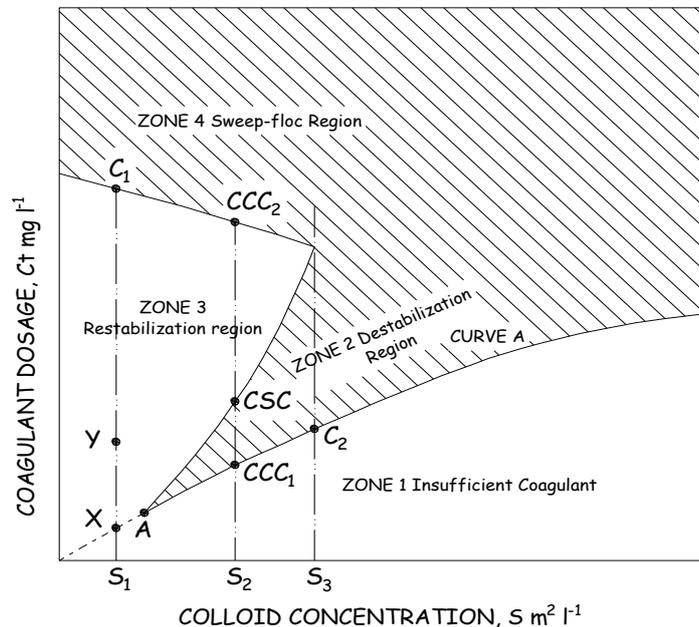
que impide la formación de puentes entre partículas adyacentes. (p. 86)

Por otra parte, al aumentar aún más la concentración inicial de coagulante se genera otro sector de desestabilización adicional, CCC<sub>2</sub>, al corresponder a esta zona altas concentraciones de coagulante, es muy probable que el mecanismo predominante de desestabilización sea el de barrido.

Al igual que la dosis de coagulante tiene un efecto sobre el mecanismo de desestabilización, la concentración de partículas de la suspensión también condiciona el mecanismo de desestabilización e interactúa con la dosis de coagulante aplicado, es decir, para una concentración de partículas y coagulante definidas, existe un tipo de mecanismo de floculación predominante. La Figura 4 muestra la relación entre la dosis de coagulante y la concentración de partículas.

Se observa que cuando la concentración de partículas es alta y la dosis de coagulante es baja no es posible que se realice el mecanismo de desestabilización, esta zona corresponde a la zona 1. Asimismo, en la zona 3, se observa que cuando la concentración de partículas es baja, existe un rango reducido de coagulante debajo o por encima del cual tampoco se realiza el mecanismo de desestabilización. La región sombreada correspondiente a las zonas 2 y 4 corresponde a las zonas donde la desestabilización toma lugar, en la zona 4 como resultado de una alta dosis de coagulante, el mecanismo de desestabilización predominante es la de barrido.

**Figura 4:** Zonas de desestabilización y re-estabilización de partículas a un pH determinado, S y Ct son la concentración de partículas y dosis de coagulante respectivamente.



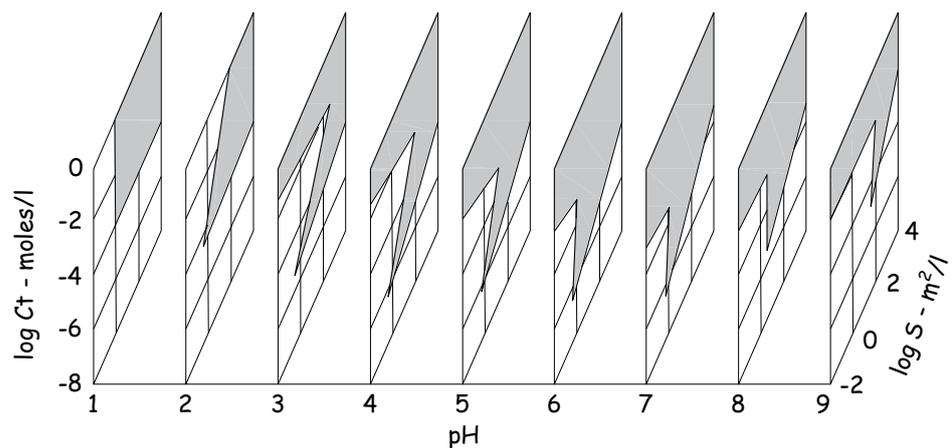
**Fuente:** Bratby, J. (2016).

A bajas concentraciones de partículas primarias, se requiere una dosis elevada de coagulante para conseguir el mecanismo de desestabilización. “A concentraciones muy bajas de coloides (S1, digamos) hay muy poca oportunidad de contacto para las interacciones coloide-coloide” (Bratby, 2016, p. 88). En ese sentido, cuando se aplica una dosis X de coagulante se produce una adsorción desigual y una parte de las partículas permanece estable, por otra parte, si la dosis de aumenta a Y, existe una mayor disponibilidad de coagulante para cada partícula, pero debido a que la concentración de coagulante con respecto a la concentración de partículas es alta, se produce una adsorción excesiva y se produce una re-estabilización de partículas. En esta región la única forma de producir la desestabilización es aumentar la dosis a un valor de al menos C1. Cuando la concentración aumenta por ejemplo a S2 la cantidad requerida de dosis es mucho menor a comparación cuando la concentración de partículas era de S1, pero incluso en esta zona la dosis adecuada es reducida ya que por encima de la dosis CSC

se produce una re-estabilización y requiere un aumento significativo hasta una dosis de  $CCC_2$  donde vuelve a producirse el mecanismo de desestabilización por barrido. Finalmente, a una concentración de partículas alta como  $S_3$  hay un rango más amplio donde se produce la desestabilización con un mecanismo predominante de represión de la doble capa.

El pH como se indicó líneas arriba es un parámetro que influye mucho en la coagulación, existe un rango fuera del cual el mecanismo de desestabilización no se produce, según Bratby (2016): “El predominio de una especie de hidrólisis particular durante la desestabilización depende en gran medida del valor del pH” (p. 90). En ese sentido es un parámetro que debe ser evaluada con cuidado, y la Figura 5 muestra el diagrama de desestabilización y re-estabilización para suspensiones de sílice al usar Fe (III) como coagulante, y que sirve de ejemplo para explicar la influencia del pH en la cinética de floculación.

**Figura 5:** Zonas de desestabilización y re-estabilización en función al pH, concentración de partículas (S) y dosis de coagulante (Ct), en una dispersión de sílice usando Fe (III) como coagulante.



**Fuente:** Bratby, J. (2016).

Se observa que a un pH muy bajo de 1.0 no da a lugar un apreciable mecanismo de desestabilización, asimismo la concentración de coagulante es independiente de la concentración de partículas. En

esta zona, según Bratby (2016), “La concentración de coagulante para la desestabilización es independiente de la concentración de coloide y no se produce reestabilización” (p. 90). Esto debido a que posibles especies de hidrólisis que existen a estos valores de pH son los iones metálicos acuáticos hidratados (tales como el  $\text{Fe}^{3+}$  y el  $\text{FeOH}^{2+}$  en el caso del hierro) y el mecanismo de desestabilización se debe casi totalmente a la represión de la doble capa por consideraciones de fuerza iónica.

A un pH de 2.0 ocurre un mecanismo similar al del pH de 1.0 con la diferencia que, en esta zona, a unas concentraciones bajas y medias de partículas ocurre una re-estabilización. En esta zona según Bratby (2016): “Las especies de coagulantes metálicos hidrolizados tienen una tendencia pronunciada a la adsorción” (p. 91), por ende, el mecanismo predominante es la de adsorción y las dosis excesivas producen una reversión de carga y la consiguiente estabilización de partículas.

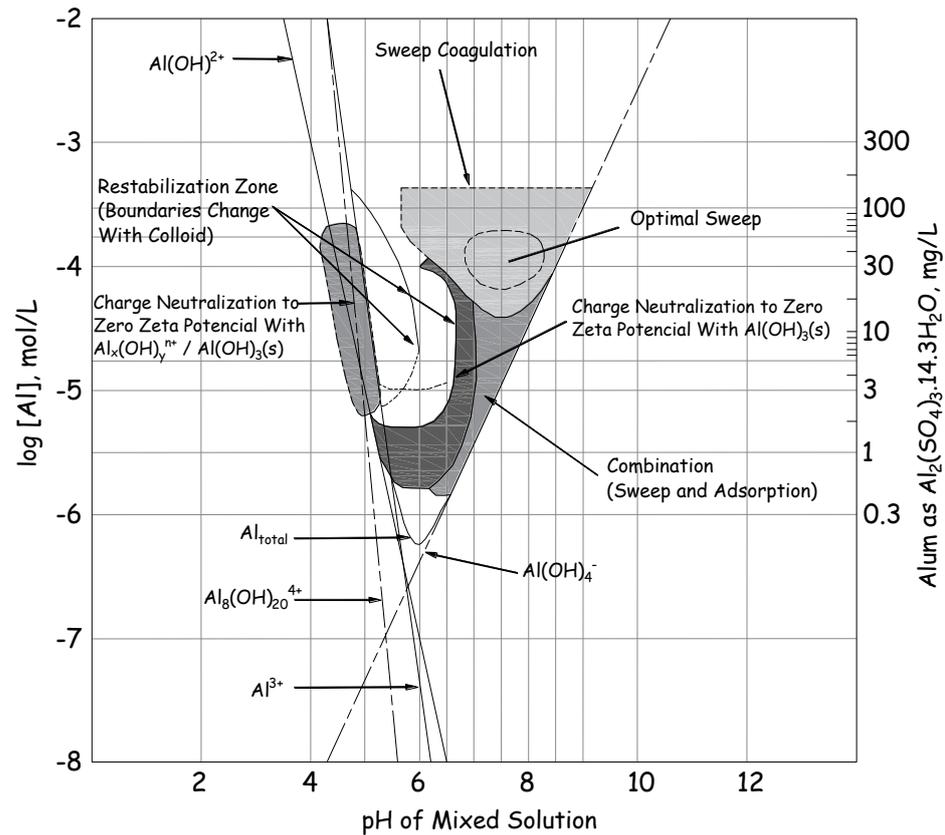
En el rango de pH de 3.0 a 5.0, se observa que se generan dos franjas de zonas de desestabilización que depende de la concentración de las partículas y la dosis de coagulante aplicado. Dicha región de desestabilización se va acrecentando con el incremento del pH, es decir con un pH cercano a 5.0, se obtendrá mayor cantidad de partículas desestabilizadas.

Finalmente, en rangos de pH de 6.0 a 9.0 se reduce la región donde se concentra las zonas de re-estabilización, pero se observa además que a medida que el pH aumenta se requiere una dosis mayor de coagulante para producir el mecanismo de desestabilización.

Como se mencionó líneas arriba hay una dependencia pH-dosis-concentración de partículas que determinan el tipo de mecanismo de desestabilización, sobre ello y para el caso particular del aluminio y hierro se han desarrollado diagramas detallados sobre el tipo de mecanismo de desestabilización y las especies hidrolíticas

predominantes de los coagulantes, estos diagramas me muestran en la Figura 6 para el caso del aluminio y en la Figura 7 para el caso del hierro.

**Figura 6:** Diagrama de coagulación para el aluminio con presencia de especies hidrolíticas mononucleares.

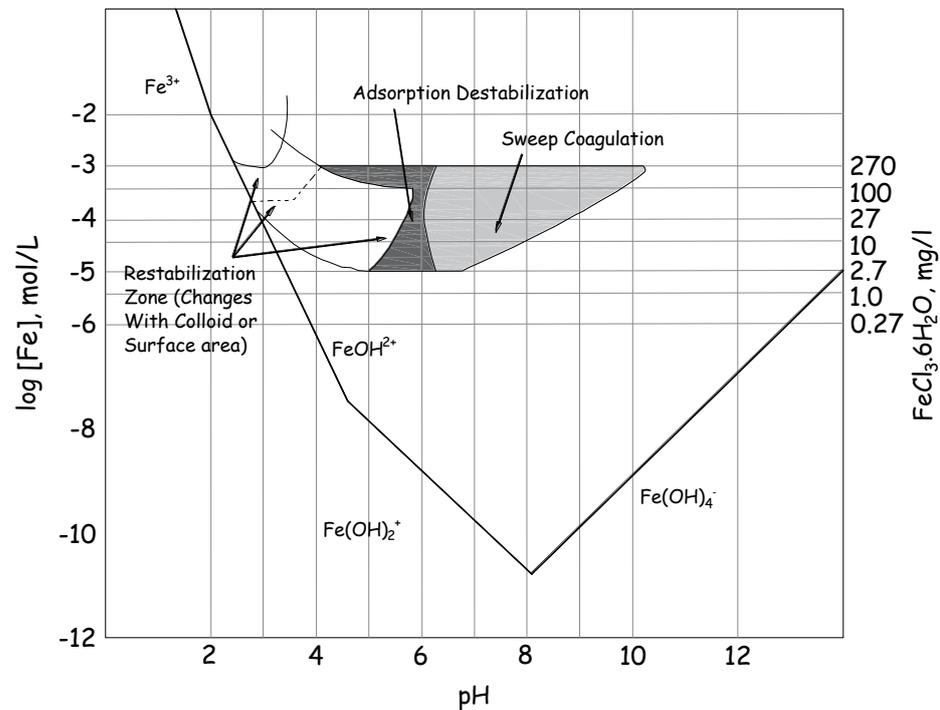


**Fuente:** Bratby, J. (2016).

En estas figuras se observa que para cada tipo de coagulante metálico el diagrama que define la desestabilización es distinta, asimismo para el caso del hierro el rango de pH en el cual opera es ligeramente superior a la del aluminio ya que en el caso del hierro incluso a un pH de 10.0 es posible producir el mecanismo de desestabilización, sin embargo, con el aluminio solamente es posible hasta un pH de 8.5 o 9. Sin embargo debe tenerse en cuenta que estos diagramas han sido realizados con agua sintética y a una temperatura constante, por lo que es solo una referencia de cómo se comporta el proceso de desestabilización de partículas en función

del pH y de la dosis de coagulante aplicado, pero no significa que un agua en particular con una temperatura en particular muestre el mismo comportamiento mostrado en los diagramas.

**Figura 7:** Diagrama de coagulación para el hierro con presencia de especies hidrolíticas mononucleares.



**Fuente:** Bratby, J. (2016).

Sobre el comportamiento de estos dos diagramas, Crittenden et al. (2012) menciona lo siguiente: “El hidróxido de aluminio y el hidróxido férrico se precipitan dentro de las áreas sombreadas, y las especies polinucleares y poliméricas se forman fuera de las áreas sombreadas a valores de pH más altos y bajos” (p. 565). Asimismo, existe una diferencia entre la estructura del precipitado de hidróxido del aluminio y del hierro, toda vez los precipitados de hierro son mucho compactos y resistentes que los del aluminio.

### 2.2.3. Cinética de la floculación y las constantes cinéticas de agregación y ruptura

La cinética de floculación está definida por tres procesos: la primera, la floculación pericinética, producida por la agitación térmica del

agua o también conocida como movimiento browniano; y la segunda, la floculación ortocinética, producida por la agitación externa inducida al cuerpo de agua y finalmente por la sedimentación diferencial.

Durante la floculación pericinetica se lleva a cabo, producto del movimiento browniano y es un proceso naturalmente aleatorio. “La floculación durante esta etapa comienza inmediatamente después de la desestabilización y se completa en segundos, ya que existe un tamaño de flóculo límite más allá del cual el movimiento browniano tiene poco o ningún efecto” (Bratby, 2016, p. 315). Asimismo, en esta etapa la floculación comienza inmediatamente después de la desestabilización y se logra completar en cuestión de segundos, debido a que en el proceso los floc crecen y llegado a un tamaño determinado, el movimiento browniano tiene poco o ningún efecto.

Por otro lado, los tres modelos predominantes utilizados para describir el proceso de floculación son; partículas esféricas en un campo de flujo lineal, partículas esféricas en un campo de flujo no lineal y modelos basados en fractales. “La acción de la floculación depende de las características de las partículas, así como de las condiciones de mezcla del fluido” (Crittenden et al., 2012, p. 590). En la Figura 8 se muestra un esquema ilustrativo del mecanismo de floculación desde que se adiciona el coagulante hasta que se logra formar las agrupaciones de flóculos.

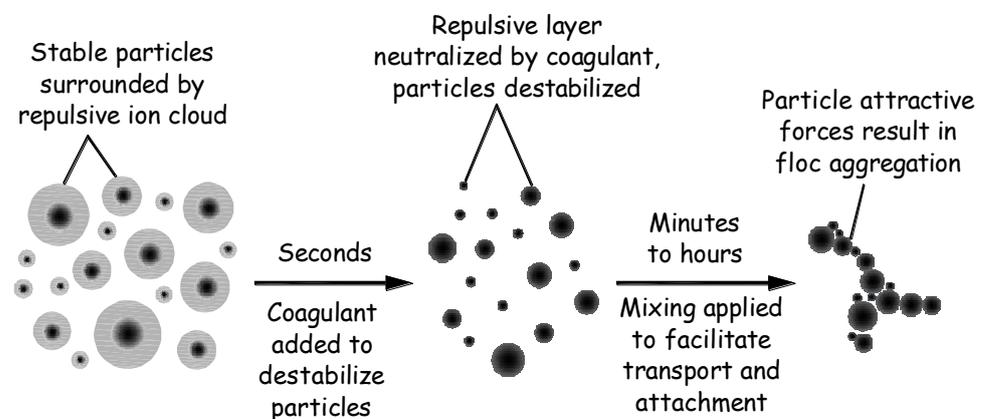
Con respecto al segundo tipo de proceso que define la cinética de la floculación, es decir la floculación ortocinética, es importante indicar que a diferencia de la floculación pericinetica, en este caso, es producido por los gradientes de velocidad inducidos al líquido. Según Bratby (2016):

Dichos gradientes de velocidad pueden inducirse poniendo el líquido en movimiento mediante (a) el paso alrededor de deflectores o agitación mecánica dentro de un reactor de

floculación; (b) el camino tortuoso a través de los intersticios de un lecho de filtro granular; (c) por velocidades de asentamiento diferenciales dentro de un estanque de sedimentación. (pp. 315-316)

Asimismo, indica que, el efecto de las gradientes es establecer velocidades relativas entre partículas para proporcionar oportunidad de contacto.

**Figura 8:** Esquema ilustrativo del proceso de agregación de partículas en el proceso de la floculación.



**Fuente:** Crittenden, J. C., Trushell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., y Tchobanoglous, G. (2012).

En la floculación ortocinética, una característica de este proceso es que su influencia es para partículas mayores de 1µm de tamaño aproximadamente. Se lleva a cabo por la inducción de gradiente a través de mezcladores mecánicos, lo que produce la floculación a macroescala, nombre con el cual también se conoce a la floculación ortocinética.

Por otra parte, la sedimentación diferencial, es un mecanismo que se produce cuando flóculos en proceso de crecimiento se asientan a diferentes velocidades, colisionan y floculan. “La sedimentación diferencial de partículas ocurre en suspensiones heterogéneas (diferentes tamaños de partículas) durante la sedimentación, proporcionando un mecanismo adicional para promover la

floculación” (Crittenden et al, 2012, p. 591). Por ejemplo, en el caso de fuentes de agua que se caracterizan por la presencia de partículas con distribución de tamaños considerablemente heterogénea, la sedimentación diferencial puede ser un mecanismo importante de la floculación.

El modelo matemático de la floculación pericinética fue desarrollado inicialmente por Von Smoluchowski, se basa en el principio de que la frecuencia de colisiones de partículas para formar floc es debido al flujo de difusión de partículas hacia una partícula estacionaria, y este flujo de partículas es en dirección radial. Según Bratby (2016):

El número de partículas que se difunden radialmente hacia adentro a través de la superficie de una esfera centrada en la partícula estacionaria es proporcional al coeficiente de difusión browniano de las partículas, el área superficial de la esfera y el gradiente de concentración de partículas en la dirección radial (p. 317).

Por otra parte, asumiendo que la partícula centra estacionaria también experimenta difusión, el modelo Von Smoluchowski, para la floculación pericinética es:

$$I_{ij}=4\pi D_{ij}R_{ij}n_i n_j \dots \text{ecuación 7}$$

- $I_{ij}$  = número de contactos por unidad de tiempo entre partículas de radio  $R_i$  y  $R_j$
- $D_{ij}$  = coeficiente de difusión mutua de partículas  $i$  y  $j$  (aproximadamente  $D_i + D_j$ )
- $R_{ij}$  = radio de interacción de dos partículas, es decir, la distancia entre los centros de dos partículas formando un último contacto, es decir,  $R_{ij} = R_i + R_j$
- $n_i, n_j$  = número de concentración de las partículas  $i$  y  $j$

Cuando la gradiente es mayor a  $5 \text{ s}^{-1}$  y el tamaño de partículas es mayor que un  $1 \mu\text{m}$  la única forma de promover contacto entre partículas es induciendo un movimiento de cizallamiento en el líquido. Esto se consigue induciendo gradientes de velocidad y en esta etapa la floculación es denominada floculación ortocinética. Según Bratby (2016), “Cuanto mayor sean los gradientes de velocidad inducidos en el líquido, más contactos de partículas habrá en un tiempo determinado” (p. 318). Sin embargo, si se incrementa la gradiente a un valor muy grande, el factor predominante será la descomposición continua de los floc formados y por ende solo se obtendrá la formación de flocs de tamaño reducido.

Al igual que para la floculación pericinética, Von Smoluchowski desarrolló una ecuación para la floculación ortocinética de partículas coloidales en condiciones de flujo laminar. Este modelo consiste en que dos partículas  $i$  y  $j$  están en suspensión en un líquido moviéndose en una dirección “ $x$ ” en un flujo laminar. Las velocidades de la partícula  $j$  es  $v$  y la gradiente de velocidad en la dirección  $z$  es  $dv/dz$ . “Para que la partícula  $i$  entre en contacto con la partícula  $j$ , debe estar lo suficientemente cerca para que las fuerzas de atracción de London-van der Waal y mantengan juntas las dos partículas” (Bratby, 2016, p. 318). Dicho contacto sucede en un lugar geométrico que corresponde a una esfera, cuyo radio es la suma de los radios de las dos partículas que entran en contacto; esto se muestra gráficamente en la Figura 9.

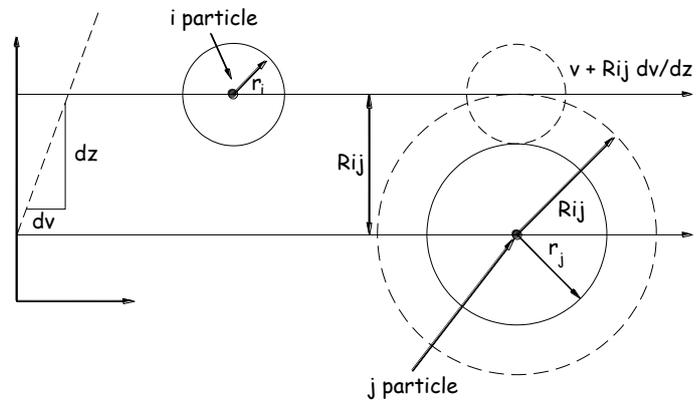
Por otro lado, la velocidad de flujo a una distancia  $z$  de la partícula  $i$  es igual a  $z(dv/dz)$ , relativa a la partícula  $j$ . Y el área a través de la cual tiene lugar este flujo es:

$$dA=2\sqrt{R_{ij}^2-z^2}dz \dots \text{ecuación 8}$$

En ese sentido la tasa de flujo hacia el área  $dA$  está dado por:

$$dq=2z \frac{dv}{dz} \sqrt{R_{ij}^2-z^2} dz \dots \text{ecuación 9}$$

**Figura 9:** Contacto entre dos partículas i y j moviéndose bajo la influencia de una gradiente de velocidad  $dv/dz$

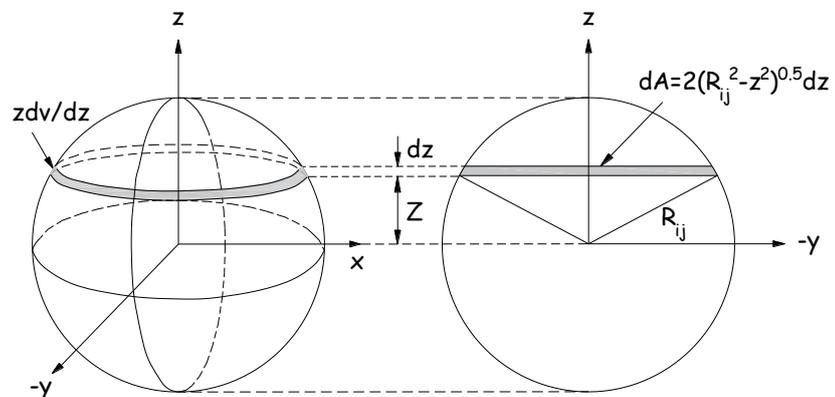


**Fuente:** Bratby, J. (2016).

- $dq$ : flujo diferencial de fluido a través del área elemental  $dA$ ,  $m^3/s$
- $q$ : tasa de flujo de fluido a través del área proyectada de la partícula en el plano  $y$ - $z$ ,  $m^3/s$
- $z$ : dirección o eje vertical,  $m$
- $dv/dz$ : gradiente de velocidad en la dirección  $x$ ,  $s^{-1}$
- $R_{ij}$ : distancia de centro a centro de las partículas  $i$  y  $j$ ,  $m$

La mencionada influencia alrededor de la partícula central  $j$  se muestra en la Figura 10.

**Figura 10:** Zona de influencia alrededor de la partícula  $j$



**Fuente:** Bratby, J. (2016).

Suponiendo que el número de partículas  $i$  por unidad de volumen es  $n_i$ , el número de contactos  $H_i$  de las partículas  $i$  con la partícula central  $j$  por unidad de tiempo es:

$$H_i = \int_{z=0}^{z=R_{ij}} n_i dq = 2n_i \int_{z=0}^{z=R_{ij}} 2z \frac{dv}{dz} \sqrt{R_{ij}^2 - z^2} dz \dots \text{ecuación 10}$$

Haciendo un arreglo a la ecuación 10, y para un rango constante de gradiente de velocidad en el rango de integración, el número de contacto de las partículas  $i$  con la partícula central  $j$  por unidad de tiempo es:

$$H_i = 4n_i \left( \frac{dv}{dz} \right) \int_0^{R_{ij}} z \sqrt{R_{ij}^2 - z^2} dz = 4n_i \left( \frac{dv}{dz} \right) \left( \frac{R_{ij}^3}{3} \right) = \frac{4}{3} n_i \left( \frac{dv}{dz} \right) R_{ij}^3 \dots \text{ecuación}$$

11

Para el total de  $n_j$  partículas  $j$  centrales, el número de contacto entre todas las partículas  $i$  con todas las partículas  $j$  por unidad de tiempo está dado por el producto del número de contacto de las partículas  $i$  con el total de las partículas  $j$ , es decir:

$$H_{ij} = \frac{4}{3} n_i n_j R_{ij}^3 \left( \frac{dv}{dz} \right) \dots \text{ecuación 12}$$

- $n_i$ : concentración de partículas  $i$
- $n_j$ : concentración de partículas  $j$

Por otra parte, para condiciones de flujo turbulento, el gradiente de velocidad varía en el tiempo y en el espacio dentro del reactor de floculación. Según Crittenden et al. (2012), "Cuando se promedia sobre todo el reactor, el gradiente de velocidad se conoce como el gradiente de velocidad de la raíz cuadrada media (RMS) y se le da el símbolo  $G$ " (p. 596). Es decir que la gradiente de velocidad no está bien definida y varía en el tiempo y que  $G$  es un valor medio y de uso extendido en el diseño de reactores de floculación en plantas de tratamiento debido a que el comportamiento en estos reactores es de flujos turbulentos y no laminares.

En ese sentido para condiciones de flujo turbulento, la gradiente de velocidad está definido por:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} \dots \text{ecuación 13}$$

- G: gradiente de velocidad para flujo turbulento, s<sup>-1</sup>
- P: potencia de mezcla en el reactor de floculación, W = 1 kg.m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>
- V: volumen del reactor de floculación, m<sup>3</sup>
- u: viscosidad dinámica del agua, kg/m.s

Al reemplazar G en la ecuación 12, la ecuación para una floculación ortocinética en flujo turbulento estará dado por:

$$H_{ij} = \frac{4}{3} n_i n_j R_{ij}^3 \cdot G \dots \text{ecuación 14}$$

La ecuación general que describe la tasa de la formación de agregados a partir de partículas primarias y la tasa de eliminación de dichos agregados por medio de colisiones con otras partículas está dado por:

$$\frac{dn_k}{dt} = \frac{2}{3} \left[ \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=k-1} n_i n_j R_{ij}^3 - 2n_k \sum_{i=1}^{\infty} n_i R_{ij}^3 \right] \frac{dv}{dz} \dots \text{ecuación 15}$$

El primer término del corchete (de color azul) describe la formación de partículas de radio R<sub>k</sub> a partir de partículas primarias de tamaño i=j=1 hasta partículas de un tamaño k-1. El segundo término (de color rojo) representa la eliminación de partículas de tamaño k debido a que colisionan con el resto de las partículas, esta colisión sucede entre partículas primarias de tamaño i=1 hasta partículas de tamaño infinito.

Trabajos posteriores realizados por Harris, Kaufman y otros, modificaron la ecuación 15 para incluir el mecanismo de ruptura de flóculos formados, para formar nuevamente partículas primarias y la

posibilidad de colisiones que no necesariamente culminen en formación de flóculos. Se consideró el caso  $k=1$ , es decir, la tasa a la cual las partículas primarias son removidas del sistema, una vez. La expresión para la tasa de cambio en la concentración de partículas primarias es:

$$\frac{dn_1}{dt} = -\frac{\alpha a^3}{\pi} \delta \cdot \emptyset \cdot n_1 \frac{dv}{dz} \dots \text{ecuación 16}$$

- $\alpha$ : fracción de colisiones que resultan en agregación
- $a$ : relación entre el radio de colisión de un flóculo y su radio físico
- $\emptyset$ : fracción de volumen de floc
- $\delta$ : función de distribución de tamaño

La función de distribución de tamaño está dada por:

$$\delta = \frac{\sum_{i=0}^{p-1} n_i (i^3 + 1)}{\sum_{i=0}^p i n_i} \dots \text{ecuación 17}$$

Trabajos realizados por Harris y otros, en un sistema compuesto únicamente por partículas primarias y flóculos grandes y asumiendo que las variaciones de tamaño dentro de cada grupo son pequeñas en comparación con las diferencias entre los grupos, llegaron a determinar que la eliminación de partículas primarias se produce principalmente por sus colisiones con flóculos, en consecuencia, la ecuación 16 se simplifica a:

$$\frac{dn_1}{dt} = -\frac{4}{3} n_1 n_F R_F^3 \frac{dv}{dz} \dots \text{ecuación 18}$$

- $R_F$ : radio de los flóculos
- $n_F$ : concentración de número de flóculos

En investigaciones posteriores, realizados por Argaman y Kaufman, se estableció un modelo matemático que describe la cinética de la floculación ortocinética en régimen turbulento. "Se basa en la

hipótesis de que las partículas suspendidas en un régimen turbulento experimentan un movimiento aleatorio que se asemeja a las moléculas de gas” (Bratby, 2016, p. 322). Además, los flóculos en este modelo presentan una distribución de tamaño bimodal (es decir, hay dos tamaños que se presentan con mayor frecuencia con respecto a otros) que comprende tantas partículas primarias y flóculos grandes. En ese sentido, la expresión para la tasa de colisión de partículas primarias y flóculos en el modelo de Argaman y Kaufman está dado por:

$$H_{1F}=4\pi K_S R_F^3 n_1 n_F u^2 \dots \text{ecuación 19}$$

- $K_S$ : coeficiente de proporcionalidad que expresa el efecto del espectro de energía de la turbulencia sobre el coeficiente de difusión efectivo.
- $R_F$ : radio del flóculo.
- $n_1, n_F$ : concentración de número de partículas primarias y flóculos respectivamente.
- $u^2$ : fluctuación de velocidad cuadrática media, que está relacionada con la raíz de la gradiente de velocidad cuadrática media,  $G$ , es una medida de la intensidad de la turbulencia.

Asimismo, si bien es cierto que la ecuación 19 se establece para la floculación ortocinética, teniendo en cuenta el concepto de difusión turbulenta, es equivalente en forma a la ecuación establecida para la floculación para flujos laminares.

Hasta ahora se ha descrito los modelos planteados sobre la cinética de la floculación pericinética y ortocinética y en flujos de régimen laminar y turbulento. En estos modelos se describen el mecanismo por el cual partículas primarias se unen para formar flóculos, pero no incluyen un mecanismo de desagregación de flóculos o también llamado ruptura de flóculos, que ocurren en el proceso de la floculación sobre todo en la floculación ortocinética. Al respecto

Argaman y Kaufman desarrollaron un modelo para el mecanismo de ruptura de flóculos y la integraron a la ecuación ya desarrollada para el mecanismo de agregación. “Cuando las condiciones de flujo son turbulentas, no se puede despreciar la ruptura de los flóculos” (Crittenden et al., 2012, p. 607). Esta ruptura a partir de flóculos ya formados ocurre cuando fuerzas cortantes locales, producidos por la gradiente ocasionan que pequeñas partículas se desprendan. Entre los principales mecanismos de ruptura de estos agregados o flóculos se tiene la erosión superficial y la ruptura de flóculos.

En resumen, se puede establecer que en el proceso de floculación ortocinética ocurren dos procesos opuestos, el mecanismo de agregación de partículas primarias para formar floc y el mecanismo de ruptura de flocs formados en pequeños fragmentos. En el modelo de Argaman y Kaufman el mecanismo de ruptura de flóculos está definido por la tasa de formación de partículas primarias debido al cizallamiento de la superficie del flóculo.

$$\frac{dn_1}{dt} = B \cdot R_F^{-2} \cdot \frac{\eta_F}{R_1^2} \cdot u^2 \dots \text{ecuación 20}$$

- B: Constante de ruptura

Trabajos realizados por Kolmogorov sobre la turbulencia, introduce el modelo de cascada de energía, en el que postula que la turbulencia está formada por remolinos de diversos tamaños. Los remolinos más grandes se hacen inestables y transfieren energía a remolinos más pequeños y estos a su vez continúan transfiriendo energía a remolinos aún más pequeños, ese proceso continúa hasta llegar a una escala en la que los efectos de la viscosidad del líquido la disipan. Justamente esta escala que separa y distingue los movimientos turbulentos que se dan en una zona de macroescala donde hay disipación de energía a través de remolinos y en una zona de microescala en la que la energía se disipa por efecto de la viscosidad, efecto que se conoce como la microescala de Kolmogorov ( $\lambda$ ). Según Bratby (2016):

La microescala de Kolmogorov,  $\eta$  identifica un punto divisorio, por encima del cual la energía de inercia tiene una influencia disruptiva en la supervivencia de los flóculos, y por debajo del cual la energía se disipa y hay poca influencia en los flóculos (p. 323).

La microescala de longitud de Kolmogorov cuando se determina en función de la gradiente de velocidad cuadrática media, está definida por:

$$\eta = \sqrt{\frac{\nu}{G}} \dots \text{ecuación 21}$$

- $\nu$ : viscosidad cinemática del agua,  $\text{cm}^2/\text{s}$
- $G$ : Gradiente de velocidad cuadrática media,  $\text{s}^{-1}$

Por ejemplo, si se está floculando agua con una viscosidad cinemática de  $0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$  y con una gradiente de  $30 \text{ s}^{-1}$ , entonces la microescala de longitud de kolmogorov tomará un valor de  $\eta=0.018 \text{ cm}$  o  $0.18 \text{ mm}$ . Este valor indica que los flóculos de tamaño superior a  $0.18 \text{ mm}$  pueden estar sujetos a la rotura o ruptura durante la floculación.

En la floculación ortocinética, hay predominancia de fuerzas ya sea inerciales o viscosas, en función al tamaño de remolino que genere la gradiente aplicada. Según Arboleda (2000):

Según sea el tamaño de las escalas de los vórtices, puede predominar en el movimiento las fuerzas inerciales o las viscosas por lo que se acostumbra a clasificar el campo turbulento en dos subrangos: el subrango inercial, para los vórtices más grandes, y el subrango viscoso, para los vórtices más pequeños. (p. 70).

Para diferenciar entre un sub-rango u otro, se utiliza la microescala de longitud de kolmogorov. Cuando se determina esta microescala

en función de la potencia disipada por unidad de masa,  $\varepsilon$ , la ecuación es:

$$\eta = \sqrt[4]{\frac{v^3}{\varepsilon}} \dots \text{ecuación 22}$$

- $\varepsilon$ : potencia disipada por unidad de masa,  $m^2/s^3$

“Las partículas iniciales que existen en el agua que se quiere floccular, tienen diámetros del orden de una micra (0.001 mm) y van creciendo en tres órdenes de magnitud, por sucesivos choques hasta 1.0 mm o más” (Arboleda, 2000, p. 71). El tamaño de remolinos o vórtices que se requieren para hacer mover o chocar estas partículas primarias unas con otras, deben ser similares al tamaño de las partículas, es decir,  $\eta/d=1$ .

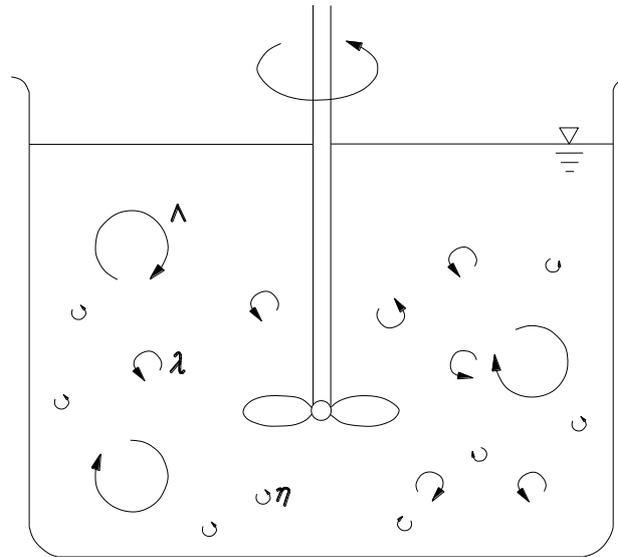
Por otro lado, debido a que los remolinos vienen en una gama amplia de tamaños, se necesita un mínimo de dos escalas de longitud para caracterizar los remolinos grandes y pequeños. Según Ting (2016):

Siguiendo la convención típica, la escala “ $\Lambda$ ” se usa para indicar los remolinos grandes y “ $\lambda$ ” para los remolinos pequeños, que actúan como un sumidero para los movimientos moleculares para disipar la turbulencia, canalizando la energía cinética turbulenta a través de la viscosidad en calor (p. 77).

En la Figura 11, se muestra esquemáticamente como interactúan las escalas de Kolmogorov y otras escalas más grandes en el proceso de mezclado mecánico.

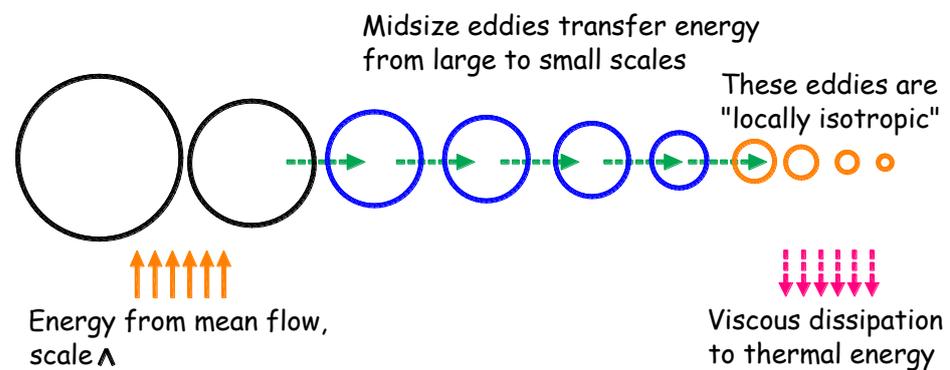
También, en la Figura 12 se muestra los remolinos que se producen por la agitación turbulenta de la masa del agua y que dichos remolinos transfieren su energía a remolinos más pequeños y así sucesivamente hasta que se disipan en forma de calor por efecto de la viscosidad.

**Figura 11:** Representación gráfica de las escalas de kolmogorov.



**Fuente:** Ting, D. S. (2016).

**Figura 12:** Representación gráfica de la cascada de energía de los remolinos en flujo turbulento.



**Fuente:** Ting, D. S. (2016).

Por otro lado, debido a que el mecanismo de agregación y ruptura ocurren en simultaneidad en el proceso de la floculación, la expresión general que define la tasa de cambio de las partículas primarias en la floculación está dado por:

$$\frac{dn_1}{dt} = -4\pi\alpha K_S R_F^3 n_1 n_F u^2 + B^* R_F^{2*} \frac{n_F}{R_1^2} * u^2 \dots \text{ecuación 23}$$

- $\alpha$ : fracción de partículas que resultan en agregación permanente.

Argaman y Kaufman utilizaron expresión etiquetada como ecuación 23 para el caso particular de un reactor de flujo continuo y mezcla completa, también conocido como reactor CSTR, en estado estático, con la que obtuvieron la siguiente expresión:

$$n_0 - n_1 = (4\pi\alpha K_S R_F^3 n_1 n_F u^2 - B \frac{R_F^2}{R_1^2} * n_F * u^2) * T \dots \text{ecuación 24}$$

Haciendo un arreglo a la ecuación 24 de manera tal que quede despejado el índice o performance de floculación “ $n_0/n_1$ ”, quedaría establecida como se muestra en la ecuación 25.

$$\frac{n_0}{n_1} = \frac{1 + 4\pi\alpha K_S R_F^3 n_F u^2 * T}{1 + \frac{B * R_F^2 * n_F * u^2 * T}{n_0 R_1^2}} \dots \text{ecuación 25}$$

- $n_0$ : número de concentración de partículas primarias en  $T=0$
- $n_1$ : número de concentración de partículas primarias en  $T$
- $n_0/n_1$ : performance o índice de floculación

Con el fin de desarrollar una ecuación de trabajo que consigne parámetros medibles experimentalmente, Argaman y Kaufman, desarrollaron la ecuación 25 sustituyendo algunos parámetros de esta ecuación por otros parámetros medibles, como se indica a continuación:

- a) El tamaño medio de los flóculos está estrechamente relacionado con la velocidad de fluctuación cuadrática media:

$$R_F = \frac{K_2}{u^2} \dots \text{ecuación 26}$$

- $K_2$ : es una constante
- b) Las fluctuaciones de la velocidad cuadrática media se pueden estimar a partir del gradiente de velocidad cuadrática media:

$$u^2 = K_P * G \dots \text{ecuación 27}$$

- $K_P$ : coeficiente de rendimiento del agitador, parámetro que depende del tipo de dispositivo de agitación.
- c) Asumiendo que las partículas son esféricas, el volumen de flóculos en un reactor es:

$$\phi = \frac{4}{3} \pi n_F R_F^3 \dots \text{ecuación 28}$$

- d) La relación de colisión-agregación,  $\alpha$ , es constante. “A medida que aumenta el tiempo de floculación, los flóculos se vuelven más compactos y de forma más regular, y por lo tanto, la probabilidad de una adhesión exitosa en la colisión disminuye” (Bratby, 2016, p. 324). Asimismo, la constante de floculación  $K_F$  está dado por:

$$K_F = 3\alpha\phi \dots \text{ecuación 29}$$

Sustituyendo las ecuaciones 20, 21, 22 y 23 en la ecuación 19 y considerando que la constante de ruptura,  $K_B$  está dado por:

$$K_B = \frac{3}{4\pi} \frac{B^* \phi^* K_P^2}{n_o^* R_1^2 * K_2} \dots \text{ecuación 30}$$

Y también considerando que la constante de agregación,  $K_A$ , está dado por:

$$K_A = K_F * K_S * K_P \dots \text{ecuación 31}$$

Entonces, la ecuación de floculación de Argaman y Kaufman para un reactor de flujo continuo y mezcla completa estará determinada por la siguiente expresión:

$$\frac{n_o}{n_1} = \frac{1 + K_A GT}{1 + K_B G^2 T} \dots \text{ecuación 32}$$

- T: tiempo de retención

Los valores de las constantes de agregación y ruptura se pueden determinar en laboratorio experimentalmente, ya sea en un sistema continuo o en ensayos en batch.

La ecuación 32 es para un solo reactor CSTR, cuando se consideran “m” reactores CSTR conectadas en serie, y asumiendo que las constantes de agregación y ruptura se mantiene constantes en toda la serie, la ecuación para el i-ésimo reactor está determinada por:

$$\frac{n_{i-1}}{n_i} = \frac{1+K_A GT/m}{1+K_B \frac{n_0}{n_{i-1}} G^2 T/m} \dots \text{ecuación 33}$$

- m: número de reactores conectadas en serie

En la Tabla 1 se muestra algunos valores de las constantes de agregación y ruptura determinadas por diversos autores para diferentes tipos de partículas presentes en el agua.

**Tabla 1:** Valores de las constantes cinéticas de agregación y ruptura para un tipo de partículas y coagulante, reportado por algunos autores.

Tipo de partícula / Tipo de coagulante	Constantes cinéticas		Autor
	Constante de agregación, $K_A$	Constante de ruptura, $K_B$	
Kaolin / Aluminio	$4.5 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-7}$	Argaman y Kaufman
	$2.5 \times 10^{-4}$	$4.5 \times 10^{-7}$ (*)	Bratby et al.
Partículas naturales / Aluminio	$1.8 \times 10^{-5}$	$0.8 \times 10^{-7}$	Argaman
Limo / Fosfato, pH 11	$5.6 \times 10^{-4}$	$2.4 \times 10^{-7}$	-
Agua de río a 22°C / Aluminio	$4.4 \times 10^{-4}$	$3.0 \times 10^{-7}$	Jin

(\*) Valor promedio, debido a que  $K_B$  varía en función a la gradiente

**Fuente:** Crittenden, J. C., Trushell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., y Tchobanoglous, G. (2012).

Es pertinente indicar que de acuerdo con lo que se define en la ecuación 33, las gradientes en cada compartimiento de un reactor

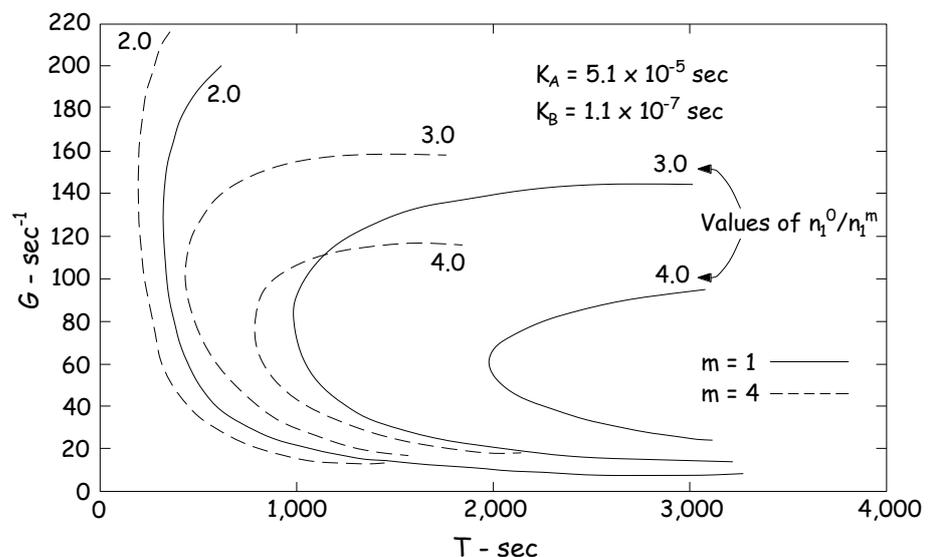
determinado pueden ser diferentes. Para el caso en la que se mantiene una única gradiente en todos los compartimientos, la ecuación que determina el rendimiento total de la floculación está dada por:

$$\frac{n_o}{n_m} = \frac{(1+K_A GT/m)^m}{1+K_B G^2 T/m \sum_{i=0}^{m-1} (1+K_A GT/m)^i} \dots \text{ecuación 34}$$

Es importante entender el efecto de la compartimentalización en la eficiencia de un proceso de floculación, la eficiencia de la floculación en dos más reactores conectados en serie es superior a la eficiencia de una sola unidad, asimismo, reactores conectados en serie requieren menor tiempo que una sola unidad para obtener una misma eficiencia de floculación. La razón por la que reactores conectadas en serie son más eficientes que un solo, es debido a que cuantos más reactores estén conectados en serie, el tipo de flujo se acerca más al flujo tubular.

La Figura 13 muestra el efecto de la compartimentalización de reactores en la eficiencia de la floculación en función de la gradiente, tiempo de floculación y número de reactores.

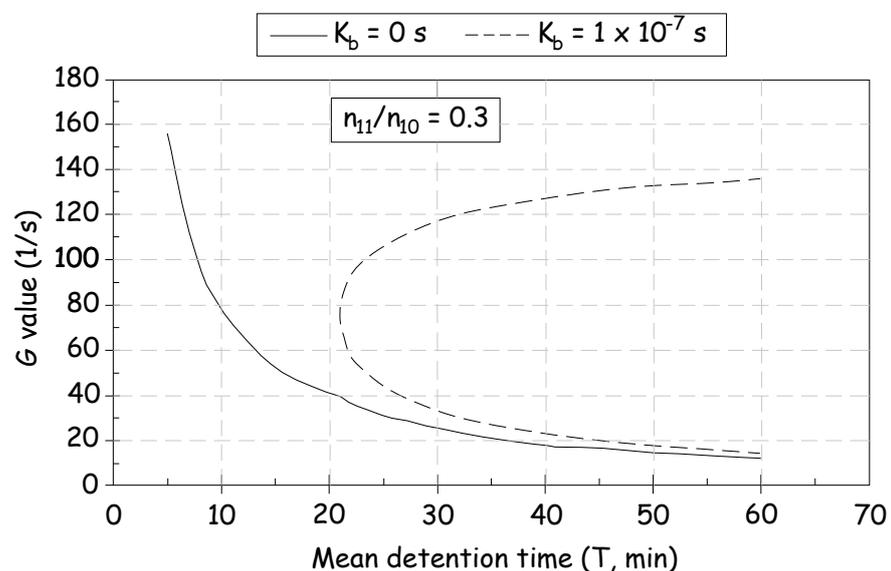
**Figura 13:** Performance de un sistema de floculación en función de la gradiente, tiempo y número de reactores.



**Fuente:** Bratby, J. (2016).

En la Figura 13 se han graficado la eficiencia de floculación para dos condiciones de compartimentalización, la primera para un solo reactor que están con líneas continuas y la segunda para un sistema con cuatro reactores conectadas en serie que están con líneas discontinuas. Se observa que para una misma eficiencia el sistema con cuatro reactores requiere menos tiempo que el sistema de un solo reactor, además se observa que existe un tiempo mínimo debajo del cual no se lleva a cabo el mecanismo de floculación, esto es debido al efecto del mecanismo de ruptura de flóculos cuantificada a través de la constante cinética de ruptura ( $K_B$ ). Por ejemplo, si observamos la Figura 14 en la que el efecto del mecanismo de ruptura de flóculos es insignificante es decir  $K_B=0$ , entonces, la barrera de tiempo mínimo desaparece y no se observa un punto de inflexión en la curva a diferencia que cuando  $K_B$  es significativo.

**Figura 14:** Curvas de performance de floculación que ilustra la significancia del mecanismo de ruptura de flóculos



**Fuente:** Letterman, R., y Yiacoumi, S. (2011).

#### 2.2.4. Determinación experimental de las constantes cinéticas de agregación y ruptura.

De acuerdo con lo mostrado en la sección 2.3.3, el modelo de Argaman y Kaufman que describe la cinética de floculación contiene dos parámetros de importancia, la primera es la constante cinética de agregación, parámetro que define cuan bien las partículas se agrupan para formar floc, el valor de esta constante depende del tipo de agua, tipo de coagulante, pH, dosis y gradiente. Por otra parte, la constante cinética de ruptura define con qué facilidad los flóculos formados se desintegran ya sea por erosión de la superficie de éstas o por colisión entre flocs, para formar partículas primarias, el valor de esta constante también depende de los mismos factores indicados para la constante cinética de ruptura.

En cuanto al procedimiento de determinación de estas dos constantes se han desarrollado algunos procedimientos. “Un método consiste en realizar ensayos en planta piloto de tipo continuo. Sin embargo, esto tiene la desventaja de que se requieren aparatos relativamente complicados y costosos y largos procedimientos de prueba” (Bratby, 2016, p. 327). Por otro lado, se tiene el procedimiento de prueba por lotes o también llamado prueba batch, la ventaja de este procedimiento es que es menos complicado de realizar y no acarrea altos gastos.

El procedimiento en pruebas batch para la determinación de estas constantes fue desarrollado por John Bratby, su modelo parte del modelo desarrollado por Argaman y Kaufman que se estableció en la ecuación 23. Teniendo en cuenta que la constante de agregación está definida por la ecuación 31 y la constante de ruptura definida por la ecuación 30, entonces el modelo de Bratby para la ecuación de floculación en un sistema batch está definido por:

$$\frac{dn_1}{dt} = -K_A n_1 G + K_B n_0 G^2 \dots \text{ecuación 35}$$

Integrando la ecuación 35 en función a  $n$  y  $T$ , se obtiene la siguiente expresión:

$$n_1 = \frac{K_B}{K_A} n_0 G + \frac{n_0 (1 - \frac{K_B}{K_A} G)}{e^{(K_A G T)}} \dots \text{ecuación 36}$$

Reordenando la ecuación 36 de manera tal que se despeje el performance o índice de floculación “ $n_0/n_1$ ”, la ecuación que describe la cinética de la floculación en un proceso batch estará definido por:

$$\frac{n_0}{n_1} = \left[ \frac{K_B}{K_A} G + \frac{(1 - \frac{K_B}{K_A} G)}{e^{(K_A G T)}} \right]^{-1} \dots \text{ecuación 37}$$

En experimentos realizados en pruebas batch se ha visto que la suposición de que tanto  $K_A$  y  $K_B$  son constantes es válido generalmente solo para la constante de agregación, por el contrario, la constante de ruptura puede adoptar un valor ligeramente distinto para cada gradiente analizado. “Debido a la inadecuación del mecanismo de ruptura asumido en los análisis anteriores,  $K_B$  puede asumir un valor constante solo para un valor de  $G$  en particular” (Bratby, 2016, p. 328). Esta circunstancia no resta valor a las relaciones que describen el desempeño de la floculación, ya que la misma variación de la constante de ruptura también ocurre en las pruebas en continuo, es decir en plantas construidas.

Entonces, al ser  $K_B$  una constante que puede variar con el valor de la gradiente de velocidad se relaciona con la gradiente mediante una expresión que puede ser de la siguiente forma:

$$K_B = k_1 \ln(G) + k_2 \dots \text{ecuación 38}$$

- $k_1, k_2$ : constantes que dependen del tipo de agua en estudio

Otros autores han encontrado que la relación entre la gradiente y la constante de ruptura no siempre es de la forma descrita en la ecuación 38, ya que, en otros estudios, se ha encontrado una relación de tipo exponencial entre estas dos variables.

Por otro lado, es necesario comprender y establecer el origen de la gradiente de velocidad cuadrática media y su relación con los

equipos de floculación de laboratorio. Este parámetro es dependiente del tipo de agitador del floculador y a su vez dependiente del tipo de sección y volumen de las jarras que se usan para contener las muestras de agua en el proceso de floculación. Cuando se usa un equipo de floculación de laboratorio, la potencia de agitación impartida a la masa del agua se controla mediante la velocidad de agitación de las paletas que para efectos prácticos se mide mediante un parámetro llamado revoluciones por minuto, RPM, el cual se corresponde con un valor de gradiente de velocidad en función al tipo de agitador, forma y volumen de las jarras.

La característica física de los impulsores, la forma y volumen del reactor, la temperatura del agua, la velocidad de rotación y otros factores, definen el valor de gradiente, G, parámetro que se usa para el diseño de reactores de floculación. “Para evaluar el desempeño de los impulsores, es importante conocer la naturaleza del flujo en el tanque de mezcla, específicamente si el flujo es laminar o turbulento según lo determinado por el número de Reynolds” (Crittenden et al, 2012, p. 615). El número de Reynolds para un floculador de turbina vertical está determinado por la siguiente expresión:

$$Re = \frac{D^2 N \rho}{\mu} \dots \text{ecuación 39}$$

- Re: número de Reynolds, adimensional
- D: diámetro del impulsor, m
- N: velocidad de rotación del impulsor, s<sup>-1</sup>
- ρ: densidad del agua, kg/m<sup>3</sup>
- μ: viscosidad dinámica del agua, N.s/m<sup>2</sup>

Para las turbinas verticales utilizadas en la floculación, la turbulencia total se desarrolla cuando  $Re \geq 10^4$ .

Según Bratby (2016), “La potencia consumida por un dispositivo mezclador giratorio está determinada por su velocidad de rotación y

la geometría del tanque en el que opera” (p. 337). La potencia consumida por un dispositivo de mezcla en un régimen turbulento está definida la siguiente expresión:

$$P=\phi*\rho*N^3*D^5 \dots \text{ecuación 40}$$

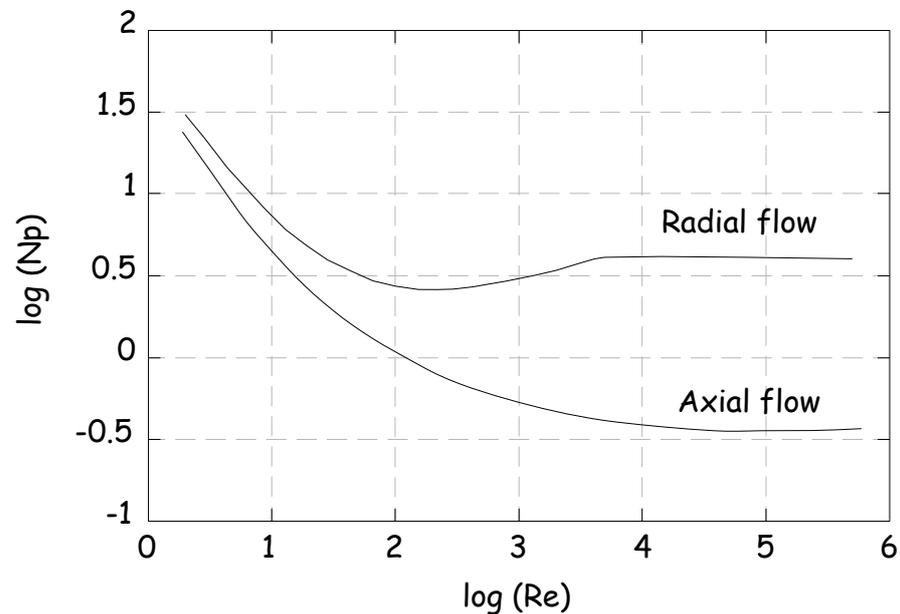
- P: potencia consumida, N.m/s
- $\phi$ : número de potencia, adimensional

El número de potencia,  $\phi$ , es un parámetro que depende específicamente del tipo de agitador y la geometría del tanque. Es de importancia, ya que mediante este parámetro se puede establecer la gradiente de velocidad cuadrática media a partir de la velocidad de rotación del impulsor medido en revoluciones por minuto (rpm) o revoluciones por segundo (rps). Según Bratby (2016):

El concepto de número de potencia es útil porque para una geometría particular de impulsor y tanque, la ampliación de los sistemas piloto a pequeña escala debería ser posible con el mismo número de potencia, si se mantiene la similitud geométrica (p. 338).

Además, el número de potencia es independiente del número de Reynolds cuando el valor de este último es de  $10^4$  o superior. El valor de  $\phi$  está sujeta a variación con respecto al número de Reynolds (cuando Re es menor que  $10^4$ ), es decir de acuerdo con el régimen de flujo, sin embargo, a partir de un cierto valor del número de Reynolds tiende a ser constante. La Figura 15 muestra una gráfica del cambio en la magnitud del número de potencia (nótese que en la figura el número de potencia está representado por  $N_p$ ) en función del número de Reynolds para dos condiciones: un tipo de flujo radial y un tipo de flujo axial.

**Figura 15:** Cambio en la magnitud del número de potencia en función del número de Reynolds en un reactor con baffles.

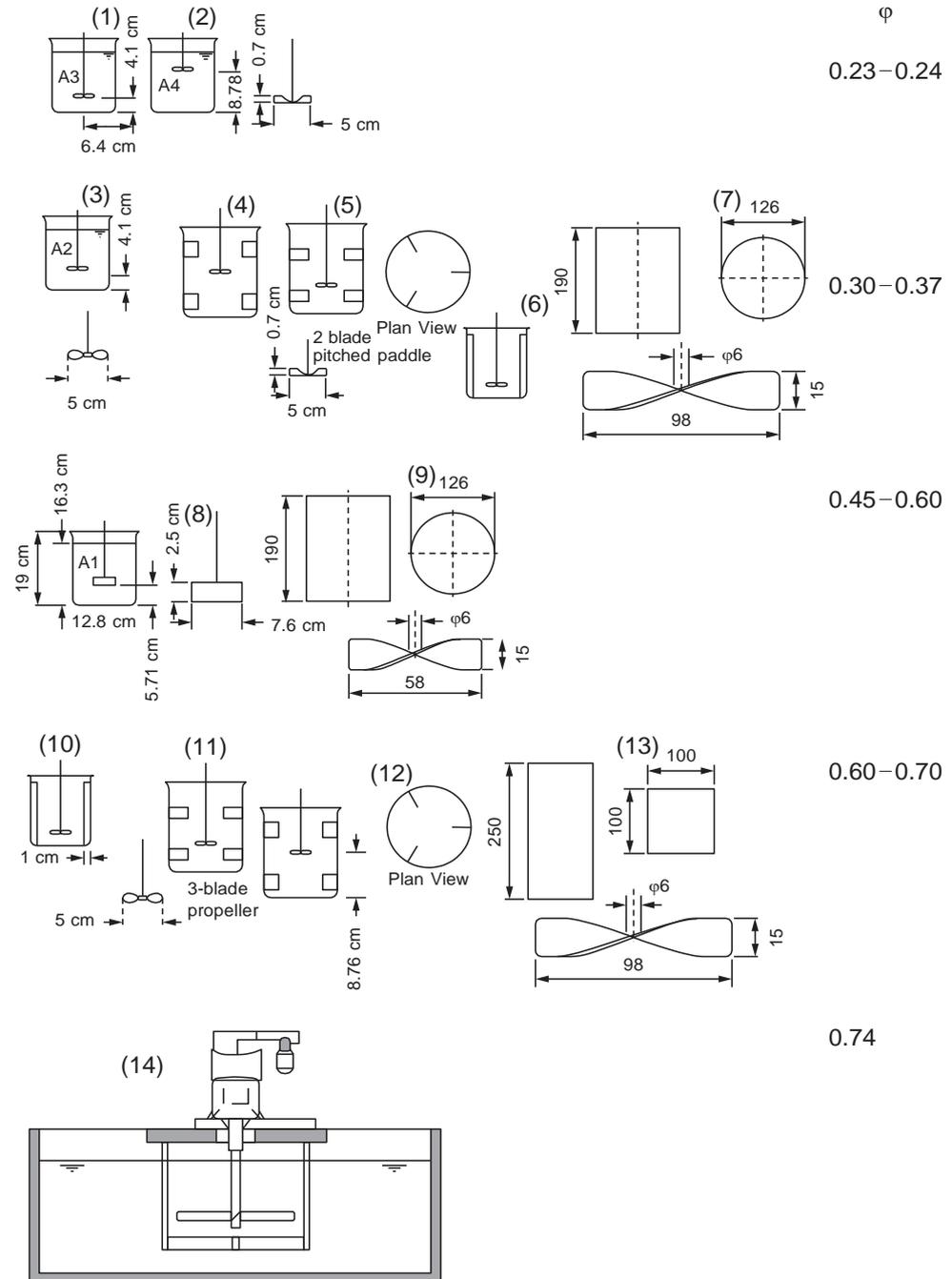


**Fuente:** Crittenden, J. C., Trushell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., y Tchobanoglous, G. (2012).

Se observa en que a partir de un valor de número de Reynolds de 10,000 el valor del número de potencia tiende a ser constante, la mayoría de los procesos de floculación se llevan a cabo en régimen turbulento y en ese sentido se asume que el valor del número potencia es constante durante el proceso.

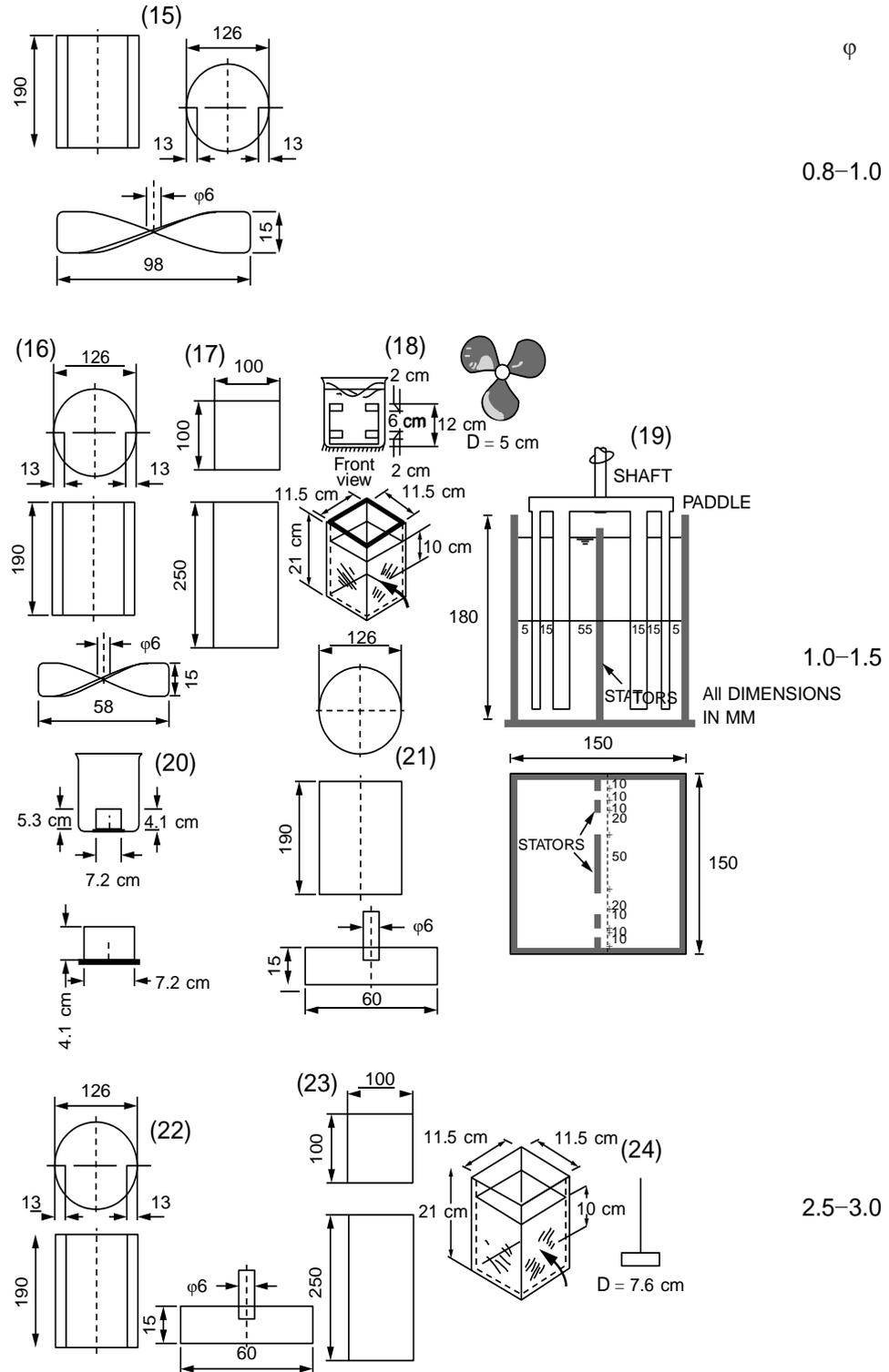
Por otro lado, en la Figura 16, Figura 17 y Figura 18 se muestran una relación de reactores y su forma, impulsores y su forma y un rango del número de potencia para cada configuración de reactor y tipo de impulsor.

**Figura 16:** Reactores de floculación, geometría de los reactores, geometría de impulsores y sus correspondientes rangos de valores del número de potencia ( $1/3$ ).



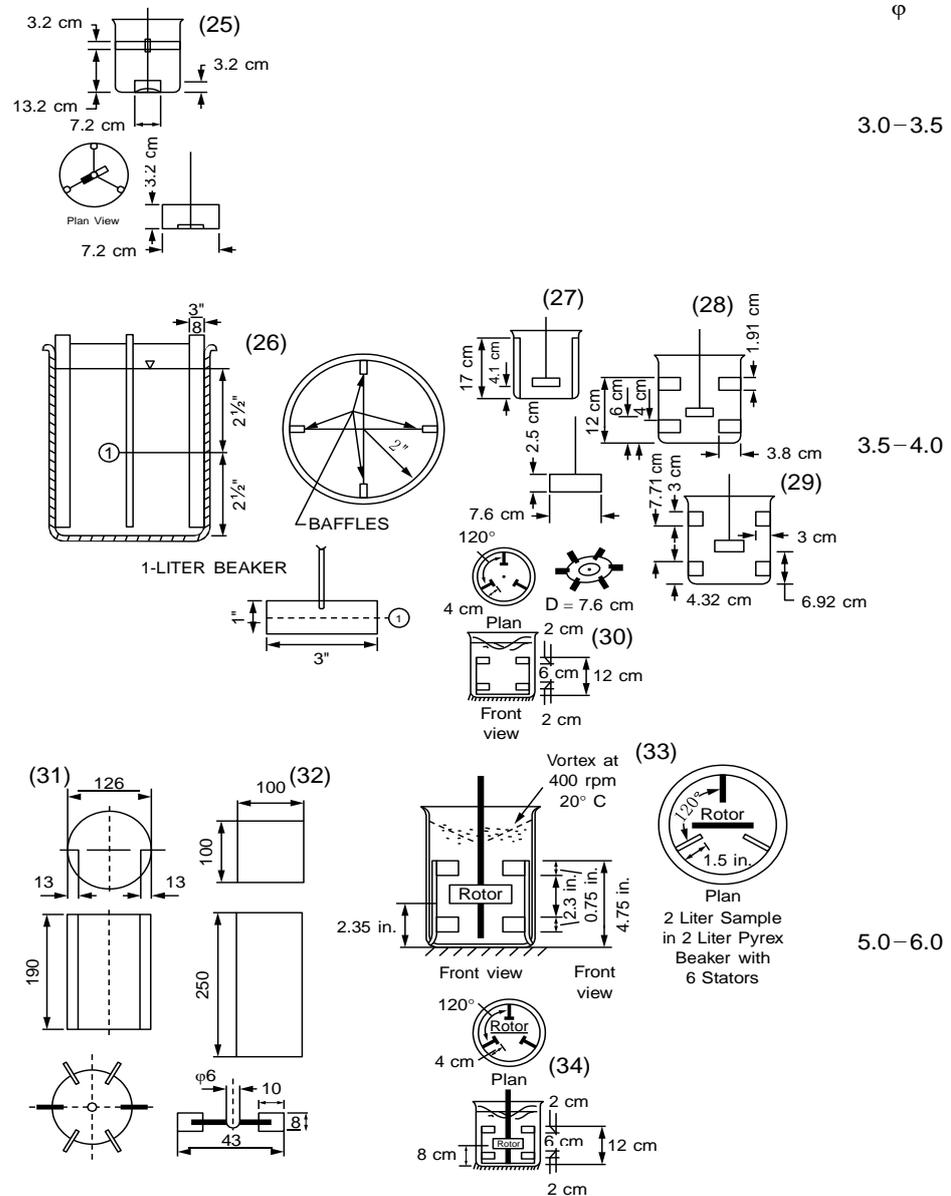
Fuente: Bratby, J. (2016).

**Figura 17:** Reactores de floculación, geometría de los reactores, geometría de impulsores y sus correspondientes rangos de valores del número de potencia (2/3).



Fuente: Bratby, J. (2016).

**Figura 18:** Reactores de floculación, geometría de los reactores, geometría de impulsores y sus correspondientes rangos de valores del número de potencia (3/3).



**Fuente:** Bratby, J. (2016).

Sobre el valor del valor del número de potencia, se ha visto que dicho valor depende de la geometría del reactor y del impulsor. Lozano-Rivas y Lozano (2015) indican que, para una paleta metálica sencilla, como el mostrado en el lado izquierdo de la Figura 19, unida en el medio por eje del rotor, el valor del número de potencia es de 0.96. Con este valor se puede generar la curva que relaciona la gradiente

de velocidad con las RPM en un ensayo de laboratorio con los equipos de floculación que tienen este tipo de impulsores, que, por cierto, los tienen la mayoría de los equipos de floculación de laboratorio.

Además, la gradiente cuadrática media se relaciona directamente con la potencia consumida, indicada en la ecuación 40, la viscosidad dinámica y el volumen del reactor, mediante la siguiente expresión:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} \dots \text{ecuación 41}$$

Dónde:

- V: volumen del reactor, m<sup>3</sup>

Entonces, se intuye que el valor de la gradiente de velocidad dependerá, en un ensayo de laboratorio en específico, del número de potencia, de la densidad del agua, de la velocidad de revolución del agitador, del diámetro del agitador, de la viscosidad dinámica del agua y el volumen del reactor. Asimismo, la densidad y viscosidad dinámica del agua dependen directamente de la temperatura del agua. La densidad del agua puede ser determinada mediante la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{999.83952 + 16.945176(T) - 7.9870401 \times 10^{-3}(T)^2 - 46.170461 \times 10^{-6}(T)^3 + 105.56302 \times 10^{-9}(T)^4 - 280.54253 \times 10^{-12}(T)^5}{1 + 16.879850 \times 10^{-3}(T)} \dots \text{ecuación 42}$$

dónde:

- T: Temperatura del agua

De igual manera, mediante las ecuaciones 43 y 45 se pueden determinar la viscosidad dinámica del agua, para una temperatura en particular, teniendo en cuenta lo siguiente:

Cuando  $0 < T < 20^\circ\text{C}$ ,

$$u = 10^{-3}(10^A) \dots \text{ecuación 43}$$

Dónde:

$$A = \frac{1301}{998.333 + 8.1855(T-20) + 0.00585(T-20)^2} - 1.30223 \dots \text{ecuación 44}$$

Cuando  $20 < T < 100^\circ\text{C}$

$$u = 10^{-3}(10^B) \dots \text{ecuación 45}$$

Dónde:

$$B = \frac{1.002[1.3272(20-T) - 0.001053(T-20)^2]}{T+105} - 1.30223 \dots \text{ecuación 46}$$

Con se indicó anteriormente el concepto de gradiente de velocidad cuadrática media es un concepto delicado ya que es parámetro sumamente sensible, sus valores son aproximaciones a los valores reales, pero que son útiles en los diseños de unidades de floculación. Al respecto, Lozano-Rivas y Lozano (2015) indican que autores como Ruey, Hudson, Singley y Camp realizaron pruebas para determinar las gradientes de velocidad para diferentes tipos de impulsores y deflectores, pero que, en otras pruebas realizadas bajo las mismas condiciones, presentaron diferencias con los valores determinados por los autores en mención. Posiblemente estas diferencias en las medidas se deban por las diferencias en la edad, mantenimiento y el estado de los floculadores de laboratorio y por ligeras deformaciones en las paletas y las distancias de éstas con respecto al fondo de los vasos.

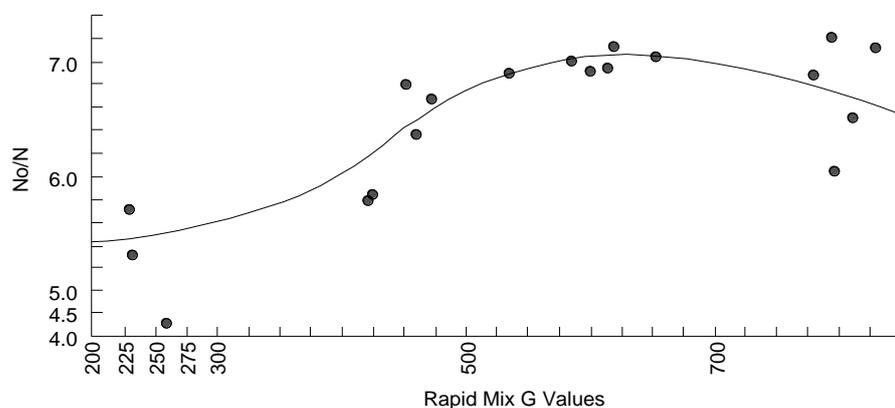
Tendiendo eso en cuenta debe de quedar claro que la conversión de la velocidad de rotación de las paletas, en rpm o en rps, a los correspondientes valores de gradiente de velocidad, G, es una aproximación, pero que para cuestiones de diseño de unidades de floculación y ensayos en laboratorio son de utilidad.

#### **2.2.5. Determinación de las constantes cinéticas de agregación y ruptura en un sistema batch o por lotes.**

Este procedimiento es el establecido por John Bratby y consiste en ensayos batch con una previa optimización de los parámetros de floculación como la gradiente y tiempo de la mezcla rápida, la dosis de coagulante y el pH del ensayo. La optimización previa de los parámetros de floculación en este caso tiene como finalidad determinar las constantes de agregación y ruptura para las mejores condiciones de floculación, es decir, para los parámetros que generen las mejores tasas de floculación. Sin embargo, esto no significa que siempre las constantes cinéticas se determinan para las mejores condiciones, existen muchas investigaciones en las que se determinan estas constantes cinéticas para diversos tipos de coagulante, dosis y gradiente, con la finalidad de investigar el efecto de dichos factores sobre las constantes cinéticas.

La optimización de la gradiente y el tiempo de la mezcla rápida consiste en encontrar justamente la mejor gradiente y tiempo en la fase de la mezcla rápida que genere la mayor performance de floculación, es decir la mejor relación  $No/N$ . El procedimiento, para el caso de la determinación de la gradiente de la mezcla rápida, básicamente consiste en estudiar un rango de valores de gradiente y encontrar el valor que genere el mayor valor de  $No/N$ . La Figura 19 muestra una gráfica de optimización de las gradientes de mezcla rápida en función de la performance de floculación.

**Figura 19:** Optimización de la gradiente de mezcla rápida en función de la performance de floculación  $No/N$ .

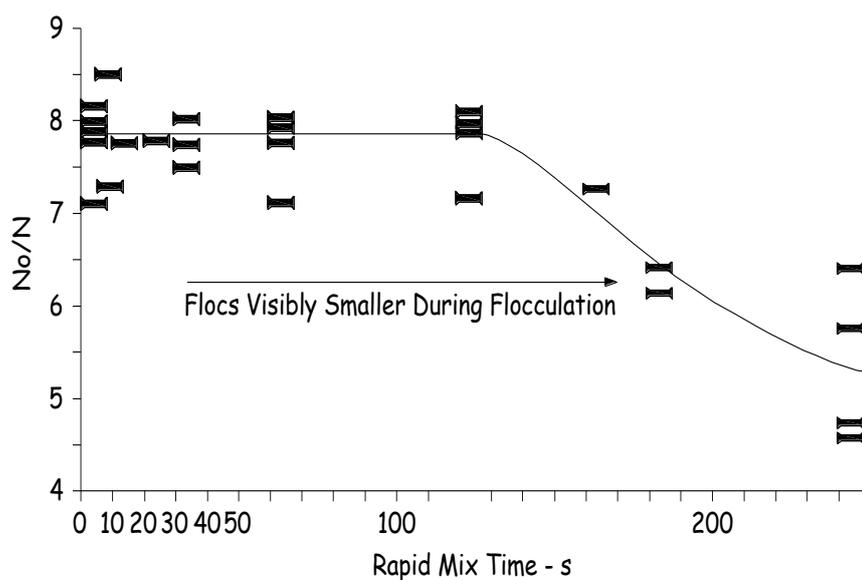


**Fuente:** Bratby, J. (2016).

La optimización que se muestra en la Figura 19 se ha realizado considerando un tiempo arbitrario de mezcla rápida de 60 segundos, una gradiente de floculación de  $24 \text{ s}^{-1}$ , un tiempo de floculación de 30 minutos y un tiempo de sedimentación de 30 minutos. Es importante mencionar que  $N_0$  es la concentración de partículas primarias después de la desestabilización, en un tiempo de floculación  $T=0$  y posterior sedimentación de 30 minutos y  $N$  es la concentración de partículas primarias después de la desestabilización, en un tiempo  $T= 30$  minutos y posterior sedimentación de 30 minutos.

De igual manera, la optimización del tiempo de mezcla rápida consiste en encontrar un tiempo que genere la mejor performance de floculación,  $N_0/N$ . En este caso la gradiente de la mezcla rápida permanece constante y corresponde al determinado previamente en la optimización de la gradiente de la mezcla rápida. En la Figura 20 se muestra una representación de la determinación del tiempo de la mezcla rápida en función del performance de floculación.

**Figura 20:** Optimización del tiempo de la mezcla rápida en función del performance de floculación  $N_0/N$ .



**Fuente:** Bratby, J. (2016).

En la Figura 20 se ha determinado el tiempo óptimo de la mezcla rápida y las condiciones con las que se determinan los valores de  $N_0$  y  $N$  son las mismas que para la optimización de la gradiente de la mezcla rápida.

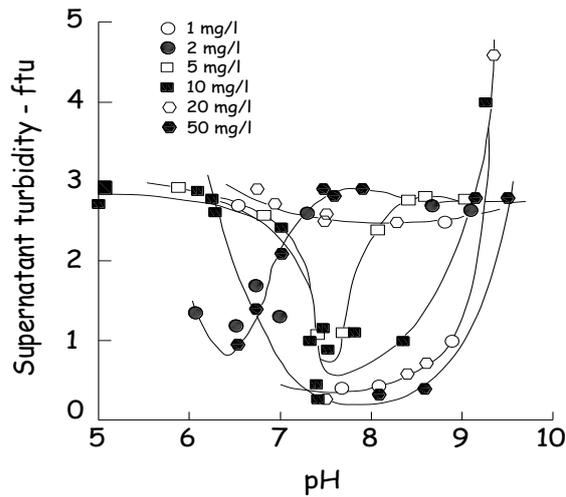
La optimización de la dosis de coagulante y el pH, han sido descritos por varios autores y cada uno de estos procedimientos son muy similares. El primer paso consiste en optimizar el pH y la dosis de coagulante en simultáneo, aplicando a cada uno de estos parámetros las condiciones de mezcla rápida y de floculación ya definidas.

Se lleva a cabo el lote de pruebas con una dosis constante y se dosifica cada muestra con ácido o base para producir un rango de pH de, por ejemplo 4, 5, 6, 7 8 y 9, teniendo en cuenta que el aparato es de seis jarras. Luego se ejecuta mezcla rápida con una gradiente y tiempo determinada en la optimización de la mezcla rápida, y aplicando una dosis establecida de coagulante, luego se reduce la rotación de las paletas a una gradiente establecida para la floculación, se mantiene en agitación lenta por un periodo de entre 10 a 30 minutos, luego de finalizado la floculación se deja reposar las muestras por un período establecido que puede variar entre 15 a 30 minutos que corresponde a la etapa de sedimentación. Concluido la sedimentación se toma una cantidad pequeña de muestra del sobrenadante de cada jarra a una profundidad determinada, usando una pipeta u otro mecanismo, con las muestras extraídas se analizan el parámetro representativo del ensayo que puede ser la turbiedad residual, color, fósforo, u metal residual del coagulante.

En cada lote de pruebas se determina un pH óptimo para una dosis aplicada, entonces, realizando varios lotes de prueba para otras dosis será posible no solo establecer el pH óptimo sino también la dosis óptima. Posteriormente se procede a graficar el pH y la turbiedad residual, por ejemplo, para un rango de dosis evaluado y la gráfica que se genera es como el que se muestra en la Figura 21,

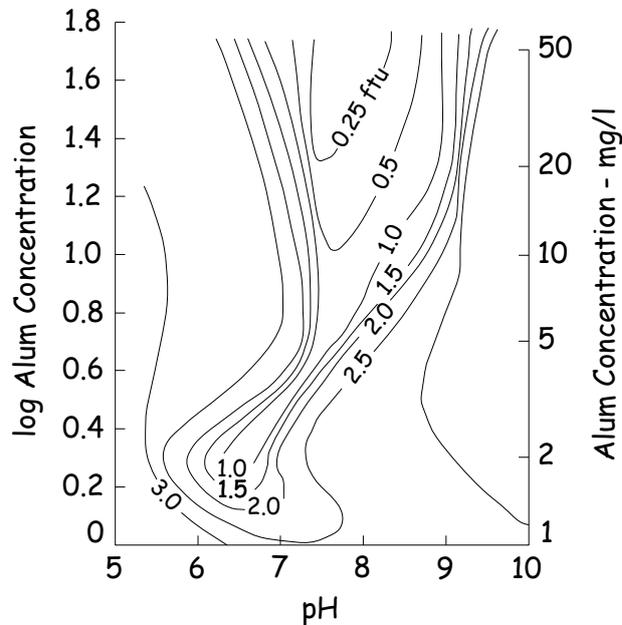
o también se puede graficar el pH vs las dosis de coagulante ensayados mostrando las turbiedades residuales en una gráfica de superficie como el que se muestra en la Figura 22.

**Figura 21:** Gráfica de turbiedad residual vs pH para un rango de dosis de coagulante ensayados.



**Fuente:** Bratby, J. (2016).

**Figura 22:** Gráfica de superficie para dosis de coagulante, pH y turbiedad residual.



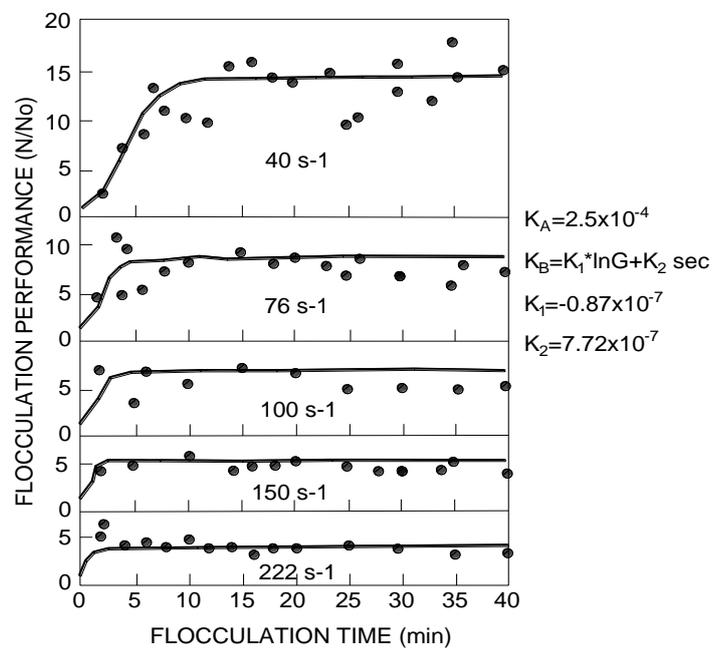
**Fuente:** Bratby, J. (2016).

Una vez establecidas los parámetros óptimos de gradiente y tiempo de la mezcla rápida, dosis de coagulante y pH, se procede a realizar

ensayos de floculación para un rango de gradientes de floculación y cada una de ellas en un rango de tiempos establecidos. Para cada gradiente estudiada se obtendrán datos de turbiedades residuales correspondiente a un tiempo de floculación T, posteriormente se grafican la performance de floculación “No/N” vs tiempos “T” de floculación, para cada gradiente, con los cuales se determina las constantes cinéticas de agregación y ruptura. Cabe recordar, que estas constantes cinéticas determinadas serán para condiciones óptimas, sin embargo, se pueden establecer la dosis, el pH y las gradientes de forma aleatoria y observar el comportamiento de las constantes cinéticas.

Al graficar el performance de floculación “No/N” versus los tiempos de floculación “T” para cada gradiente estudiada, se obtienen gráficos como el que se muestra en la Figura 23.

**Figura 23:** Performance de floculación “No/N” versus tiempos de floculación “T” para unas gradientes G específicas.

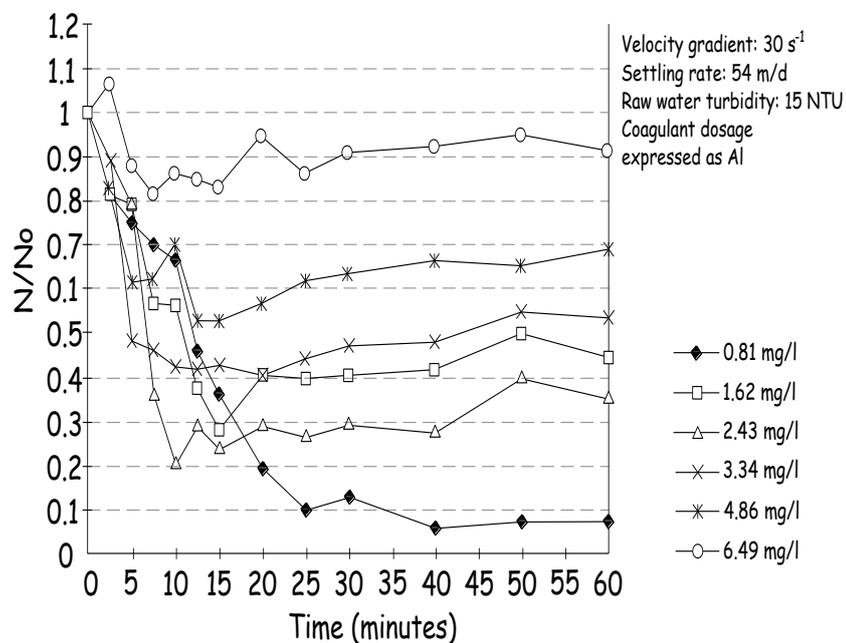


**Fuente:** Bratby, J. (2016).

Sin embargo, otros autores como Filho, Hespanhol y Moreira (2000) sugieren que la performance de floculación en realidad debe de establecerse como “N/No” y no como “No/N”, debido a que la

relación “No/N” genera una mayor dispersión de datos cuando las turbiedades residuales “N” son pequeñas, esto sucede porque una pequeña variación en las mediciones de “N” generan valores con grandes diferencias en la relación “No/N”. Por ejemplo, suponiendo que  $No=10$  NTU y dos mediciones para un mismo “N” correspondiente a un tiempo “T” de floculación determinada arrojan 0.5 NTU y 0.4 NTU, entonces los valores de No/N serán 20 y 25, es decir, una pequeña variación en las mediciones de turbiedades bajas genera una dispersión grande en la performance de floculación, sin embargo, si se utiliza la relación “N/No” los valores del performance de floculación son de 0.05 y 0.04, donde la dispersión se ha amortiguado y es mínima. Cuando se usa la relación “N/No” para la performance de floculación, la gráfica “N/No” vs T es como la que se muestra en la Figura 24.

**Figura 24:** Performance de floculación “N/No” versus tiempos de floculación “T” para diferentes dosis de coagulante.



**Fuente:** Filho, S., Hespanhol, I., y Moreira, H. (2000).

Como se ha indicado líneas arriba, la concentración de partículas primarias para efectos prácticos puede ser medida mediante la

turbiedad. Teniendo en cuenta eso, la ecuación 37 se puede establecer como se muestra en la ecuación 47.

$$\frac{N_0}{N} = \left[ \frac{K_B}{K_A} G + \left( 1 - \frac{K_B}{K_A} \right) G e^{-K_A G T} \right]^{-1} \dots \text{ecuación 47}$$

- $N_0$ : turbiedad residual inicial (o color o concentración de metal, etc) después de la desestabilización y después de la sedimentación, pero en un período  $T=0$  de floculación.
- $N$ : turbiedad residual después de un período  $T$  de floculación y después de la sedimentación.
- $K_A$ : constante de agregación o también llamado constante de floculación.
- $K_B$ : constante de ruptura, s
- $G$ : gradiente de velocidad cuadrática media.

Al parecer hay una variación de la constante cinética de ruptura ( $K_B$ ) con respecto a la gradiente. “Sin embargo, en términos de interpretación de los datos de laboratorio para el diseño, esto no presenta ningún problema ya que la misma variación en  $K_B$  es evidente durante la operación continua” (Bratby, 2016, p. 392). Lo que sugiere que esta particular variación deber ser analizada para cada caso en particular.

Por otro lado, teniendo en cuenta que cuando la tasa de cambio de la concentración de partículas alcanza el equilibrio, es decir toma el valor de cero (0), la ecuación 35 se convierte en:

$$0 = -K_A N G + K_B N_0 G^2 \dots \text{ecuación 48}$$

De dónde:

$$\frac{K_B}{K_A} = \frac{1}{G N_0 / N} \dots \text{ecuación 49}$$

Tomando puntos de la parte horizontal de las curvas, la relación  $K_B/K_A$  se determina de acuerdo con la ecuación 49. Sin embargo, en

datos de laboratorio en la que no es posible generar la parte horizontal considerable, es recomendable optar por la metodología estadística para la determinación de las constantes cinéticas.

Luego, tomando puntos sucesivos de las curvas para cada gradiente, los valores de la constante de agregación  $K_A$ , se determina de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$K_A = \frac{1}{Gt} \ln \left[ \frac{1 - \frac{K_A}{K_B}}{1 - \frac{K_A}{N_0/N \cdot K_B}} \right] \dots \text{ecuación 50}$$

Con los valores calculados de  $K_A$ , para cada punto seleccionado en la curva y para cada gradiente, se determina el valor medio, y a partir de los valores de  $K_A/K_B$ , se determinan los valores de  $K_B$ .

Asimismo, se pueden graficar los valores de  $K_B$  vs las gradientes para verificar si estas dos variables se relacionan y de qué forma se relacionan. En trabajos realizados por Bratby, se ha determinado que esta relación es de la forma como la que se muestra en la ecuación 38. Por ejemplo, los valores de las constantes  $k_1$  y  $k_2$  que los relacionan para un tipo de agua con presencia suspensiones de arcilla de caolín (agua turbia sintética) y usando sulfato de aluminio como coagulante, se muestra en la figura 25.

#### **2.2.6. Metodología estadística para la determinación de las constantes cinéticas de agregación y ruptura en un sistema batch o por lotes.**

El procedimiento estadístico, es el procedimiento de mayor precisión para la determinación de las constantes cinéticas, han sido usados por autores como Dutra (2017), Marques y Ferreira-Filho (2017) y Filho, Hespanhol y Moreira (2000). Su confiabilidad se debe a las complejas ecuaciones estadísticas que usan los programas, tal como el programa Origin, para la determinación del valor de las constantes cinéticas con el menor error posible.

En procedimiento consiste básicamente en ajustar la curva correspondiente a la ecuación en batch del modelo de Argaman y Kaufman y ajustarla a los datos obtenidos mediante el uso de la regresión no lineal. El ajuste de la curva a los datos se realiza por iteración, cada nueva iteración ajusta la curva con mayor precisión a los datos. Al ajustar la curva a los datos, se obtienen los valores de las constantes cinéticas de agregación y ruptura.

Un modelo no lineal general se expresa de la forma siguiente:

$$Y=f(X,\beta)+\varepsilon \dots \text{ecuación 51}$$

- X: variables independientes
- $\beta$ : parámetros
- $\varepsilon$ : error

El programa Origin, cuenta con diferentes algoritmos, que tienen diferentes procedimientos iterativos para ajustar la curva a los datos, entre ellos el algoritmo de mínimos cuadrados. “El algoritmo de mínimos cuadrados consiste en elegir los parámetros que minimizarían las desviaciones de la(s) curva(s) teórica(s) desde los puntos experimentales” (OriginLab Corporation, s.f). Está definido por la expresión:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{Y_i - f(x_i', \beta')}{\sigma_i} \right]^2 \dots \text{ecuación 52}$$

Cuando se desconoce los errores de medición,  $\sigma$  toma el valor de uno (1) para todo  $i$  y el ajuste de la curva se realiza sin ponderación. Sin embargo, cuando se conoce los errores experimentales, se puede tratar estos errores como “ponderaciones” y utilizar un ajuste ponderado. En este caso la expresión 52 se puede reescribir como:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \omega_i [Y_i - f(x_i', \beta')]^2 \dots \text{ecuación 53}$$

- $\omega$ : coeficiente de ponderación

Otro parámetro que se tiene en consideración en una regresión lineal o no lineal es la suma de cuadrados de los errores, RSS. La iteración para el ajuste de curva en la regresión busca minimizar al máximo la RSS y su valor se determina por la siguiente expresión:

$$RSS(X, \hat{\theta}) = \sum_{i=1}^n \omega_i [Y_i - f(x_i', \hat{\theta})]^2 \dots \text{ecuación 54}$$

Para el caso particular en el que se evalúe a la ecuación correspondiente a sistemas batch del modelo de Argaman y Kaufman, se puede notar que los valores correspondientes a los datos observados,  $Y_i$ , serán los valores del performance de floculación N/No y valores correspondientes a los datos predichos por el modelo  $f(x_i', \theta)$ , será la expresión que predice los datos observados, es decir la ecuación  $\left[ \frac{K_B}{K_A} G + \left( 1 - \frac{K_B}{K_A} G \right) e^{-K_A G T} \right]$ , y la ponderación  $\omega_i$  será igual a uno (1).

Por otro lado, el coeficiente de determinación, COD, también simbolizado como  $R^2$  es un parámetro que nos indica que tan bien la curva de ajuste se relaciona con los datos observados. Se determina mediante la siguiente expresión:

$$R^2 = \frac{TSS - RSS}{TSS} = 1 - \frac{RSS}{TSS} \dots \text{ecuación 55}$$

Donde, TSS es la suma total de los cuadrados corregidos y se determina mediante la expresión:

$$TSS = \sum_{i=1}^n [Y_i - \bar{Y}]^2 \dots \text{ecuación 56}$$

### 2.2.7. Procedimiento simplificado para la determinación de las constantes cinéticas de agregación y ruptura en un sistema batch o por lotes.

Un procedimiento simplificado es el que propone Arboleda (2000) para la determinación de las constantes cinéticas de agregación y ruptura. Es un procedimiento se basa en utilizar los datos de tiempos

y gradientes óptimos para obtener los valores de las constantes cinéticas.

El procedimiento parte de la expresión establecida en la ecuación 35, donde la expresión de la izquierda es denominada función de agregación y la expresión de la derecha es denominada función de ruptura, y su representación sería como se muestra a continuación:

Función de agregación:

$$\frac{dN_a}{dt} = -K_A N G \dots \text{ecuación 57}$$

Función de ruptura:

$$\frac{dN_R}{dt} = -K_B N_o G^2 \dots \text{ecuación 58}$$

Luego se procede a utilizar el método diferencial, para determinar las constantes cinéticas, de la siguiente manera:

Para determinar la constante de agregación:

$$\frac{N_o - N}{T_o - T} = -K_A N G \dots \text{ecuación 59}$$

- $N_o$ : turbiedad de agua cruda
- $N$ : turbiedad remanente después de un tiempo de floculación  $T$
- $T_o$ : tiempo de inicio de floculación, es decir, cero (0)
- $T$ : tiempo  $T$  de floculación

Para determinar la constante de ruptura:

$$\frac{N}{T_o - T} = -K_B N_o G^2 \dots \text{ecuación 60}$$

Es un procedimiento de determinación aproximada, sin embargo, el procedimiento estadístico sigue siendo la metodología de mayor confiabilidad.

### 2.2.8. Aplicación práctica de las constantes cinéticas de agregación y ruptura.

Las constantes cinéticas de agregación y ruptura determinadas para un agua en particular y para condiciones de pH y dosis determinadas pueden ser usadas para estudiar el comportamiento de un reactor de mezcla completa y flujo continuo (CSTR) para diversas condiciones de compartimentalización y gradiente. Según Akinmolayan (2017), “La formación de flóculos a través de una mezcla rápida ocurre en un CSTR, donde el gradiente de velocidad juega un papel importante en la cantidad de flóculos formados” (p. 78).

El balance de masa de partículas primarias para un CSTR en serie produce en estado estacionario la siguiente expresión:

$$Qn_{i-1}-Qn_i-K_{Ai}n_iG_iV+K_{Bi}n_oG_i^2V=0 \dots \text{ecuación 61}$$

Donde Q es el caudal de agua;  $n_{i-1}$  y  $n_i$  son las concentraciones de partículas primarias en la cámara (i-1)th e ith, respectivamente; V es el volumen de la cámara de floculación (igual para todas las cámaras).

Teniendo en cuenta que el tiempo de retención hidráulica en cada unidad se obtiene con la relación V/Q, la ecuación 61 queda definida como:

$$n_{i-1}-n_i-K_{Ai}n_iG_it+K_{Bi}n_oG_i^2t=0 \dots \text{ecuación 62}$$

Dividiendo la ecuación por  $n_i$ , se tiene:

$$\frac{n_{i-1}}{n_i}-1-K_{Ai}G_it+K_{Bi}\frac{n_o}{n_i}G_i^2t=0 \dots \text{ecuación 63}$$

Multiplicando  $\frac{n_o}{n_i}$  por  $\frac{n_{i-1}}{n_{i-1}}$  la ecuación, se tiene:

$$\frac{n_{i-1}}{n_i}-1-K_{Ai}G_it+K_{Bi}\frac{n_o}{n_i}\frac{n_{i-1}}{n_{i-1}}G_i^2t=0 \dots \text{ecuación 63}$$

$$\left(1+\frac{n_o}{n_{i-1}}K_{Bi}G_i^2t\right)\frac{n_{i-1}}{n_i}=1+K_{Ai}G_it \dots \text{ecuación 64}$$

Para valores de gradiente que varían en m compartimientos en serie, la expresión queda definido como:

$$\frac{n_{i-1}}{n_i} = \frac{1 + K_{Ai} G_i \frac{T}{m}}{1 + \frac{n_0}{n_{i-1}} K_{Bi} G_i \frac{T}{m}} \dots \text{ecuación 65}$$

La ecuación 65 es la misma que se indica en la ecuación 33, solo que en esta sección se ha detallado el balance de masa que da lugar a dicha expresión. Además, cabe recordar que para el caso en la que la gradiente permanece constante en cada cámara, se emplea la expresión indicada en la ecuación 34.

La forma de trabajar con la ecuación 65 es que se determina para cada cámara (compartimiento) la eficiencia para una gradiente y tiempo determinado. Para la primera cámara la eficiencia determinada será:  $\frac{n_0}{n_1}$ ; debido a que solo hay partículas primarias en el sistema, el resultado de la primera cámara se utiliza para la segunda cámara y la eficiencia determinada será en la segunda cámara será  $\frac{n_1}{n_2}$ , para la tercera cámara será necesario usar el valor de  $\frac{n_0}{n_2}$ , para ello se multiplica la eficiencia de la primera y segunda cámara, es decir,  $\frac{n_0}{n_2} = \frac{n_0}{n_1} * \frac{n_1}{n_2}$ , y la eficiencia determinada en la tercera cámara será  $\frac{n_2}{n_3}$ . Se procede de igual forma para el resto de las cámaras sucesivas.

La eficiencia total en el reactor conformado por m cámaras se determina con la siguiente expresión:

$$\prod_{i=1}^m \left( \frac{n_{i-1}}{n_i} \right) = \frac{n_0}{n_1} * \frac{n_1}{n_2} * \frac{n_2}{n_3} * \dots * \frac{n_{i-1}}{n_i} = \frac{n_0}{n_m} = R \dots \text{ecuación 66}$$

Dónde:

- R: eficiencia total del reactor conformado por m cámaras.

Para expresar la eficiencia total en porcentaje, basta con emplear la siguiente ecuación:

$$E = \left( 1 - \frac{1}{R} \right) * 100\% \dots \text{ecuación 67}$$

Un estudio desarrollado por Moruzzi y de Oliveira (2012), para el estudio del comportamiento de reactores de floculación con una y varias cámaras con muestras de agua con pH de 7.7 y turbiedad de 27 NTU, simularon el comportamiento de un reactor CSTR con 1 a 5 compartimientos para lograr una eficiencia de  $R=10$ , es decir una eficiencia de 90% expresada en porcentaje. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Valores requeridos de tiempo para un reactor en serie con  $m$  cámaras y obtener una eficiencia de 90% ( $R=10$ ).

$m$	Gradiente ( $s^{-1}$ )	T (min)
1	30	136.24
2	40/30	56.21
3	60/30/20	30.15
4	60/30/30/20	22.51
5	50/40/20/20/20	16.96

**Fuente:** Moruzzi y de Oliveira (2012).

Se observa que en la simulación realizada determinaron que cuanto mayor es el número de compartimientos, el tiempo requerido para lograr una eficiencia determinada es menor.

## 2.3. Definición de términos básicos

### 2.3.1. Constante cinética de agregación.

“La agregación de las partículas primarias y pequeños flóculos para formar flóculos más grandes, esta agregación se caracteriza por la constante  $K_A$  conocida como constante de agregación” (Sekiou y Kellil, 2009, p. 891).

### 2.3.2. Constante cinética de ruptura

“La erosión y la fragmentación de los flóculos, este estado se caracteriza por la constante  $K_B$  conocida como constante de ruptura” (Sekiou y Kellil, 2009, p. 892).

### **2.3.3. Coagulantes metálicos**

“Sales metálicas como el sulfato de aluminio y el cloruro férrico que se hidrolizarán, formando especies mononucleares y polinucleares de carga variable. Cuando se agregan en exceso, los coagulantes metálicos forman precipitados químicos” (Crittenden et al, 2012, p. 543).

### **2.3.4. Dosis de coagulante**

“El tipo y la dosis de coagulantes a utilizar en los clarificadores dependen de la calidad del agua cruda y de las condiciones ambientales” (Illangasinghe et al., 2018, p. 28).

### **2.3.5. Floculación**

“Agregación de partículas desestabilizadas en masas más grandes que son más fáciles de eliminar del agua que las partículas originales” (Crittenden et al, 2012, p. 542).

### **2.3.6. Gradiente de velocidad**

“Esfuerzo cortante entre dos capas de fluido con velocidades diferenciales. La viscosidad de cizallamiento viene dada por la relación entre el esfuerzo de cizallamiento y el gradiente de velocidad transversal” (Laung, 2001).

### **2.3.7. Mezcla rápida**

“La mezcla rápida se refiere a esa etapa en el proceso general de coagulación-floculación en la que se agregan productos químicos coagulantes a la corriente que se va a tratar (Bratby, 2016, p. 293).

### **2.3.8. Movimiento browniano**

“Es el movimiento aleatorio de una partícula o molécula de soluto debido a la energía interna de las moléculas en el fluido. Como resultado de esta energía térmica interna, todas las moléculas están en constante movimiento” (Crittenden et al, 2012, p. 396).

### **2.3.9. Número de potencia**

“El número de potencia es una función del número de Reynolds y es constante para el número de Reynolds mayor que 10,000” (Hall, 2012, p. 261).

#### **2.3.10. Número de Reynolds**

“El número de Reynolds es un número adimensional que se utiliza para categorizar los sistemas de fluidos en los que el efecto de la viscosidad es importante para controlar las velocidades o el patrón de flujo de un fluido” (Rehm et al., 2008, p. 59).

#### **2.3.11. Partículas primarias**

“Una distribución de tamaño de partícula bimodal donde las partículas más pequeñas en la distribución provienen del afluente y se denominan partículas primarias” (Letterman y Yiacoumi, 2011).

#### **2.3.12. pH**

“El pH de un líquido es una medida cuantitativa de la acidez del medio y está determinada cuantitativamente por la concentración de iones de hidrógeno libres” (Bagchi, 2013, p. 71).

#### **2.3.13. Prueba de jarras**

“Procedimiento para estudiar el efecto de la adición de coagulantes al agua; se utiliza para determinar las dosis requeridas y las condiciones operativas para una coagulación y floculación eficaces” (Crittenden et al, 2012, p. 543).

#### **2.3.14. Reactor batch o por lotes**

“Reactor en el que se introducen los reactivos y se permite que las reacciones prosigan sin entradas o salidas adicionales del reactor durante el período de reacción” (Crittenden et al, 2012, p. 288).

#### **2.3.15. Reactor de flujo continuo y mezcla completa**

“Un reactor de flujo ideal en el que los contenidos se mezclan continuamente y son completamente homogéneos; no existe

variación en la concentración u otra condición de un lugar a otro en el reactor” (Crittenden et al, 2012, p. 288).

### **2.3.16. Turbiedad**

“La turbiedad es la medida de la intensidad de la luz transmitida a través de una muestra líquida. La turbidez está directamente relacionada con la cantidad de partículas en suspensión y con su tamaño medio” (Simon et al., 2018, p. 219).

## CAPÍTULO III

### III. MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. Tipo de investigación

El tipo de estudio de la presente investigación es explicativo y están dirigidos a responder por las causas de los eventos y fenómenos físicos o sociales. Según Hernández et al. (2014), “Como su nombre lo indica, su interés se centra en explicar por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se manifiesta o por qué se relacionan dos o más variables” (p. 95).

#### 3.2. Diseño de la investigación

El diseño de la presente investigación es un “Diseño Factorial”. El diseño factorial en una investigación se usa para analizar el efecto que una o más variables independientes tienen sobre una o más variables dependientes. Según Hernández et al. (2014), “Los diseños factoriales manipulan dos o más variables independientes e incluyen dos o más niveles o modalidades de presencia en cada una de las variables independientes. Se utilizan muy a menudo en la investigación experimental” (p. 148). “La preparación básica de un diseño factorial consiste en que todos los niveles o modalidades de cada variable independiente son tomados en combinación con todos los niveles o modalidades de las otras variables independientes” (Hernández et al., 2014, p. 148). Asimismo, según Walpole et al. (2011), “El término factor se utiliza en un sentido general para denotar cualquier característica del experimento que pueda variar de un ensayo a otro” (p. 561).

En la presente investigación se adoptó un diseño factorial de cuatro (04) factores: Tipo de coagulante con dos (02) niveles, pH con dos (02) niveles, dosis de coagulante con tres (03) niveles y gradiente de floculación con tres (03) niveles, además el diseño factorial consta de dos (02) réplicas.

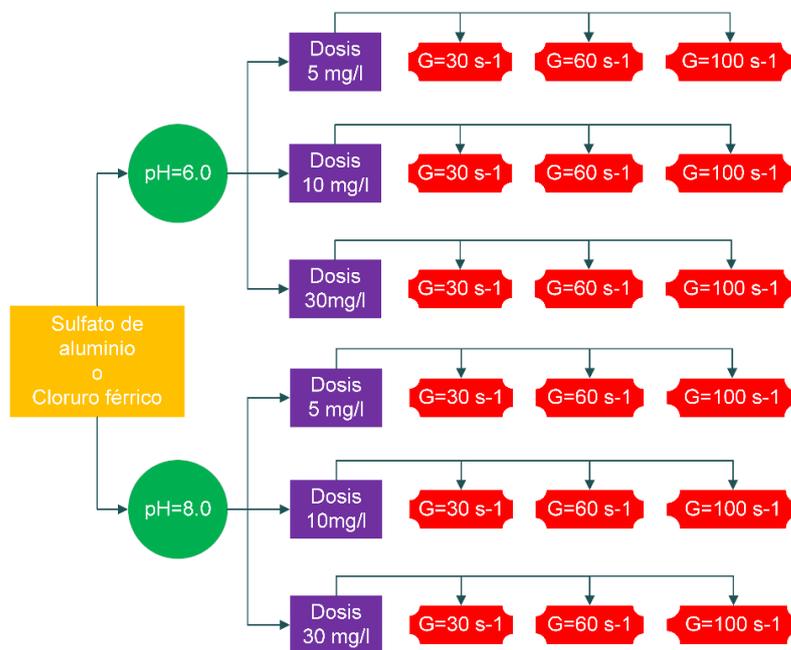
Se eligieron las variables Tipo de coagulante, pH, dosis y gradiente debido a que los primeros son los compuestos químicos que se requieren para iniciar el proceso de la desestabilización de las partículas primarias; se usaron sulfato de aluminio y cloruro férrico porque son dos de los coagulantes metálicos recomendados por la AWWA en la tratabilidad del agua. Las variables pH, dosis y gradiente son parámetros de floculación que influyen directamente en el comportamiento de la cinética de floculación de un agua en particular, por ejemplo, el pH es una variable cuya variación puede catalizar o inhibir la desestabilización de partículas del agua, en ese sentido al usar dos niveles de dichas variables con valores de 6.0 y 8.0, lo que se quiere evaluar es, si en condición acida o en condición básica las tasas de agregación o ruptura son más favorables o menos favorables.

Por otro lado, la dosis es otra variable que está directamente relacionada a un volumen de coagulante extraída de una solución a una concentración dada que añadidos a un beaker de volumen conocido representa una dosis e influye directamente en la etapa de desestabilización de las partículas primarias; se eligieron tres niveles para dicha variable: 5, 10 y 30 mg/l que representan dosis baja, media y alta, con la finalidad de determinar en qué rango se producen las tasas de agregación más altas que definen la constante cinética de agregación. Finalmente, con respecto a la gradiente se eligieron tres niveles: 30, 60 y 100  $s^{-1}$ , que representan gradiente baja, media y alta, con la finalidad de determinar en qué rango de esta variable se producen las mejores tasas de agregación y tasas de ruptura más pequeñas, además esta variable permitió estudiar el comportamiento del reactor CSTR en diversas condiciones y en función de las constantes cinéticas.

En ese sentido, la determinación de los niveles de las variables que condicionaron la obtención de las mejores tasas de agregación y pequeñas tasas de ruptura, permitieron estudiar el comportamiento del reactor CSTR para diversas condiciones de gradiente, la cinética de floculación de las aguas del río Marcará, en condiciones más favorables.

La representación gráfica del diseño factorial de la presente investigación es como se muestra en la Figura 25 y en la Tabla 3.

**Figura 25:** Representación gráfica del diseño factorial de la investigación.



**Nota.** Cada nivel de una variable independiente interactúa con cada uno de los niveles de las otras variables independientes.

**Fuente:** Propio.

**Tabla 3:** Tabla del diseño factorial de la investigación.

		B																	
		1									2								
A		C									C								
		1			2			3			1			2			3		
		D			D			D			D			D			D		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	y <sub>11111</sub>	...	y <sub>11131</sub>	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	y <sub>12311</sub>	...	y <sub>12331</sub>	
	y <sub>11112</sub>	...	y <sub>11132</sub>	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	y <sub>12312</sub>	...	y <sub>12332</sub>	
2	y <sub>21111</sub>	...	y <sub>21131</sub>	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	y <sub>22311</sub>	...	y <sub>22331</sub>	
	y <sub>21112</sub>	...	y <sub>21132</sub>	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	y <sub>22312</sub>	...	y <sub>22332</sub>	

**Nota.** A, B, C y D son los factores, es decir las variables independientes que tienen dos o más niveles, los cuales están representados por los números, asimismo, las variables de respuesta están representadas por "y", cuyos subíndices indican la interacción de los niveles de los factores que dio lugar a dicha variable de respuesta, por ejemplo, y<sub>22312</sub>, indica que es la variable de respuesta para la interacción de los niveles 2, 2, 3 y 1 de los

factores A, B, C y D en ese orden, y el último número, 2, indica que corresponde a la segunda réplica.

**Fuente:** Adaptado de Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., y Ye, K. (2011).

Dónde:

- Factor A: Tipo de coagulante, con a =2 niveles
- Factor B: pH, con b=2 niveles
- Factor C: Dosis de coagulante, con c=3 niveles
- Factor D: Gradiente de floculación, con d=3 niveles
- $y_{11111}$ : variable de respuesta de la interacción de los niveles 1, 1, 1 y 1 de los factores A, B, C y D en la primera réplica. Se lee de forma análoga para el resto.
- $y_{11112}$ : variable de respuesta de la interacción de los niveles 1, 1, 1 y 1 de los factores A, B, C y D en la segunda réplica. Se lee de forma análoga para el resto.

### 3.3. Métodos o técnicas

En la presente investigación la metodología utilizada durante el proceso de trabajo de campo, experimentación en laboratorio y trabajos de gabinete, fueron como se indica a continuación:

Como primer paso, se seleccionó el río con cuyas aguas se realizaron los ensayos, en este caso el río Marcará. Para cada ensayo se recolectó 36 L de muestra de agua desde un punto ubicado en las coordenadas UTM WGS84 216411.85, 8968642.72. La recolección de las muestras se realizó en dos bloques, de acuerdo con el diseño factorial indicado en la Tabla 3. El primer bloque abarcó los muestreos en los meses de marzo y abril de 2021 y el segundo bloque abarcó los meses de mayo y junio de 2021. En cada bloque se realizaron 12 muestreos, es decir, 24 muestreos en total.

En segundo lugar, con cada muestra recolectada se realizaron ensayos en el laboratorio. Los ensayos consistieron en experimentar con un diseño factorial de cuatro (04) factores cuyas interacciones de sus

correspondientes niveles fueron definidas por aleatorización, es decir la interacción de los niveles de cada uno de los factores se asignaron al azar, esto procedimiento se llevó a cabo usando la herramienta “Diseño de Experimentos - DOE” del programa Minitab. “La asignación aleatoria elimina el sesgo que podría originarse con una asignación sistemática. El objetivo consiste en distribuir en forma uniforme entre los niveles de los factores los riesgos que introduce la heterogeneidad de las unidades experimentales” (Walpole et al., 2011, p. 509). En esta investigación se trabajaron con un diseño factorial de cuatro (04) factores, de los cuales, el primer factor corresponde a la variable tipo de coagulante, y los tres factores restantes corresponden a las variables pH, dosis y gradiente. Teniendo eso en cuenta, el diseño factorial y sus respectivos niveles se establecieron como se indica a continuación:

- Factor A: Tipo de coagulante, con a = 2 niveles
  - Nivel a1: Sulfato de aluminio (S.A)
  - Nivel a2: Cloruro férrico (C.F)
- Factor B: pH, con b = 2 niveles
  - Nivel b1: 6.00
  - Nivel b2: 8.00
- Factor C: Dosis de coagulante, con c = 3 niveles
  - Nivel c1: 5 mg/l
  - Nivel c2: 10 mg/l
  - Nivel c3: 30 mg/l
- Factor D: Gradiente de floculación, con d = 3 niveles
  - Nivel d1: 30 s<sup>-1</sup>
  - Nivel d2: 60 s<sup>-1</sup>
  - Nivel d3: 100 s<sup>-1</sup>

Una vez identificadas los factores y los niveles de cada uno de ellos, se procedió a la asignación aleatoria de la interacción de los niveles que se usaron en cada tratamiento, para ello se hizo uso de la herramienta “Diseño Factorial Completo General” del programa Minitab, quedando definido el diseño factorial aleatorizado como se muestran en la Tabla 4 y Tabla 5

**Tabla 4:** Resumen del diseño factorial.

Factores:	4	Réplicas:	2
Corridas base:	36	Total de corridas:	72
Bloques base:	1	Total de bloques:	2

**Fuente:** Propio

**Tabla 5:** Tabla de diseño aleatorizado de la interacción de cada uno de los niveles de los factores.

Orden corrida	T.C	pH	D	G	Orden corrida	T.C	pH	D	G
1	C.F	6	10	30	37	S.A	6	5	30
2	S.A	6	10	30	38	S.A	6	30	60
3	S.A	6	5	100	39	S.A	8	5	60
4	C.F	8	10	60	40	C.F	8	30	30
5	C.F	8	30	60	41	C.F	6	5	100
6	S.A	6	5	60	42	C.F	8	30	100
7	S.A	8	5	30	43	C.F	6	5	60
8	C.F	8	5	30	44	S.A	8	10	100
9	C.F	8	5	60	45	C.F	8	5	60
10	S.A	8	10	60	46	C.F	6	10	30
11	S.A	8	5	60	47	S.A	6	5	60
12	S.A	6	10	60	48	S.A	8	30	60
13	C.F	6	10	60	49	C.F	6	30	30
14	S.A	8	30	100	50	C.F	6	30	100
15	C.F	8	5	100	51	C.F	6	10	60
16	C.F	8	10	30	52	S.A	8	10	30
17	S.A	6	10	100	53	S.A	8	30	30
18	S.A	8	30	30	54	S.A	6	10	100
19	S.A	6	30	60	55	S.A	6	30	30
20	S.A	8	10	100	56	S.A	6	10	60
21	S.A	6	30	30	57	C.F	8	10	100
22	C.F	6	30	100	58	C.F	8	10	30
23	C.F	6	5	30	59	C.F	8	10	60
24	S.A	8	5	100	60	C.F	8	30	60
25	S.A	8	30	60	61	S.A	8	5	100
26	C.F	6	30	60	62	S.A	8	5	30

27	S.A	8	10	30	63	S.A	8	10	60
28	C.F	8	30	30	64	C.F	8	5	30
29	C.F	6	30	30	65	C.F	6	10	100
30	S.A	6	5	30	66	C.F	6	5	30
31	C.F	8	10	100	67	S.A	6	10	30
32	C.F	8	30	100	68	C.F	6	30	60
33	C.F	6	5	100	69	S.A	8	30	100
34	C.F	6	5	60	70	S.A	6	5	100
35	S.A	6	30	100	71	S.A	6	30	100
36	C.F	6	10	100	72	C.F	8	5	100

**Nota. (1)** T.C: Tipo de coagulante, D: Dosis, G: Gradiente, S.A: sulfato de aluminio, C.F: Cloruro férrico. **(2)** El procedimiento de aleatorización realizado en el programa Minitab se muestra a detalle en el anexo.

**Fuente:** Propio.

Cabe mencionar que cada ensayo de laboratorio incluyó 3 corridas experimentales, siguiendo estrictamente el orden de corrida definida en la aleatorización para ambos bloques.

En tercer lugar, con respecto a los ensayos, se inició preparando una solución stock de los coagulantes a partir del sulfato de aluminio y cloruro férrico comerciales, cuyas propiedades físicas y químicas y porcentaje de pureza proporcionadas por el fabricante, se muestran adjuntas en el anexo.

Las concentraciones usadas para la solución stock, en ambos casos fueron de 10,000 mg/l o 1% (expresada en porcentaje), para lograr esto, se pesó en una balanza de precisión 1 g de sulfato de aluminio y se disolvió con agua destilada hasta completar 100 ml de solución en una fiola aforada, y en el caso del cloruro férrico, se diluyó 2.5 ml del compuesto concentrado al 40% en agua destilada hasta completar 100 ml de solución en una fiola. Luego, a partir de la solución preparada se determinaron los volúmenes para las tres (03) dosis establecidas, mediante la siguiente expresión:

$$v=V*D/C \dots \text{ecuación 61}$$

- v: volumen de solución stock a usar, ml
- V: volumen de la jarra, ml

- D: dosis deseada, mg/l
- C: concentración de solución stock, mg/l

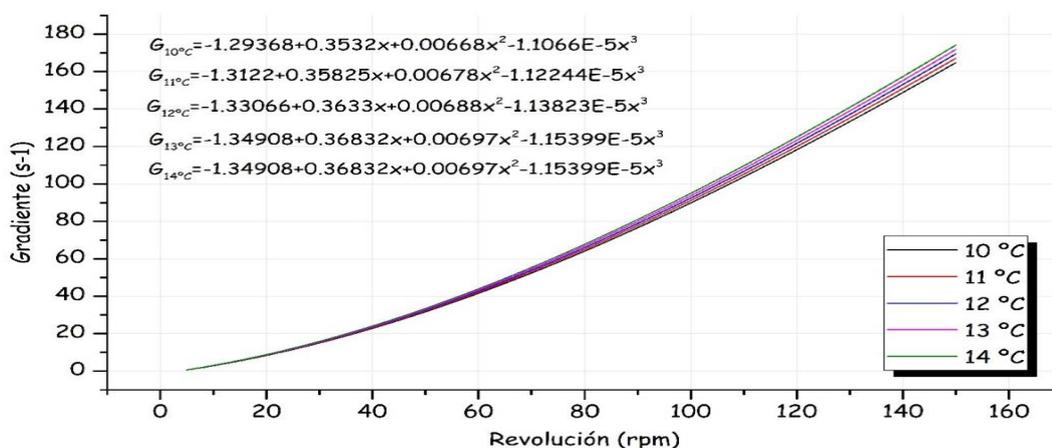
En ese sentido, los volúmenes fueron de 0.50 ml, 1.00 ml y 3.00 ml para 5 mg/l, 10 mg/l y 30 mg/l de dosis respectivamente.

Una vez preparada las soluciones stock, se procedió a realizar los ensayos de floculación para la determinación de los constantes cinéticas de agregación y ruptura. Para ello, los trabajos de laboratorio fueron como sigue: a) se inició midiendo la turbiedad, temperatura y pH del agua, con respecto al pH de acuerdo con el valor inicial medido, se procedió a corregirlo a un valor correspondiente al valor necesario establecida en la Tabla 5, adicionando para ello HCl 0.1 N o NaOH 0.1 N, según corresponda. b) Luego de haber establecido el pH deseado, se prosiguió con la determinación del valor de “No”, para ello, en una jarra con la muestra con pH corregido, se realizó la mezcla rápida, empleando una revolución máxima de 300 rev/min del equipo, por un tiempo de 30 s, empleando el tipo de coagulante y la dosis establecida al número de corrida indicada en la Tabla 5, culminada la mezcla rápida, la muestra se dejó sedimentar inmediatamente por un tiempo de 20 min, posteriormente se midió la turbiedad, esta medición representa el valor del número de concentración de partículas primarias en T=0 es decir “No”. c) Después, se procedió con la determinación del valor de “N”, realizando para ello ensayos de floculación en serie, en ese sentido, se inició con la mezcla rápida o etapa de desestabilización de partículas en las seis (06) jarras, empleando una gradiente y tiempo de mezcla rápida igual a la etapa anterior; usando un tipo de coagulante, un pH y una dosis correspondiente al número de corrida correspondiente al número de ensayo (como lo indicada en la Tabla 5). Luego de realizado la mezcla rápida, se redujo la revolución a un valor de gradiente correspondiente al número de corrida determinado; en esta etapa se emplearon tiempos de floculación de 5 min, 10 min, 15 min, 20 min, 30 min y 40 min. Posteriormente, culminado cada tiempo de floculación se dejó sedimentar las muestras por un tiempo de 20 min. Luego, se midió la turbiedad de las muestras sedimentadas a profundidad de 5 cm medidos desde la superficie del agua, para lo cual, se empleó un tubo capilar

de 3 mm de diámetro sumergido mediante una sección circular de poliestireno, y en la parte superior del tubo capilar se conectó un tubo flexible de latex de 40 cm de longitud y 4 mm de diámetro provisto en su extremo inferior de una válvula de control de flujo, mediante el cual, se extrajeron muestras de 30 ml en una celda circular para medir las turbiedades. Estas medidas representan los valores de número de concentración de partículas primarias en T, es decir "N" para diferentes tiempos "T" de floculación.

Con respecto a las gradientes, se tuvo especial cuidado de que la velocidad de rotación de los impulsores del equipo represente la gradiente de velocidad del tratamiento correspondiente, para ello se emplearon las ecuaciones 40, 42, 44 y el valor del número de potencia indicado por Lozano-Rivas y Lozano (2015) para establecer la curva de equivalencias entre la velocidad de rotación y los valores de gradiente para el rango de temperaturas que presentó el agua en cada tratamiento experimental. La curva de equivalencias se muestra en la Figura 26, para temperaturas de entre 10°C y 14°C, que son los rangos de temperaturas que presentó el agua en los tratamientos. A partir de las equivalencias se estableció que, para las gradientes de 30, 60 y 100 s<sup>-1</sup>, corresponden valores de rotación que están en el rango de 46-47, 74-75 y 104-105 rpm, respectivamente, dependiendo de la temperatura del agua.

**Figura 26:** Gráfica que relaciona la equivalencia entre la velocidad de rotación de los impulsores con la gradiente, para un rango de temperaturas estudiadas.



Fuente: Propio

Finalmente, con los datos obtenidos se procedió a determinar las constantes cinéticas de agregación y ruptura con el programa Origin, asimismo, se realizó un análisis estadístico de tipo inferencial y subtipo paramétrico, específicamente, el análisis ANOVA (Analysis of Variance), con el programa Minitab, para someter a prueba las hipótesis de que, si existe o no existe un efecto significativo del tipo de coagulante, pH, dosis y gradiente, sobre las constantes cinéticas de agregación y ruptura. En la sección “Plan de procesamiento y análisis estadístico de la información” se detallan los aspectos relacionados al tratamiento de datos y sobre el análisis estadístico.

### **3.4. Población y muestra**

#### **3.4.1. Población**

La población corresponde al río Marcará.

#### **3.4.2. Muestra**

Las muestras corresponden a las aguas del río Marcará, muestreadas desde un punto ubicada en las coordenadas UTM WGS84 E:216,411.85 m, N:8,968,642.72 m.

### 3.5. Instrumentos de recolección de datos

Los instrumentos de recolección de datos usados en la presente investigación son instrumentos validados por los siguientes autores: Bratby (2016); Filho, Hespanhol y Moreira (2000); Dutra (2017); Marques y Ferreira-Filho (2017) y Marques y Ferreira-Filho (2022) y también por los siguientes manuales: “Operational Control of Coagulation and Filtration Processes. Manual of Water, Supply, practices” y “Standard Methods for the examination of water and wastewater” desarrollados por la AWWA (American Water Works Association). En el siguiente cuadro se muestra la validación para cada indicador.

Variable	Indicador	Validación del método	Procedimiento	Materiales, equipos y/o herramientas
Tipo de coagulante	Concentración stock de sulfato de aluminio	<ul style="list-style-type: none"> <li>De acuerdo con el manual de la American Works Water Association (AWWA): Operational Control of Coagulation and Filtration Processes. Manual of Water, Supply, practices.</li> </ul>	Se expresa en términos de la sustancia química, para lo cual, se prepara una solución madre de 10 g/l, de manera que, 1 ml de dicha solución añadidos a un beaker de 1 L represente una dosis de 10 mg/l.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sulfato de aluminio comercial.</li> <li>Cloruro férrico comercial.</li> <li>Pipeta.</li> <li>Balanza.</li> <li>Varilla de agitación.</li> <li>Agua destilada.</li> </ul>
	Concentración stock de cloruro férrico	<ul style="list-style-type: none"> <li>De acuerdo con el libro de Bratby J. (2016): Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment.</li> </ul>		
pH	Valor del pH	<ul style="list-style-type: none"> <li>De acuerdo con el manual: <i>Standard Methods for the examination of water and wastewater – 4500-H<sup>+</sup>:pH Value</i></li> </ul>	Método electrométrico, es decir determinación de la actividad de los iones de hidrógeno mediante	<ul style="list-style-type: none"> <li>pH metro</li> <li>Soluciones buffer de calibración</li> </ul>

			medición potenciométrica utilizando un electrodo de hidrógeno estándar y un electrodo de referencia.	
Dosis	Volumen extraído desde la solución stock	<ul style="list-style-type: none"> <li>De acuerdo con el manual de la American Works Water Association (AWWA): "Operational Control of Coagulation and Filtration Processes. Manual of Water, Supply, practices.</li> <li>De acuerdo con el libro de Bratby J. (2016): Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment.</li> </ul>	A partir de la solución stock de coagulante a una concentración de 10 g/l (1%), se extraen volúmenes de 0.5, 1.0 y 3.0 ml, que añadidos a un beaker de 1 L representan dosis de 5, 10 y 30 mg/l.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Solución stock de coagulante.</li> <li>Jeringa.</li> <li>Pipeta.</li> <li>Vaso de precipitados.</li> </ul>
Gradiente	Velocidad de rotación del impulsor	<ul style="list-style-type: none"> <li>De acuerdo con el manual de la American Works Water Association (AWWA): "Operational Control of Coagulation and Filtration Processes. Manual of Water, Supply, practices.</li> <li>De acuerdo con el libro de Bratby J. (2016): Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment.</li> </ul>	Los gráficos disponibles comercialmente proporcionan gradientes de velocidad en unidades de $s^{-1}$ en relación con la velocidad de la paleta del equipo, la temperatura del agua y el volumen de la jarra.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Equipo de prueba de jarras.</li> <li>Curva de equivalencia gradiente – velocidad.</li> </ul>

Constantes cinéticas de agregación ( $K_A$ ) y ruptura ( $K_B$ )	<p><b>No:</b> Concentración de partículas primarias después de la desestabilización, sin floculación y posterior sedimentación.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• De acuerdo con el trabajo de investigación de Filho, Hespanhol y Moreira (2000).</li> <li>• De acuerdo con el trabajo de investigación de Dutra (2017).</li> <li>• De acuerdo con el trabajo de Marques y Ferreira-Filho (2017).</li> <li>• De acuerdo con el trabajo de investigación de Marques y Ferreira-Filho (2022).</li> </ul>	<p>Se somete a una etapa de desestabilización a las partículas primarias mediante una mezcla rápida, sin floculación y posterior sedimentación. Finalmente se mide la concentración de partículas primarias mediante medición de turbiedad.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Equipo de prueba de jarras.</li> <li>• Turbidímetro.</li> <li>• Programa Origin.</li> </ul>
	<p><b>N:</b> Concentración de partículas primarias después de un período T de floculación y posterior sedimentación.</p>		<p>Se somete a una etapa de desestabilización a las partículas primarias mediante una mezcla rápida, luego una etapa de floculación en un tiempo T y posterior sedimentación. Finalmente se mide la concentración de partículas primarias mediante medición de turbiedad.</p>	

### 3.6. Plan de procesamiento y análisis estadístico de la información

Para el análisis de datos, primero, con los datos obtenidos de “N” y “No” se determinaron los performances o índices de floculación “N/No” para los diferentes tiempos “T” de floculación, y se graficaron “N/No” versus “T” en una gráfica de dispersión, para luego, mediante la utilización de la herramienta de regresión no lineal del programa Origin, y utilizando la ecuación del modelo de Argaman y Kaufman correspondiente a ensayos en reactores batch, se determinaron los valores de las constantes cinéticas de agregación y ruptura para un tipo de coagulante, un pH, una dosis y una gradiente en particular. Una vez determinadas las constantes cinéticas de agregación y ruptura, se realizó un análisis estadístico de tipo inferencial y subtipo paramétrico, específicamente, el análisis ANOVA (análisis de varianza) para los datos obtenidos.

Se realizaron dos pruebas ANOVA, es decir una prueba ANOVA para la variable Tipo de coagulante que tiene dos niveles (sulfato de aluminio y cloruro férrico) y otra prueba ANOVA para las variables pH con dos niveles; dosis, con tres niveles y gradiente, con tres niveles. Esta clasificación previa para la prueba ANOVA se determinó debido a que la variable tipo de coagulante es una variable de tipo cualitativa, mientras que las variables pH, dosis y gradiente son variables de tipo cuantitativa. En ese sentido, para la variable tipo de coagulante se usará la prueba ANOVA de un factor y para las variables pH, dosis y gradiente se usarán la prueba ANOVA de tres factores.

Un análisis ANOVA o también llamada análisis de varianza, prueba las hipótesis de dos o más poblaciones iguales. El análisis evalúa la importancia de uno o más factores al comparar las medias de la variable de respuesta en los diferentes niveles de los factores. En ese sentido, la hipótesis nula establece que todas las medias de la población (medias de los niveles de los factores) son iguales, mientras que la hipótesis alternativa, establece que al menos una de las medias es diferente. En la Tabla 6 y Tabla 7 se detallan los cálculos que realiza un programa

estadístico como el Minitab para el análisis ANOVA de un factor y ANOVA de tres factores respectivamente.

**Tabla 6:** ANOVA de un (01) factor con n réplicas, para la variable tipo de coagulante.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	f calculada
Tratamiento (Tipo de coagulante)	SCT	k-1	$s_1^2 = \frac{SCT}{k-1}$	$\frac{s_1^2}{s^2}$
<b>Error</b>	SCE	k(n-1)	$s^2 = \frac{SCE}{k(n-1)}$	
<b>Total</b>	STC	kn-1		

**Fuente:** Walpole, R., Myers, R., Myers, S. y Ye, K. (2011).

**Tabla 7:** ANOVA para un diseño de tres (03) factores con n réplicas, para las variables pH, dosis y gradiente.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f calculada
<b>Efecto principal:</b>				
pH	SC(B)	b-1	$s_1^2$	$f_1 = s_1^2 / s^2$
Dosis	SC(C)	c-1	$s_2^2$	$f_2 = s_2^2 / s^2$
Gradiente	SC(D)	d-1	$s_3^2$	$f_3 = s_3^2 / s^2$
<b>Interacción de 2 factores:</b>				
pH*Dosis	SC(BC)	(b-1)*(c-1)	$s_4^2$	$f_4 = s_4^2 / s^2$
pH*Gradiente	SC(BD)	(b-1)*(d-1)	$s_5^2$	$f_5 = s_5^2 / s^2$
Dosis*Gradiente	SC(CD)	(c-1)*(d-1)	$s_6^2$	$f_6 = s_6^2 / s^2$
<b>Interacción de 3 factores:</b>				
pH*Dosis*Gradiente	SC(BCD)	(b-1)*(c-1)*(d-1)	$s_7^2$	$f_7 = s_7^2 / s^2$
<b>Error</b>	SCE	b*c*d*(n-1)	$s^2$	
<b>Total</b>	SCT	b*c*d*n-1		

**Fuente:** Walpole, R., Myers, R., Myers, S. y Ye, K. (2011).

En ambos casos, a un nivel de significancia de  $\alpha=0.05$ , se someten a prueba las siguientes hipótesis, tanto para el análisis del efecto individual o

efecto de interacción de las variables (factores) sobre las variables dependiente:

- $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$  (Todas las medias de la población son iguales)

En palabras explícitas esta hipótesis sugiere que no existe un efecto significativo de las variables independientes sobre las variables dependientes.

- $H_1$ : Al menos dos de las medias de la población no son iguales

En palabras explícitas esta hipótesis sugiere que si existe un efecto significativo de las variables independientes sobre las variables dependientes.

Para el análisis estadístico que pruebe si las eficiencias obtenidas en un reactor CSTR con uno ( $m=1$ ) o dos ( $m=2$ ) compartimientos son significativamente menores que los obtenidos con tres ( $m=3$ ) compartimientos se hizo uso de la prueba t de student de dos muestras, en la que se prueba si la diferencia entre las medias de dos poblaciones independientes es significativa.

**Tabla 8:** Prueba t relacionada con medias.

$H_0$	Valor del estadístico de la prueba	$H_1$	Región crítica
$\mu_1 - \mu_2 = d_0$	$t' = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - d_0}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$ $v = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1}\right)^2}{n_1 - 1} + \frac{\left(\frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{n_2 - 1}}$	$\mu_1 - \mu_2 < d_0$	$t' < -t_\alpha$

**Fuente:** Walpole, R., Myers, R., Myers, S. y Ye, K. (2011).

## CAPÍTULO IV

### IV. RESULTADOS

#### 4.1. De las campañas de muestreo del río Marcará

En total se recolectaron veinte y cuatro (24) muestras, doce (12) muestras en los meses de marzo y abril de 2021 y doce (12) muestras en los meses de mayo y junio de 2021. Como consecuencia de ello, se tienen los siguientes resultados del análisis de turbiedad, pH y temperatura en las muestras recolectadas.

**Tabla 9:** Valores de turbiedad, pH y temperatura en las 12 muestras recolectadas, en los meses de marzo y abril de 2021.

N.º de muestro	Turbiedad (NTU)	pH	Temperatura (°C)
01	44.0	7.25	12.7
02	93.6	7.25	12.7
03	28.23	7.9	12.01
04	33.97	7.48	11.9
05	19.97	7.89	12.3
06	24.73	8.05	11.2
07	18.9	7.11	12.9
08	14.27	7.66	12.2
09	23.43	7.07	12.7
10	13.47	7.66	12.6
11	19.23	7.04	10.6
12	13.53	7.67	12.1
Máximo:	93.60	8.05	13.90
Promedio:	28.94	7.50	12.16

Mínimo:	13.47	7.04	10.60
---------	-------	------	-------

**Fuente:** Propio.

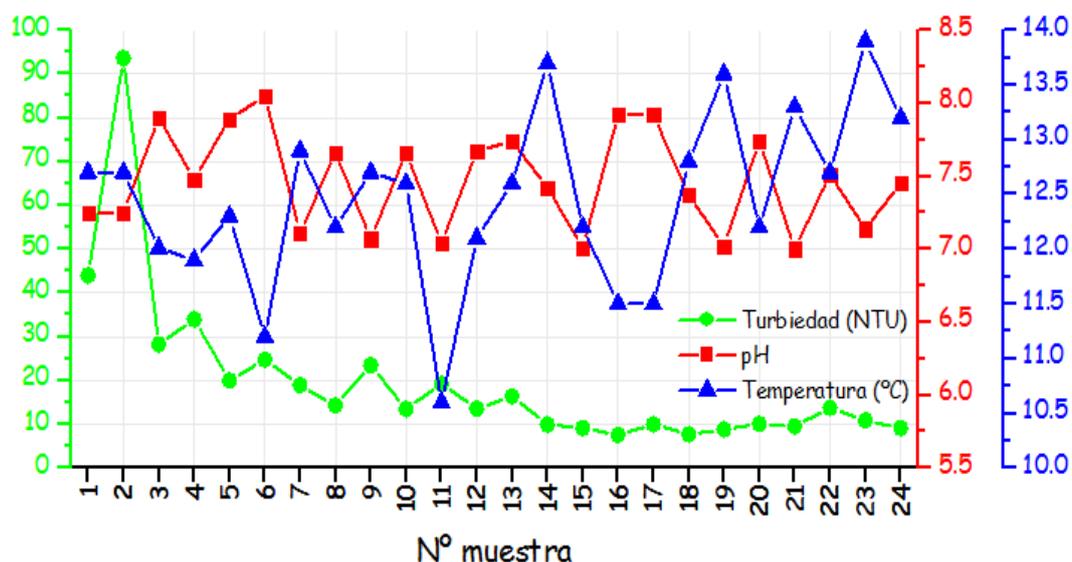
**Tabla 10:** Valores de turbiedad, pH y temperatura en las 12 muestras recolectadas, en los meses de mayo y junio de 2021.

N.º de muestra	Turbiedad (NTU)	pH	Temperatura (°C)
13	16.4	7.74	12.6
14	9.93	7.42	13.7
15	9.10	7.01	12.2
16	7.56	7.92	11.5
17	9.98	7.92	11.5
18	7.69	7.37	12.8
19	8.80	7.02	13.6
20	10.05	7.74	12.2
21	9.50	7.00	13.3
22	13.73	7.51	12.7
23	10.87	7.14	13.9
24	9.10	7.45	13.2
Máximo:	16.4	7.92	13.90
Promedio:	10.23	7.43	12.76
Mínimo:	7.56	7.00	11.5

**Fuente:** Propio.

En la Figura 27 se muestra un gráfico con los valores medidos de turbiedad, pH y temperatura en los 24 muestreos.

**Figura 27:** Gráfico de valores medidos de turbiedad, pH y temperatura en las muestras de agua recolectadas.



**Fuente:** Propio

De los valores obtenidos, en cuanto a las mediciones de turbiedad se refiere, en los meses de marzo y abril, los valores encontrados fueron de un máximo de 93.6 UNT, un promedio de 28.94 UNT y un mínimo de 13.47 UNT, en cambio en los meses de mayo y junio el valor máximo fue de 16.40 UNT, un promedio de 10.23 UNT y un mínimo de 7.56 UNT. En cuanto a las medidas de pH, en los meses de marzo y abril, se tuvo un máximo de 8.05, un promedio de 7.50 y un mínimo de 7.04, en cambio en los meses de mayo y junio se tuvo un máximo de 7.92, un promedio de 7.44 y un mínimo de 7.0. Finalmente, en cuanto a la temperatura, en los meses de marzo y abril se tuvo un máximo de 12.9°C, un promedio de 12.16°C y un mínimo de 10.6°C, en cambio en los meses de mayo y junio se tuvo un máximo 13.9°C, un promedio de 12.77°C y un mínimo de 11.5°C.

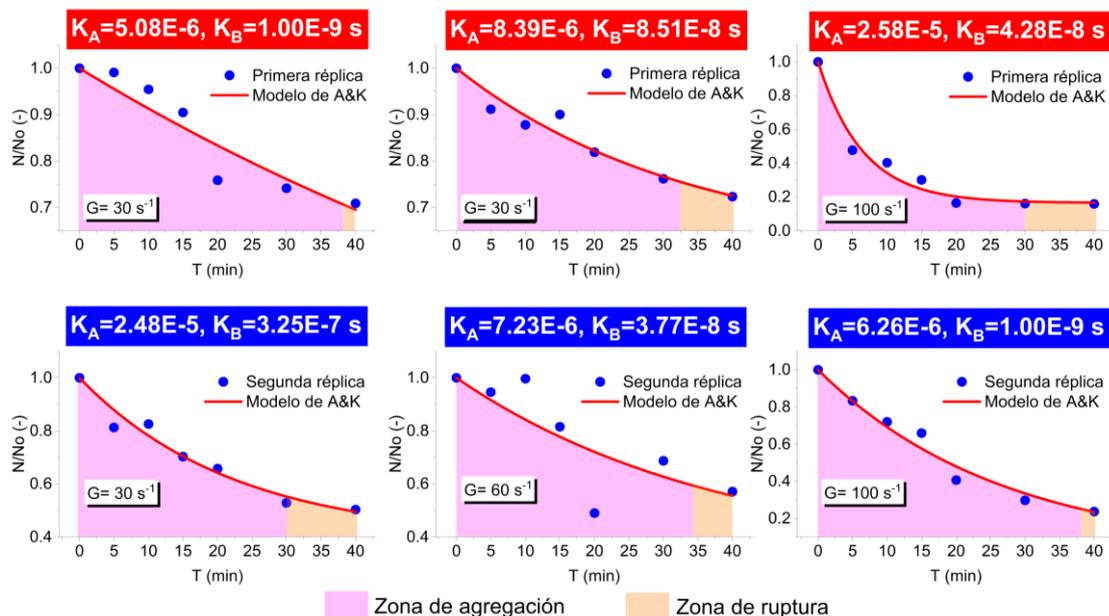
#### 4.2. Sobre la determinación de las constantes cinéticas de agregación y ruptura.

Con respecto a la determinación de las constantes cinéticas de agregación y ruptura, se graficaron los índices de floculación “N/No” (estos valores se muestran en las fichas de recolección de datos adjuntos en el anexo) versus tiempos T de floculación para un determinado tipo de coagulante,

un pH, una dosis y una gradiente en específico. Luego, empleando la expresión correspondiente a ensayos en batch del modelo de Argaman y Kaufman, se determinaron en el programa Origin los valores de las constantes cinéticas de agregación y ruptura. Asimismo, en el anexo se muestra el procedimiento detallado de cómo se determinaron los valores de las constantes cinéticas para cada condición estudiada, empleando la metodología estadística.

En las siguientes figuras se muestra el bloque de gráficos que dio como resultado el procedimiento de determinación de las constantes cinéticas a partir de los datos obtenidos en laboratorio; el procedimiento de determinación está especificado a detalle en el anexo. Cada bloque de gráfico muestra la regresión para un tipo de coagulante, un pH, una dosis y las tres (03) gradientes estudiadas (30, 60 y 100 s<sup>-1</sup>), tanto para la primera y segunda réplica. Las gradientes se muestran como etiquetas, además, en cada gráfico se muestran las zonas de agregación (color rosado) y zonas de ruptura (color naranja pálido), para K<sub>B</sub> con valores grandes corresponden zonas de ruptura de mayor área y viceversa.

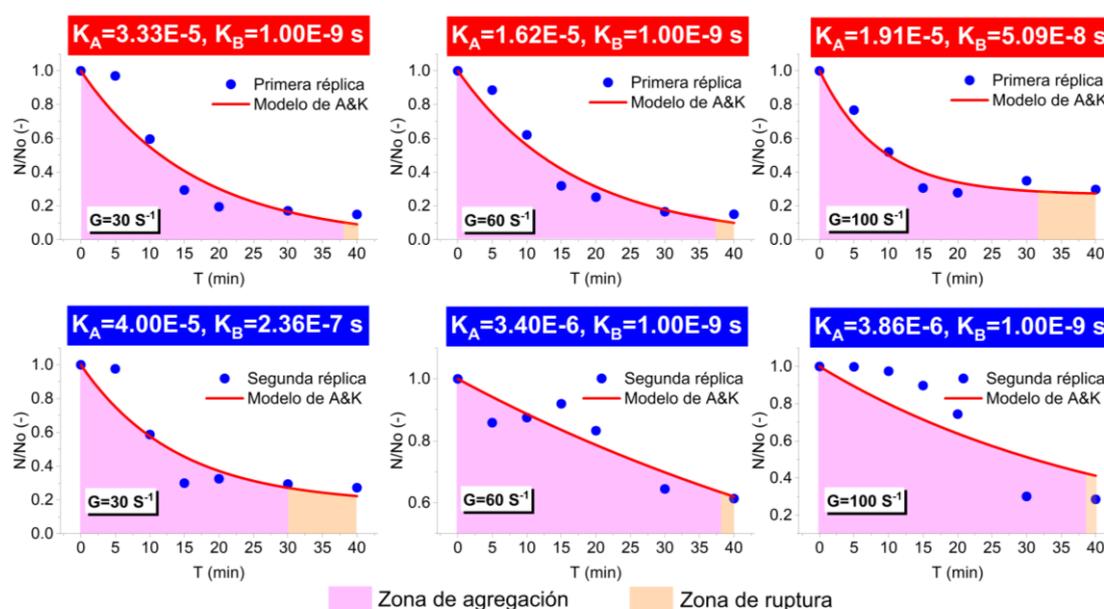
**Figura 28.** Valores de K<sub>A</sub> y K<sub>B</sub>, cuando se emplea Sulfato de Aluminio, pH de 6.0, dosis de 5 mg/l, para ambas réplicas.



Fuente: Propio

Se puede observar que para el tratamiento: Sulfato de aluminio, pH de 6.0 y dosis de 5 mg/l, para las tres gradientes (30, 60 y 100 s<sup>-1</sup>), los valores de K<sub>A</sub> y K<sub>B</sub> son relativamente variables, específicamente para las gradientes de 30 y 100 s<sup>-1</sup>, si se comparan los valores de la primera réplica con la segunda réplica; al ser la turbiedad del agua el único factor variable en ambas réplicas, se puede tener la seguridad de que la concentración de partículas primarias es el que ocasiona dicha variación. Así mismo, para cada gradiente estudiada se observan valores de K<sub>A</sub> y K<sub>B</sub> son relativamente variables, siendo para la gradiente de 100 s<sup>-1</sup>, los valores que producen los valores más bajos en N/No, por ende, la mejor eficiencia.

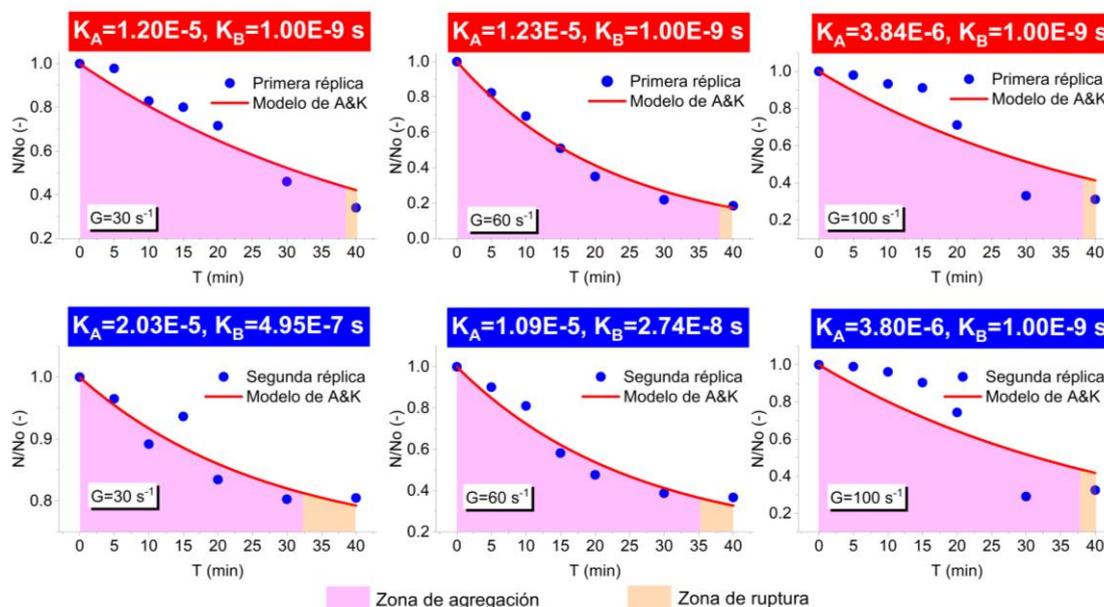
**Figura 29.** Valores de K<sub>A</sub> y K<sub>B</sub>, cuando se emplea Sulfato de Aluminio, pH de 6.0, dosis de 10 mg/l, para ambas réplicas.



**Fuente:** Propio

Se puede observar que para el tratamiento: Sulfato de aluminio, pH de 6.0 y dosis de 10 mg/l, para las tres gradientes (30, 60 y 100 s<sup>-1</sup>), los valores de las constantes cinéticas son variables en ambas réplicas, por lo que la concentración de partículas primarias ha tenido influencia en ellos. Asimismo, K<sub>B</sub> es pequeño con respecto a K<sub>A</sub> cuando se emplean gradientes de 30 y 60 s<sup>-1</sup>, un aumento a 100 s<sup>-1</sup> en la gradiente produjo una disminución en K<sub>A</sub> y un aumento en K<sub>B</sub>, por lo que con esta gradiente el mecanismo de ruptura es más significativa.

**Figura 30.** Valores de  $K_A$  y  $K_B$ , cuando se emplea Sulfato de Aluminio, pH de 6.0, dosis de 30 mg/l, para ambas réplicas.

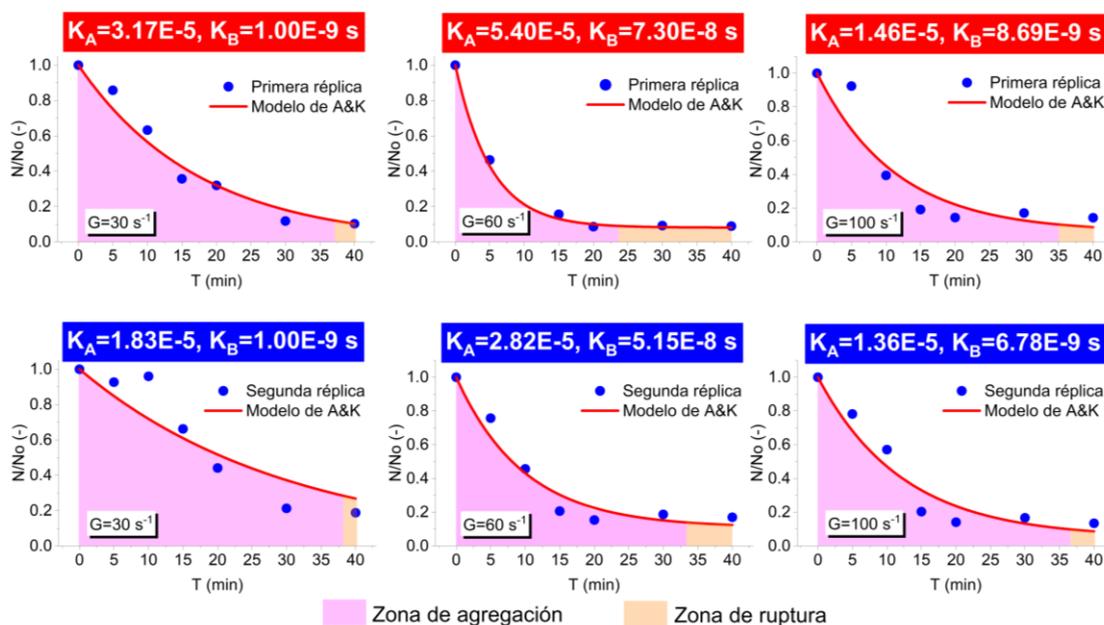


**Fuente:** Propio

Se puede observar que para el tratamiento: Sulfato de aluminio, pH de 6.0 y dosis de 30 mg/l, para las tres gradientes (30, 60 y 100  $s^{-1}$ ), existe variación relativa en los valores de las constantes cinéticas en ambas réplicas producto del efecto de la concentración de partículas primarias, sin embargo, este efecto solo es significativo en  $K_B$  ya que valores de  $K_A$  son de la misma magnitud u orden en ambas réplicas. Además, cuando se empleó una gradiente de 30  $s^{-1}$  en la segunda réplica produjo un valor de  $K_B$  del orden de  $10^{-7}$  s, por lo que la tasa de ruptura es significativa y por consiguiente los valores de  $N/No$  son grandes, es decir dan lugar a una eficiencia pequeña.

Ahora, si se analiza en función a las tres dosis mostradas hasta ahora en los tres gráficos, para un pH de 6.0, se puede ver las tres dosis producen valores en  $K_A$  del orden de  $10^{-6}$  y  $10^{-5}$  y valores del orden de  $10^{-9}$  s,  $10^{-8}$  s y  $10^{-9}$  s en  $K_B$ , sin embargo, con una dosis de 5 mg/l hay una mayor tendencia de que  $K_B$  sea solo dos órdenes menor que  $K_A$ , lo que ocasiona que los índices de floculación "N/No" no sean tan eficientes en estos casos, por el contrario si  $K_B$  es al menos tres órdenes menor de  $K_A$ , la tasa de ruptura no es tan significativa, por lo que se producen menores índices de floculación.

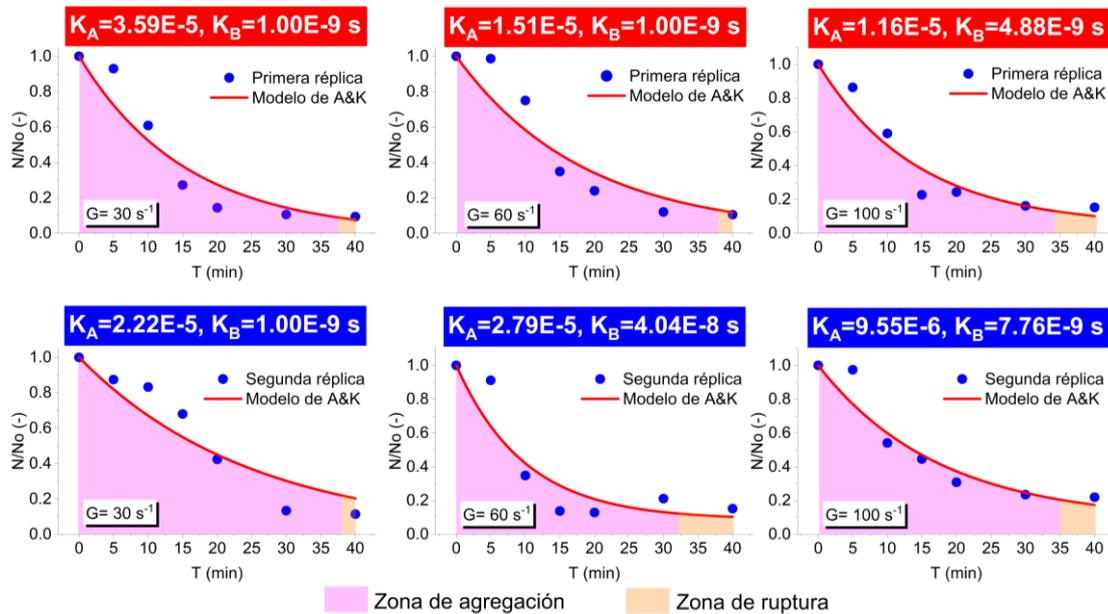
**Figura 31.** Valores de  $K_A$  y  $K_B$ , cuando se emplea Sulfato de Aluminio, pH de 8.0, dosis de 5 mg/l, para ambas réplicas.



**Fuente:** Propio

Se puede observar que para el tratamiento: Sulfato de aluminio, pH de 8.0 y dosis de 5 mg/l, para las tres gradientes (30, 60 y 100  $s^{-1}$ ), el orden de magnitud de  $K_A$  se mantiene constante en ambas réplicas con un valor del orden de  $10^{-5}$  para las tres gradientes, también se observa que el valor de  $K_B$  se mantiene constante en las dos réplicas. Asimismo, la tasa de ruptura es casi despreciable con gradientes de 30 y 100  $s^{-1}$ , con un valor del orden de  $10^{-9}$  s, sin embargo, con gradiente de 60  $s^{-1}$ , el valor de  $K_B$  es 10 veces más grande, con valor del orden de  $10^{-8}$  s. Además, los índices de floculación llegan a alcanzar valores de  $N/N_0$  de 0.20 (representa una eficiencia de 80%), lo que quiere decir de valores de  $K_B$  del orden de  $10^{-8}$  s y  $10^{-9}$  s representan tasas de ruptura relativamente bajas.

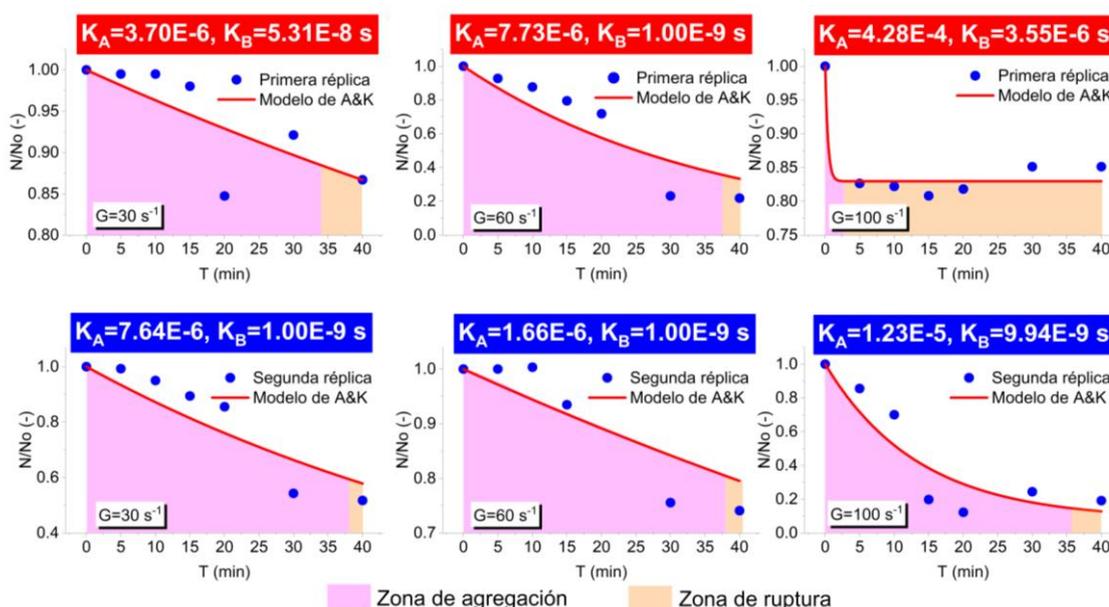
**Figura 32.** Valores de  $K_A$  y  $K_B$ , cuando se emplea Sulfato de Aluminio, pH de 8.0, dosis de 10 mg/l, para ambas réplicas.



**Fuente:** Propio

Se puede observar que para el tratamiento: Sulfato de aluminio, pH de 8.0 y dosis de 10 mg/l, para las tres gradientes (30, 60 y 100 s<sup>-1</sup>), los valores de  $K_A$  son del orden de 10<sup>-5</sup>, y valores de  $K_B$  del orden de 10<sup>-9</sup> s y 10<sup>-9</sup> s, por lo que la tasa de ruptura no es tan significativa, lo que hace posible que haya una prevalencia de la tasa de agregación de partículas, lo que se verifica con los valores de los índices de floculación superan el valor de 0.20, es decir alcanzan una eficiencia de al menos 80%. Por otro lado, se observa una ligera variación en los valores de  $K_A$  y  $K_B$  si se compara la primera réplica con la segunda, específicamente esta pequeña variación sucede con las gradientes de 60 y 100 s<sup>-1</sup>.

**Figura 33.** Valores de  $K_A$  y  $K_B$ , cuando se emplea Sulfato de Aluminio, pH de 8.0, dosis de 30 mg/l, para ambas réplicas.

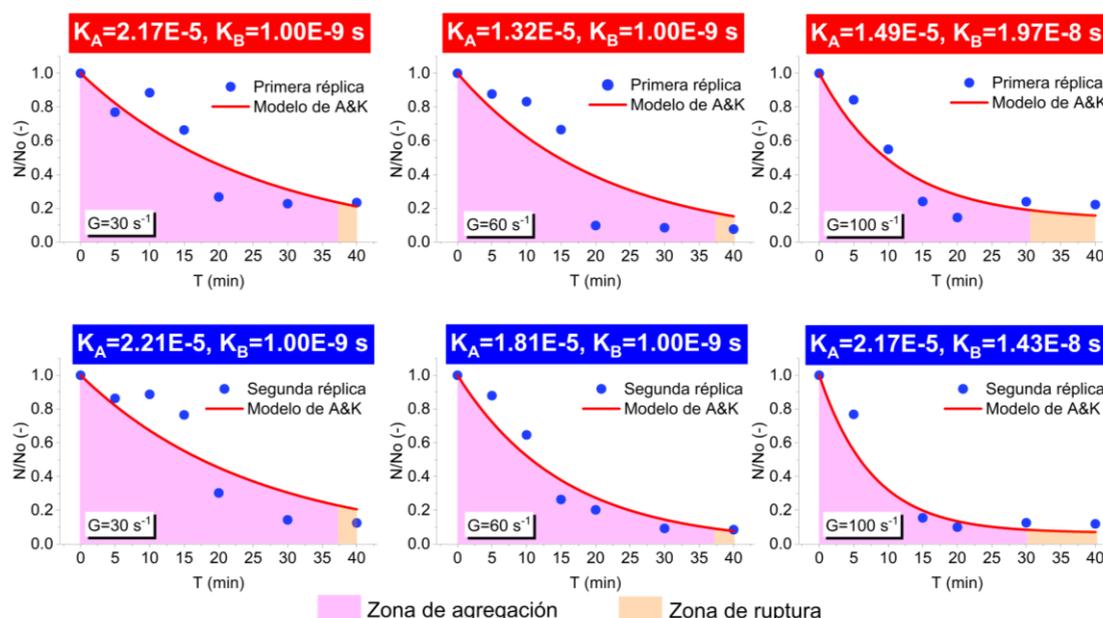


**Fuente:** Propio

Se puede observar que para el tratamiento: Sulfato de aluminio, pH de 8.0 y dosis de 30 mg/l, para las tres gradientes (30, 60 y 100  $s^{-1}$ ), hay una prevalencia de una pequeña tasa de agregación, especialmente cuando se emplearon gradientes de 30 y 60  $s^{-1}$ , por lo que los valores de  $K_A$  son pequeños con valores del orden de  $10^{-6}$ , a pesar de que sus respectivos valores de  $K_B$  son del orden de  $10^{-9}$  s y  $10^{-8}$  s, el valor pequeño en  $K_A$  hace que se produzcan valores pobres en los índices de floculación. En el caso particular de cuando se emplea una gradiente de 100  $s^{-1}$  en la primera réplica, el valor de  $K_A$  de  $4.28 \times 10^{-4}$  da la impresión de que se obtendría tasas de agregación grandes pero como se puede observar en la gráfica los índices de floculación alcanzan como máximo un valor de 0.80, es decir una eficiencia que no supera el 20%, esto es debido a que su correspondiente valor de  $K_B$  es grande con un valor de  $3.55 \times 10^{-6}$  s, por lo que las tasas de ruptura son muy significativas lo que se evidencia en una región grande de la zona de ruptura. Por otro lado, hubo una variación considerable en las constantes cinéticas si se comparan ambas réplicas, específicamente cuando se emplea la gradiente de 100  $s^{-1}$ , producto de la influencia de la concentración de partículas primarias.

Teniendo en cuenta que hasta ahora se han mostrado todos los tratamientos realizados con sulfato de aluminio para ambos pH, las tres dosis y las tres gradientes, se puede notar que con un pH de 8.0 se obtienen mejores tasas de agregación, además esto es notorio ya que para dosis de 5 y 10 mg/l, cuando se emplea pH de 8.0 prevalecen valores de  $K_A$  del orden de  $10^{-5}$  y valores de  $K_B$  no tan significativas en relación a  $K_A$ , lo que permite tasas de agregación considerables, en cambio con un pH de 6.0, se observan que prevalecen valores de  $K_A$  del orden de  $10^{-6}$ , lo que representan tasas de agregación pequeñas.

**Figura 34.** Valores de  $K_A$  y  $K_B$ , cuando se emplea Cloruro férrico, pH de 6.0, dosis de 5 mg/l, para ambas réplicas.

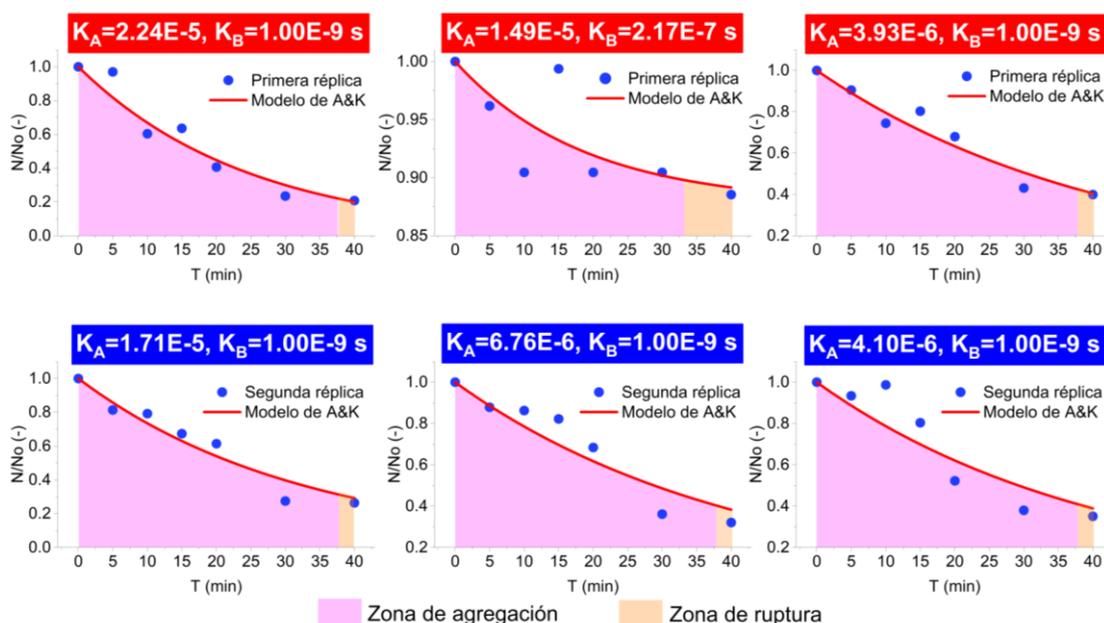


**Fuente:** Propio

Se puede observar que para el tratamiento: Cloruro férrico, pH de 6.0 y dosis de 5 mg/l, para las tres gradientes (30, 60 y 100 s<sup>-1</sup>), tanto para la primera y segunda réplica el valor de  $K_A$  es del orden de  $10^{-5}$ , de igual manera el valor de  $K_B$  tiene el mismo orden de una réplica a otra, por lo que en este caso la influencia de la concentración de partículas primarias no tuvo un efecto; sin embargo,  $K_B$  tiene una pequeña variación de un gradiente a otro. El hecho de que la constante cinética sea del orden de  $10^{-$

<sup>5</sup> hace posible que se generen tasas de agregación considerables y tasas de ruptura muy bajas.

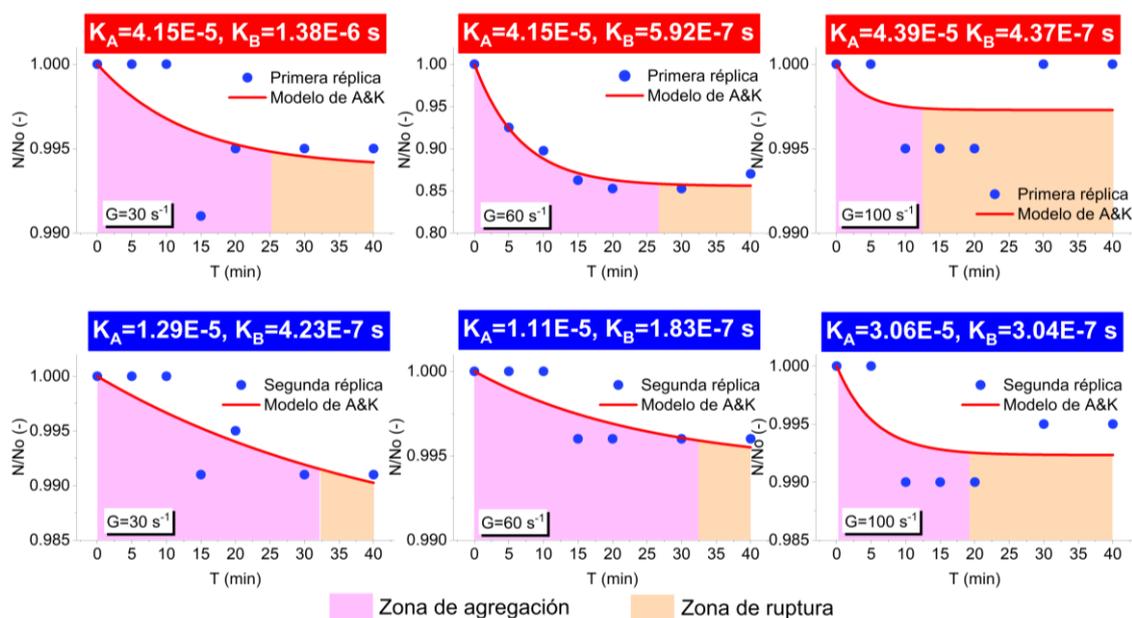
**Figura 35.** Valores de  $K_A$  y  $K_B$ , cuando se emplea Cloruro férrico, pH de 6.0, dosis de 10 mg/l, para ambas réplicas.



**Fuente:** Propio

Se puede observar que para el tratamiento: Cloruro férrico, pH de 6.0 y dosis de 10 mg/l, para las tres gradientes ( $30$ ,  $60$  y  $100$   $s^{-1}$ ), existe una pequeña variación en los valores de las constantes cinéticas de una réplica a otra, especialmente cuando la gradiente es de  $60$   $s^{-1}$ , por lo que hay un efecto de la concentración de partículas primarias. Además, cuando la constante cinética de agregación es del orden de  $10^{-6}$  las tasas de agregación no generan índices de floculación considerables, también si la constante cinética de ruptura es del orden de  $10^{-7}$  s existe una considerable tasa de ruptura que impide la agregación de partículas, como se puede observar cuando se empleó la gradiente de  $60$   $s^{-1}$  en la primera réplica, en la que se obtuvieron índices de floculación que no son menores que 0.90.

**Figura 36.** Valores de  $K_A$  y  $K_B$ , cuando se emplea Cloruro férrico, pH de 6.0, dosis de 30 mg/l, para ambas réplicas.

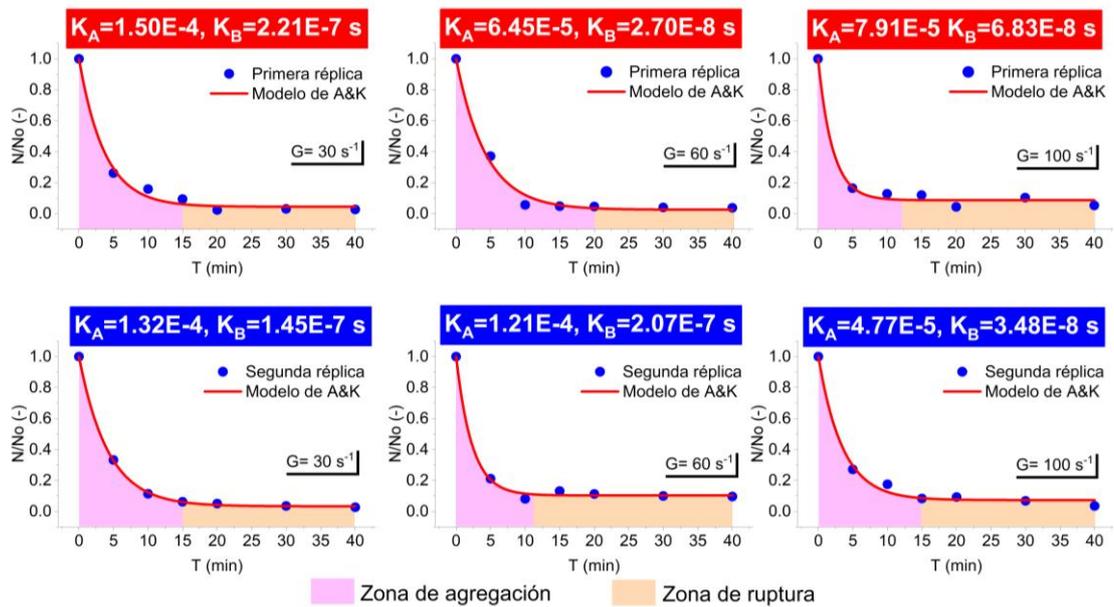


**Fuente:** Propio

Se puede observar que para el tratamiento: Cloruro férrico, pH de 6.0 y dosis de 30 mg/l, para las tres gradientes ( $30$ ,  $60$  y  $100 \text{ s}^{-1}$ ), no hay una variación en el valor de la constante cinética de agregación ya que en ambas réplicas son del orden de  $10^{-5}$ , sin embargo se verifica que los valores de las constantes cinéticas son del orden de  $10^{-7}$  s y  $10^{-6}$  s, los cuales representan tasas de ruptura muy grandes en comparación a su correspondiente valor de  $K_A$ , este hecho produce que predomine la desintegración de flocs ya formados, dando por resultado índices de floculación muy pobres, que en ninguno de los tratamientos tienen valores por debajo de 0.85.

Ahora, habiendo visto hasta ahora las tres dosis para el cloruro férrico con un pH de 6.0, se puede observar que los mejores valores de  $K_A$  y  $K_B$  se han obtenido con dosis de 5 y 10 mg/l en comparación a lo obtenido con la dosis de 30 mg/l, este hace sugiere que la dosis tiene un efecto sobre las constantes cinéticas, hipótesis que se puede comprobar con el análisis de varianza.

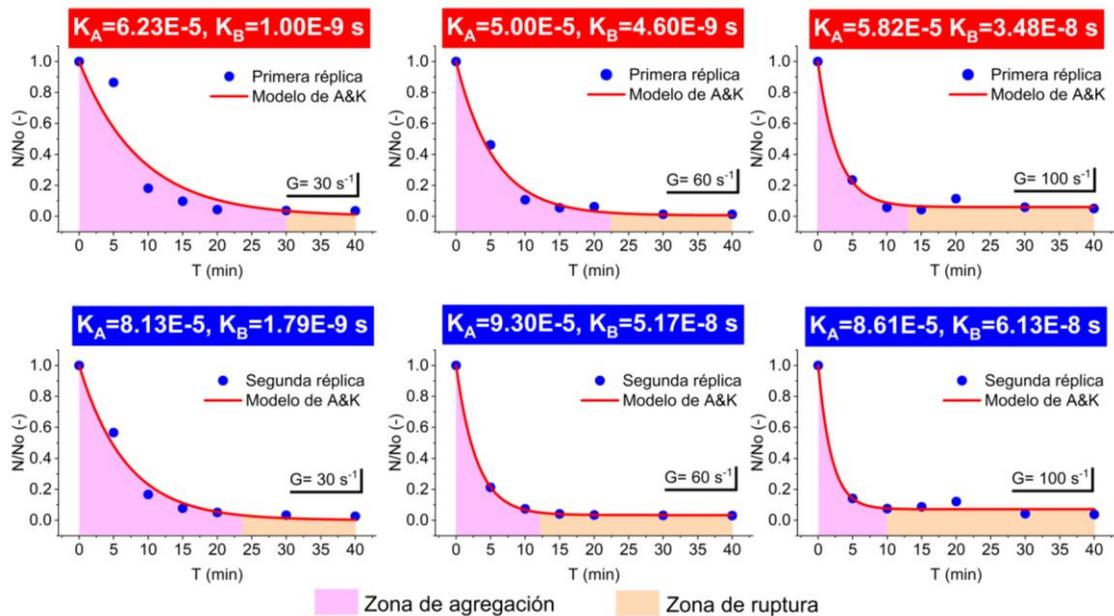
**Figura 37.** Valores de  $K_A$  y  $K_B$ , cuando se emplea Cloruro férrico, pH de 8.0, dosis de 5 mg/l, para ambas réplicas.



**Fuente:** Propio

Se puede observar que para el tratamiento: Cloruro férrico, pH de 8.0 y dosis de 5 mg/l, para las tres gradientes ( $30, 60$  y  $100 \text{ s}^{-1}$ ), se observa que hay una ligera variación en los valores de las constantes cinéticas de una réplica a otra, especialmente con gradientes de  $60$  y  $100 \text{ s}^{-1}$ , lo que implica un efecto de la concentración de partículas primarias. Asimismo, se observa que los valores de  $K_A$  son del orden de  $10^{-4}$  y  $10^{-5}$ , lo que implica que se producen tasas significativamente altas, y los valores de  $K_B$  son al menos tres órdenes menores con valores de  $10^{-7}$  s y  $10^{-8}$  s, los mismos que producen tasas de ruptura una vez que se hayan alcanzado altos índices de floculación, que alcanzan en todos los casos al menos un valor de 0.20. También se rescata el hecho de que las altas tasas de agregación se producen en tiempos relativamente cortos, entre los 5 y 10 primeros minutos.

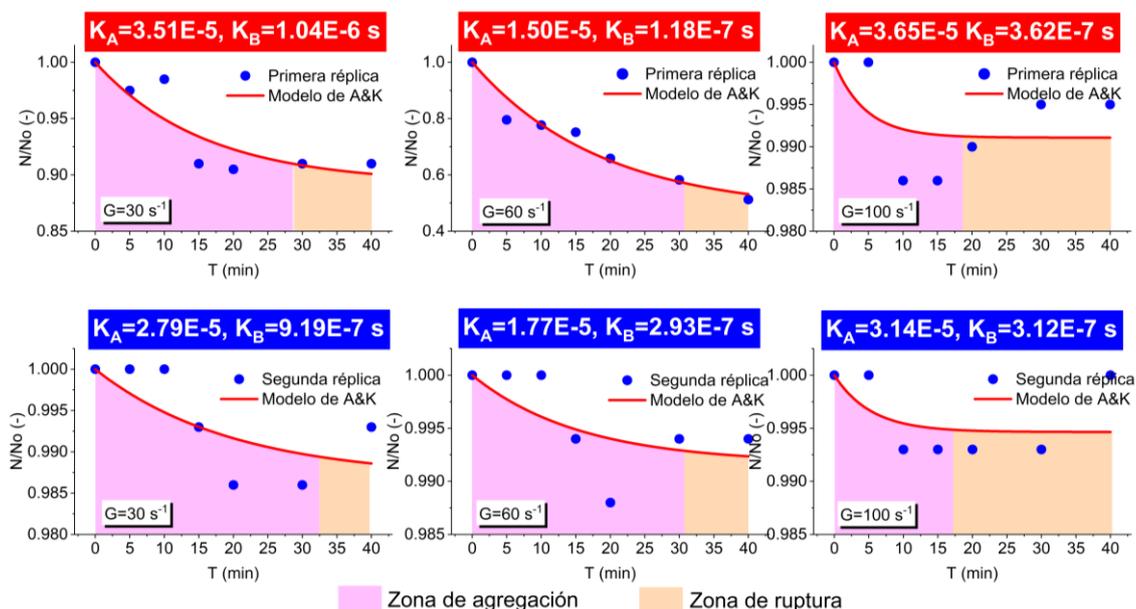
**Figura 38.** Valores de  $K_A$  y  $K_B$ , cuando se emplea Cloruro férrico, pH de 8.0, dosis de 10 mg/l, para ambas réplicas.



**Fuente:** Propio

Se puede observar que para el tratamiento: Cloruro férrico, pH de 8.0 y dosis de 10 mg/l, para las tres gradientes ( $30$ ,  $60$  y  $100 \text{ s}^{-1}$ ), se observa que ambas réplicas y de una gradiente a otra se mantiene el valor de la constante cinética de agregación con un valor del orden de  $10^{-5}$ , sin embargo, hay una pequeña variación en la constante cinética de ruptura si se comparan ambas réplicas, lo que se puede interpretar como el efecto de la concentración de partículas primarias. Además, valores de  $K_A$  del orden de  $10^{-5}$  y valores de al menos tres órdenes menores en  $K_B$  hacen posible altas tasas de agregación, lo que ha permitido obtener índices de floculación similares a los obtenidos con una dosis de 5 mg/l. Asimismo, altas tasas de floculación han permitido obtener un equilibrio en las tasas de agregación y ruptura en tiempos cortos de entre 10 a 15 minutos en la mayoría de los casos, especialmente con las gradientes de 60 y  $100 \text{ s}^{-1}$ .

**Figura 39.** Valores de  $K_A$  y  $K_B$ , cuando se emplea Cloruro férrico, pH de 8.0, dosis de 30 mg/l, para ambas réplicas.



**Fuente:** Propio

Se puede observar que para el tratamiento: Cloruro férrico, pH de 8.0 y dosis de 30 mg/l, para las tres gradientes (30, 60 y  $100 s^{-1}$ ), se observa que las constantes cinéticas de agregación tienen el mismo valor del orden de  $10^{-5}$  en ambas réplicas, por lo que la variación de partículas primarias del agua no ha tenido influencia, además se observa que las constantes cinéticas de ruptura tienen una tendencia a ser del mismo orden, con valor de  $10^{-7}$  s en ambas réplicas, a excepción del valor obtenido en la primera réplica cuando se empleó una gradiente de  $10^{-6}$  s. En todos los tratamientos el valor de las constantes cinéticas daría a entender que se producirán altas tasas de floculación, pero valores de las constantes cinéticas de ruptura son muy significativos, por lo que la ruptura de flóculos ya formados es significativa, impidiendo alcanzar índices de floculación adecuados.

Habiendo visto hasta ahora, los distintos valores de las constantes cinéticas cuando se emplea cloruro férrico con las tres dosis con pH de 6.0 y 8.0, se puede ver que se obtienen mejores tasas de agregación con dosis de 5 y 10 mg/l con ambos pH, pero es muy notorio que con un pH de 6.0 las altas tasas de floculación ocurren en tiempos de entre 30 y 40 minutos, mientras

que con un pH de 8.0 se obtienen en tiempos cortos de entre 10 a 15 minutos.

Por otro lado, se graficaron los valores de las gradientes versus los valores de las constantes cinéticas de ruptura, con la finalidad de observar la tendencia de correlación entre ellas, para lo cual se usó las tres ecuaciones posibles para la correlación: exponencial, logarítmica y potencial.

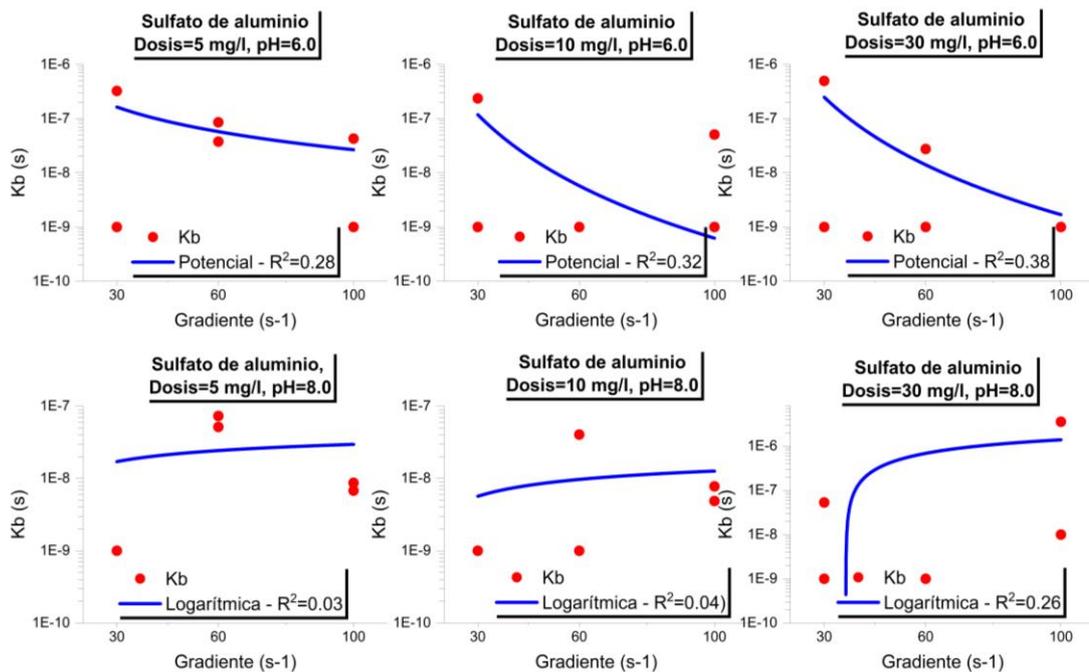
La expresión de la ecuación exponencial tiene la forma:  $K_B = k_1 * e^{k_2 * G}$

La expresión de la ecuación logarítmica tiene la forma:  $K_B = k_1 * \ln(G) + k_2$

La expresión de la ecuación potencial tiene la forma:  $K_B = k_1 * G^{k_2}$

En la Figura 40 se muestra los gráficos que relacionan los  $K_B$  determinados con la gradiente para el sulfato de aluminio y para cada dosis y pH estudiado, y en la que se muestra también el ajuste con la expresión que dio lugar a la obtención de mayor valor de  $R^2$  (coeficiente de determinación).

**Figura 40.** Relación entre  $K_B$  y la gradiente, cuando se emplea sulfato de aluminio, para cada dosis y pH estudiados.

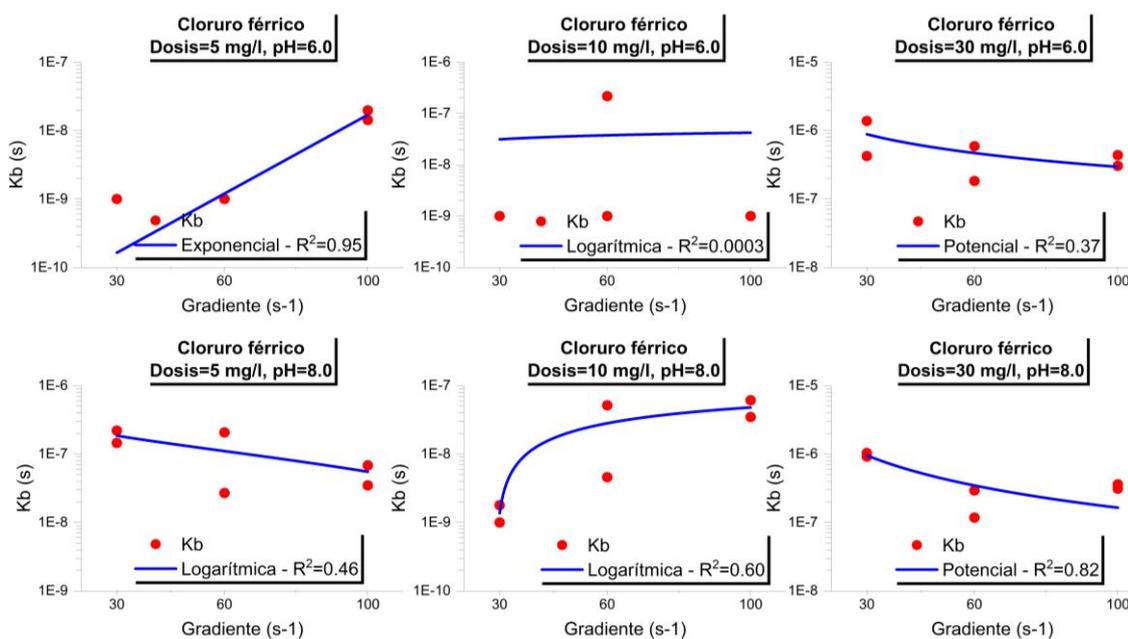


Fuente: Propio

Se observa que en cada caso que la correlación entre  $K_B$  y  $G$  no es tan evidente, debido a que en todos los casos se ha obtenido un  $R^2$  máximo de 0.38. Además, en el caso en la que se usó un pH de 6.0, la mejor expresión que mejor se ajusta a los datos fue la ecuación potencial, y en el caso del pH de 8.0 la expresión que mejor se ajustó a los datos fue la ecuación logarítmica. De acuerdo con estos resultados se puede ver que para condición de dosis y pH estudiados las ecuaciones que mejor se ajustan a la relación entre  $K_B$  y  $G$  pueden variar de un ensayo a otro y que en algunos casos la correlación entre estas dos variables no puede ser tan evidentes como lo muestra otro estudio y el que se indicará en la discusión.

En la Figura 41 se muestra los gráficos que relacionan los  $K_B$  determinados con la gradiente, para el cloruro férrico y para cada dosis y pH estudiados, y en la que se muestra también el ajuste con la expresión que dio lugar a la obtención de mayor valor de  $R^2$  (coeficiente de determinación).

**Figura 41.** Relación entre  $K_B$  y la gradiente, cuando se emplea sulfato de aluminio, para cada dosis y pH estudiados.



**Fuente:** Propio.

Se observa que la correlación entre  $K_B$  y  $G$ , en la mayoría de los casos es mejor que lo obtenido con el sulfato de aluminio, habiendo obtenido incluso un valor de  $R^2$  de 0.95. Se observa que, en el caso del pH de 6.0 se ha

obtenido que la ecuación exponencial, logarítmica y potencial se ajustan mejor para las dosis de 5, 10 y 30 mg/l respectivamente. Además, para un pH de 8.0, en el caso de la dosis de 5 y 10 mg/l la ecuación logarítmica se ajustó mejor a los datos y en el caso de la dosis de 30 mg/l la ecuación potencial se ajustó mejor. Al igual que para el caso del sulfato de aluminio, los datos experimentales muestran que para condición estudiada la relación entre  $K_B$  y  $G$  puede variar y en algunos casos no tener correlación entre ellas como lo han demostrado otros estudios que se indicarán en la discusión.

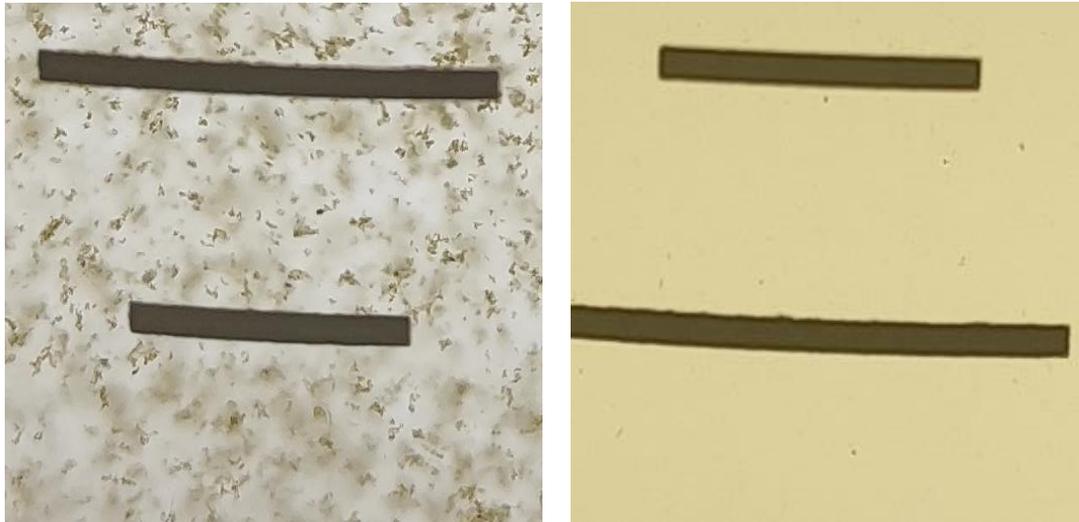
#### **4.3. Comportamiento de las constantes cinéticas de agregación y ruptura con respecto a las variables independientes.**

Las constantes cinéticas en la cinética de floculación son variables que indican de forma cuantitativa cuan bien una muestra de agua en particular se flocula. El valor de la constante cinética de agregación indica la tasa de agregación de partículas primarias para formar flocs, mientras más grande el valor de esta constante mejor tasa de agregación se obtendrá, de forma análoga, el valor de la constante cinética de ruptura, indica el mecanismo de cizallamiento y erosión de la superficie de los flocs formados para dar lugar a partículas primarias, en ese sentido mientras más grande el valor de esta constante cinética en relación a la constante cinética de agregación, indicará que el mecanismo de ruptura es significativa y no se lograrán tasas de agregación muy altas.

De acuerdo con lo que se observa en la Figura 42, si bien es cierto que en ambos casos los valores de la constante cinética de agregación son del mismo orden, pero en el primer caso el valor de su correspondiente constante cinética de ruptura es tres (03) órdenes menor, es decir al menos 1,000 en relación a su correspondiente  $K_A$  por lo que el mecanismo de ruptura no es tan significativa y se logra la formación de flóculos grandes y fuertes, como el mostrado en la imagen de la izquierda. Sin embargo, en el otro caso, la constante cinética de ruptura es solamente 30 veces menor que su correspondiente  $K_A$  y como consecuencia el mecanismo de ruptura de flóculos es significativa e impide la adecuada agregación de partículas

para formar floc y solo es posible la formación de flocs muy diminutos y débiles como el mostrado en la imagen de la derecha.

**Figura 42:** Tamaño de flocs formados de acuerdo con los valores de las constantes cinéticas de agregación y ruptura, cuando se usa cloruro férrico.

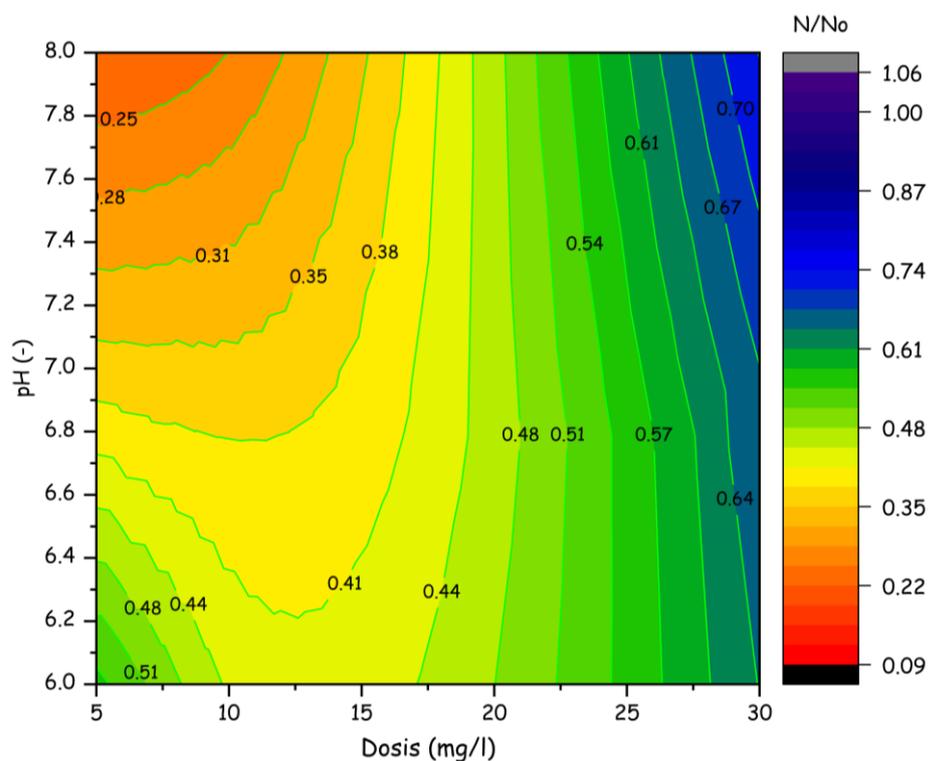


**Nota. (1)**  $K_A=5.82 \times 10^{-5}$ ,  $K_B=3.48 \times 10^{-8}$  s (izquierda) y  $K_A=4.15 \times 10^{-5}$ ,  $K_B=1.38 \times 10^{-6}$  s (derecha), **(2)** la certificación del equipo empleado se muestra en el informe de control de calidad proporcionado por el fabricante, el cual se adjunta en el anexo.

**Fuente:** Propio.

Por otro lado, la Figura 43 muestra un mapa de superficie para el sulfato de aluminio, cuyas isopletas son los índices de floculación que corresponden a un tiempo de floculación de 20 min. Se observa que, de la totalidad de ensayos realizados, los mejores índices de floculación se obtienen con dosis bajas y un pH alcalino, en cambio, cuando existe un incremento de dosis y una disminución del pH los índices de floculación empobrecen. Asimismo, se puede observar que en promedio se obtuvieron índices que oscilan alrededor de 0.41 y 0.44; mientras que el mejor índice de floculación obtenido es por lo menos de 0.25.

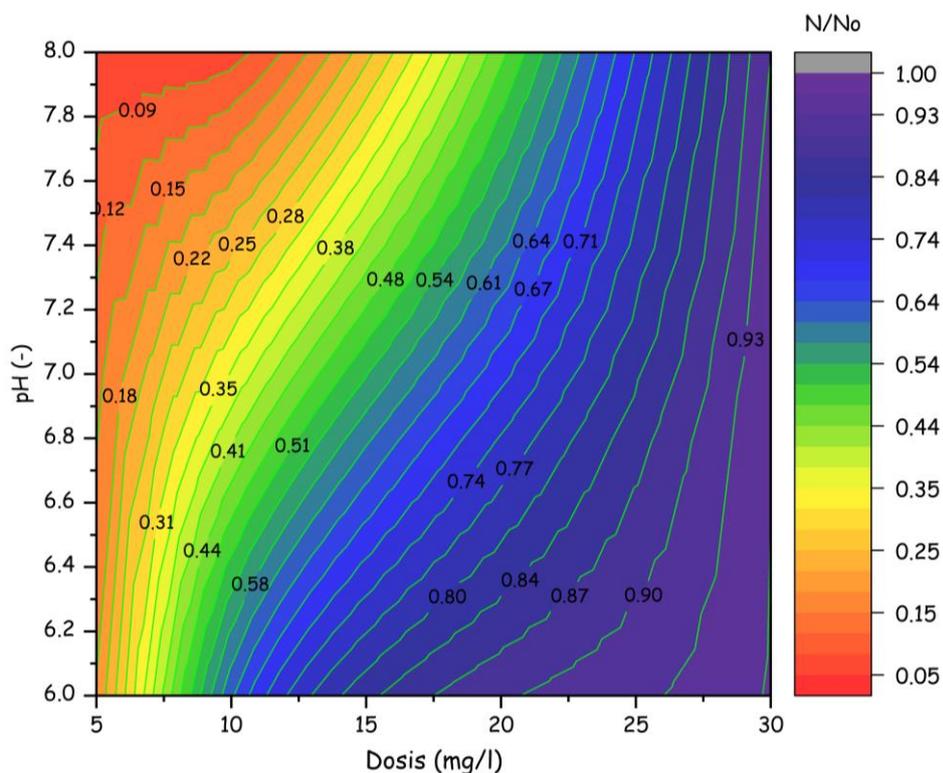
**Figura 43:** Mapa de superficies para el sulfato de aluminio con respecto a la dosis, pH e índices de floculación, para un tiempo  $T=20$  min.



**Fuente:** Propio.

Asimismo, la Figura 44 muestra el mapa de superficies para el cloruro férrico, cuyas isopletas son los índices de floculación que corresponden a un tiempo de floculación de 20 min. Se observa que, de la totalidad de ensayos realizados, los mejores índices de floculación se obtienen con dosis bajas y un pH alcalino, en cambio, cuando existe un incremento de dosis y una disminución del pH los índices de floculación se empobrecen. Asimismo, se puede observar en promedio se obtuvieron índices que oscilan alrededor de 0.64 y el mejor índice se encuentra alrededor de 0.09.

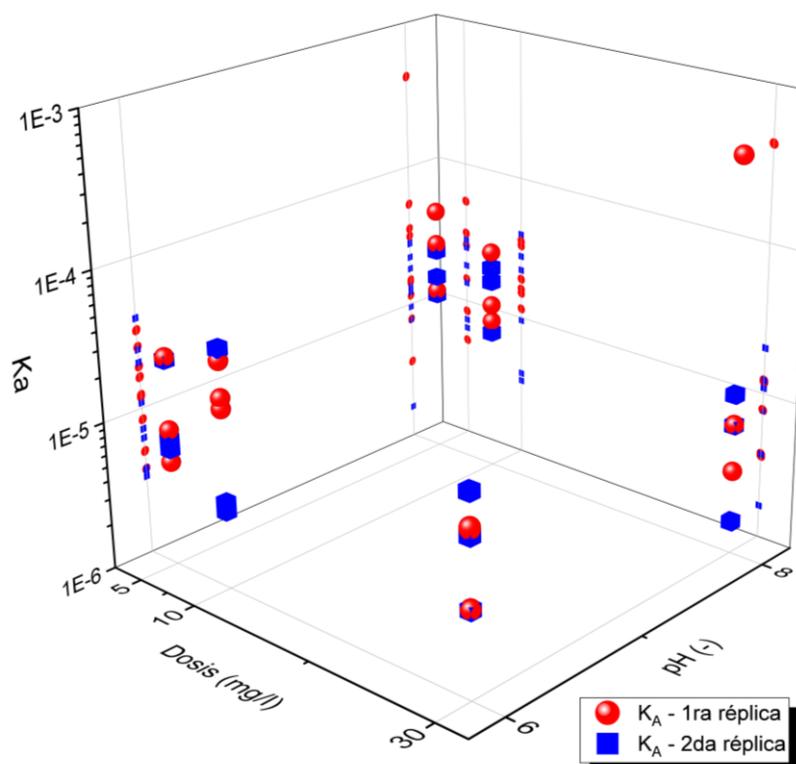
**Figura 44:** Mapa de superficies para el cloruro férrico con respecto a la dosis, pH e índice de floculación, para T=20 minutos.



**Fuente:** Propio

Por otro lado, la Figura 45, muestra la variación que se produce en  $K_A$  en función del pH y la dosis, para ambas réplicas, cuando se emplea sulfato de aluminio. Las esferas de color rojo representan los datos correspondientes a la primera réplica y los cubos de color azul representan los datos de la segunda réplica; asimismo, los círculos y cuadrados pequeños, son las proyecciones de los datos en los ejes X-Z e Y-Z, los que permiten visualizar con mayor detalle la variación en  $K_A$  tanto para la primera y segunda réplica.

**Figura 45:** Variación en  $K_A$  en función del pH y la dosis, tanto para la primera y segunda réplica, cuando se emplea sulfato de aluminio.

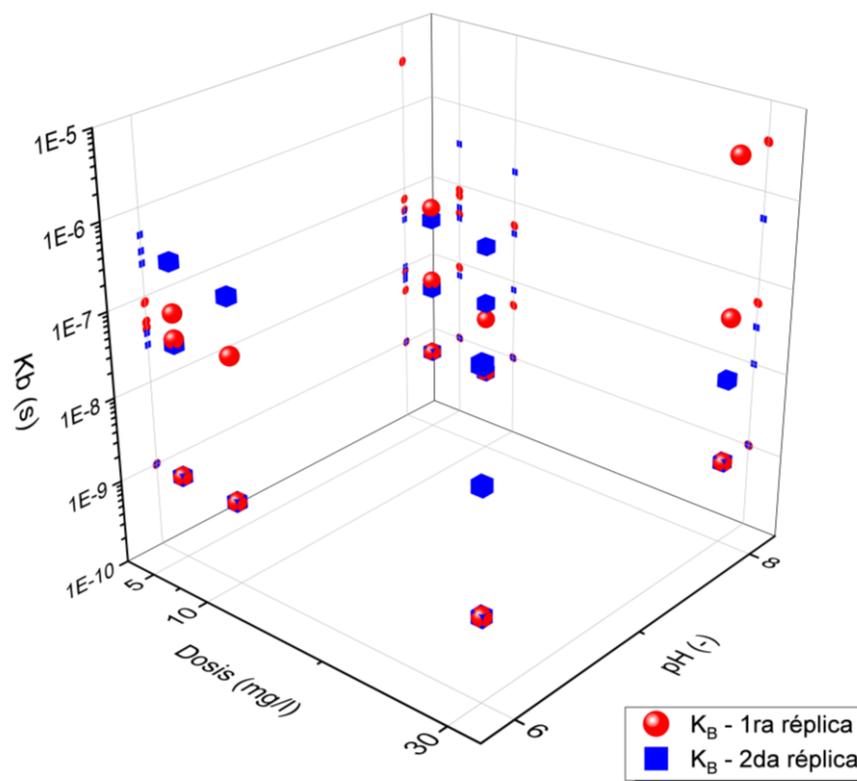


**Fuente:** Propio

Se observa que en general dosis de 5 y 10 mg/l y pH de 8.0 generan los mejores valores de las constantes cinéticas de agregación en comparación de la dosis de 30 mg/l y pH de 6.0, donde los valores de  $K_A$  son más pequeñas. Además, se observa que valores de  $K_A$  fueron relativamente mayores en la primera réplica a comparación de lo obtenido en la segunda réplica, por lo que la variación de la concentración de partículas primarias tuvo un efecto sobre esta constante cinética.

En la Figura 46 se muestra la variación de los valores obtenidos de  $K_B$  en función de la dosis y el pH, tanto para la primera réplica como para la segunda réplica.

**Figura 46:** Variación en  $K_B$  en función del pH y la dosis, tanto para la primera y segunda réplica, cuando se emplea sulfato de aluminio.

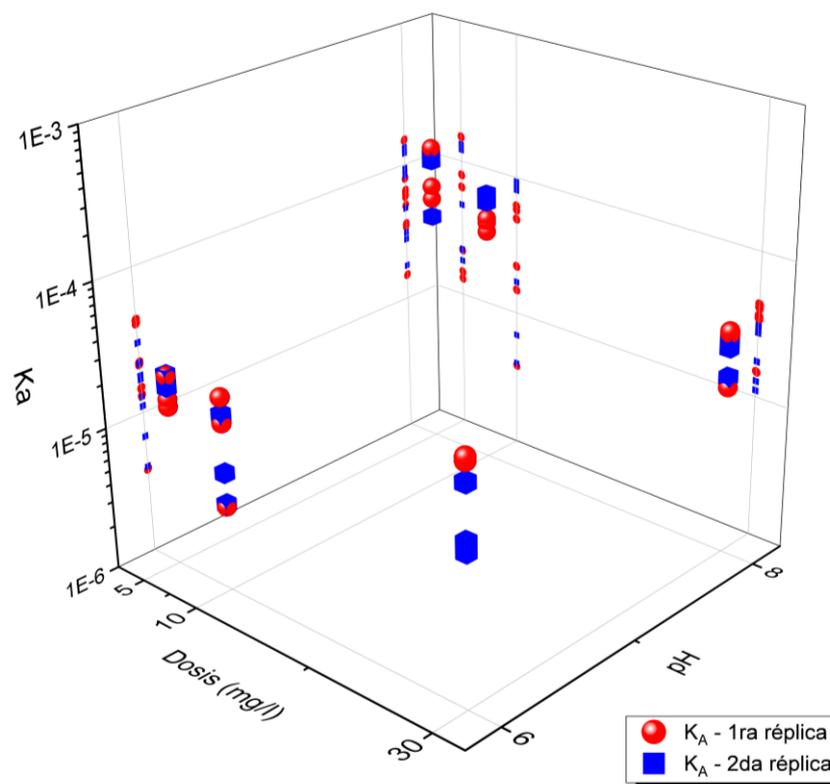


Fuente: Propio.

Se observa que en general que las tres dosis empleadas con un pH de 8.0 producen valores más bajos en  $K_B$  en comparación que con un pH de 6.0, en la que hay una mayor tendencia de que los valores de  $K_B$  se acerquen a un valor del orden de  $10^{-6}$ , el cual representa una tasa de ruptura bastante significativa.

En la Figura 47 se muestra la variación de  $K_A$  en función del pH y la dosis cuando se emplea cloruro férrico, tanto para la primera y segunda réplica.

**Figura 47:** Variación en  $K_A$  en función del pH y la dosis, tanto para la primera y segunda réplica, cuando se emplea cloruro férrico.

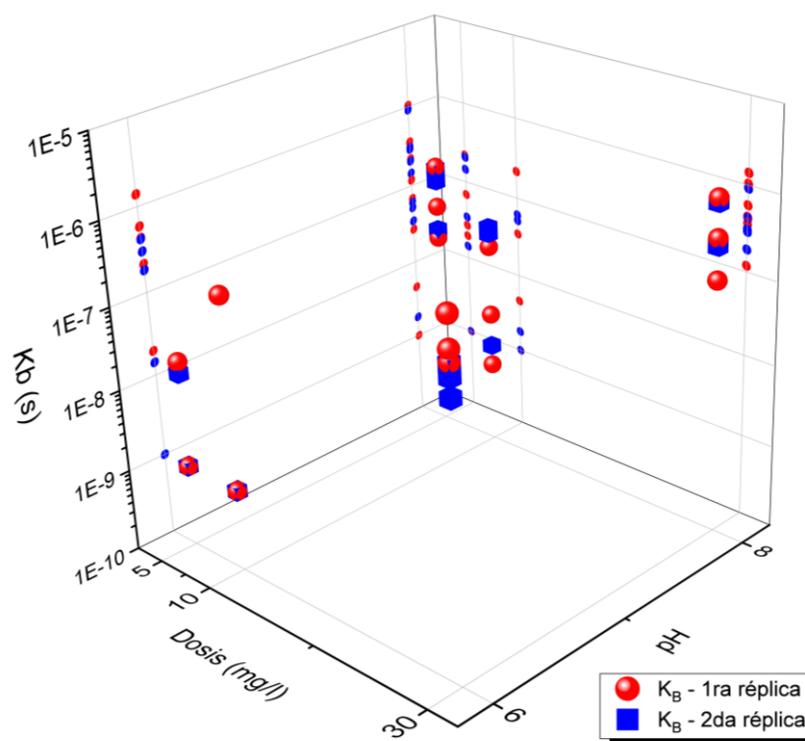


**Fuente:** Propio

Se observa que generalmente, dosis de 5 y 10 mg/l con un pH de 8.0 producen los mejores valores en  $K_A$ , a diferencia de la dosis de 30 mg/l y pH 6.0 que producen tasas de agregación más pequeñas. Además, se observa que la variación en  $K_A$  de una réplica a otra es relativamente pequeña, debido a que no hay mucha dispersión, lo que sugiere que la concentración de partículas primarias no ha tenido un efecto considerable en el caso del cloruro férrico para ninguna de las dosis y pH empleados.

En la Figura 48 se observa la variación en  $K_B$  en función de la dosis y pH para ambas réplicas.

**Figura 48:** Variación en  $K_B$  en función del pH y la dosis, tanto para la primera y segunda réplica, cuando se emplea cloruro férrico.



**Fuente:** Propio

Se observa que con una dosis de 30 mg/l tanto para el pH de 6.0 y 8.0 la variabilidad del valor de  $K_B$  es reducida, todos los valores obtenidos en estas condiciones se concentran por encima  $10^{-7}$  s hasta alcanzar  $10^{-6}$  s en algunos casos, los que representan tasas de ruptura considerables. Por otro lado, con dosis de 5 y 10 mg/l para ambos pH, los valores de  $K_B$  presentan una mayor dispersión, en estas condiciones se obtiene tasas de ruptura con valor de  $10^{-9}$  s hasta un valor de  $10^{-7}$  s.

#### 4.4. Efecto de las variables independientes sobre las constantes cinéticas de agregación y ruptura.

Una vez determinadas las constantes cinéticas de agregación y ruptura para todos los tratamientos estudiados, se procedió a evaluar estadísticamente si las variables independientes, es decir, el tipo de coagulante (sulfato de aluminio y cloruro férrico), pH, dosis y gradiente tienen efecto significativo sobre las constantes cinéticas de agregación y ruptura.

Para la prueba ANOVA, tal como lo realizado por Marques y Ferreira-Filho (2022), los valores obtenidos de las constantes cinéticas de agregación y ruptura se expresaron en forma logarítmica ( $\log_{10}$ ), debido a que la característica principal de estas constantes cinéticas es que son valores muy pequeños, que, si son analizados en su forma natural, no son apreciables la variabilidad de un valor a otro.

Cabe indicar que todos los análisis estadísticos se muestran a detalle en el anexo.

En primer lugar, se realizó la prueba ANOVA para el factor A: Tipo de coagulante con dos niveles: a1: Sulfato de aluminio y a2: Cloruro férrico, si tienen un efecto significativo sobre las constantes cinéticas de agregación y ruptura a un nivel de significancia  $\alpha=0.05$ , tal como se muestra a continuación:

**Tabla 11.** ANOVA de un solo factor:  $\log K_A$  Vs. Tipo de Coagulante

<b>Método</b>						
Hipótesis nula	Todas las medias son iguales					
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales					
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$					
<i>Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis</i>						
<b>Información del factor</b>						
Factor	Niveles	Valores				
Tipo de Coagulante	2	Cloruro férrico; Sulfato de aluminio				
<b>Análisis de Varianza</b>						
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p	
Tipo de Coagulante	1	2.204	2.2041	12.64	0.001	
Error	70	12.209	0.1744			
Total	71	14.413				

**Nota.** Análisis realizado en el programa Minitab.

**Fuente:** Propio

Se observa que el valor del estadístico  $p=0.001$  es menor que el nivel de significancia  $\alpha=0.05$ , por lo que se concluye que el tipo de coagulante tiene influencia significativa sobre  $K_A$ .

**Tabla 12.** ANOVA de un solo factor: log  $K_B$  Vs. Tipo de Coagulante

<b>Método</b>						
Hipótesis nula	Todas las medias son iguales					
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales					
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$					
<i>Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.</i>						
<b>Información del factor</b>						
<b>Factor</b>	<b>Niveles</b>	<b>Valores</b>				
Tipo de Coagulante	2	Cloruro férrico; Sulfato de aluminio				
<b>Análisis de Varianza</b>						
<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>	
Tipo de Coagulante	1	7.479	7.479	6.61	0.012	
Error	70	79.248	1.132			
Total	71	86.727				

**Nota.** Análisis realizado en el programa Minitab.

**Fuente:** Propio

Se observa que el valor del estadístico  $p=0.012$  es menor que el nivel de significancia  $\alpha=0.05$ , por lo que se concluye que el tipo de coagulante tiene influencia significativa sobre  $K_B$ .

#### 4.4.1. Contrastación de la hipótesis específica 1:

Se someten a prueba las siguientes hipótesis nula y alternativa:

$H_0$ : *El sulfato de aluminio y cloruro férrico no influyen significativamente sobre las constantes cinéticas de agregación y ruptura, en la floculación de las aguas del río Marcará, usando sulfato de aluminio y cloruro férrico – 2021.*

$H_a$ : *El sulfato de aluminio y cloruro férrico influyen significativamente sobre las constantes cinéticas de agregación y ruptura, en la floculación de las aguas del río Marcará, usando sulfato de aluminio y cloruro férrico – 2021.*

Tal como se determinó en las pruebas de varianza mostradas en la Tabla 11 y Tabla 12, los valores del estadístico  $p$  tiene un valor de 0.001 para  $K_A$  y de 0.012 para  $K_B$ , por lo que se rechaza la hipótesis

nula y se acepta la hipótesis alternativa que establece que el tipo de coagulante influye significativamente sobre las constantes cinéticas.

Por otro lado, se realizó la prueba ANOVA para los factores: **pH**, con dos niveles: 6.0 y 8.0; **dosis**, con tres niveles: 5, 10 y 30 mg/l y **gradiente**, con tres niveles: 30, 60 y 100 s<sup>-1</sup>, para evaluar si dichas variables tienen un efecto significativo sobre las constantes cinéticas de agregación y ruptura a un nivel de significancia  $\alpha=0.05$ , tal como se muestra a continuación:

**Tabla 13.** ANOVA de tres factores: log K<sub>A</sub> Vs. pH; Dosis; Gradiente.

<b>Información del factor</b>					
<b>Factor</b>	<b>Niveles</b>	<b>Valores</b>			
pH	2	6; 8			
Dosis	3	5; 10; 30			
Gradiente	3	30; 60; 100			
<b>Análisis de Varianza</b>					
<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Modelo	17	6.5314	0.3842	2.63	0.004
Lineal	5	3.2110	0.6422	4.40	0.002
pH	1	2.3559	2.3559	16.14	0.000
Dosis	2	0.4636	0.2318	1.59	0.214
Gradiente	2	0.3915	0.1957	1.34	0.270
Interacciones de 2 términos	8	2.1660	0.2708	1.86	0.087
pH*Dosis	2	0.8956	0.4478	3.07	0.055
pH*Gradiente	2	0.3035	0.1517	1.04	0.361
Dosis*Gradiente	4	0.9670	0.2417	1.66	0.174
Interacciones de 3 términos	4	1.1543	0.2886	1.98	0.111
pH*Dosis*Gradiente	4	1.1543	0.2886	1.98	0.111
Error	54	7.8816	0.1460		
Total	71	14.4131			

**Nota.** Análisis realizado en el programa Minitab.

**Fuente:** Propio

Se observa que de forma independiente solo el pH tiene un efecto muy significativo sobre K<sub>A</sub>, en cambio la dosis y la gradiente no han mostrado tener un efecto significativo. Asimismo, la interacción del pH con la dosis tiene un valor del estadístico p de 0.055, valor muy cercano al nivel de significancia 0.05, por lo que están muy cerca de ser estadísticamente significativos; la interacción del pH con la gradiente y la dosis con la

gradiente tampoco son significativas. Finalmente, la interacción del pH con la dosis y la gradiente no es significativa.

**Tabla 14.** ANOVA de tres factores: log  $K_B$  Vs. pH; Dosis; Gradiente.

<b>Información del factor</b>						
<b>Factor</b>	<b>Niveles</b>	<b>Valores</b>				
pH	2	6; 8				
Dosis	3	5; 10; 30				
Gradiente	3	30; 60; 100				
<b>Análisis de Varianza</b>						
<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>	
Modelo	17	26.1361	1.5374	1.37	0.188	
Lineal	5	16.8061	3.3612	3.00	0.019	
pH	1	1.8017	1.8017	1.61	0.211	
Dosis	2	14.5332	7.2666	6.48	0.003	
Gradiente	2	0.4712	0.2356	0.21	0.811	
Interacciones de 2 términos	8	5.9921	0.7490	0.67	0.718	
pH*Dosis	2	0.6107	0.3053	0.27	0.763	
pH*Gradiente	2	1.9342	0.9671	0.86	0.428	
Dosis*Gradiente	4	3.4472	0.8618	0.77	0.551	
Interacciones de 3 términos	4	3.3378	0.8345	0.74	0.566	
pH*Dosis*Gradiente	4	3.3378	0.8345	0.74	0.566	
Error	54	60.5911	1.1221			
Total	71	86.7272				

**Nota.** Análisis realizado en el programa Minitab.

**Fuente:** Propio

Se observa que de forma individual solo la dosis tiene un efecto significativo sobre  $K_B$ , en cambio el pH y la gradiente no muestran tener efecto significativo, además la interacción del pH con la dosis, pH con la gradiente y dosis con la gradiente, tampoco influyen significativamente sobre la constante cinética de ruptura. Finalmente, la interacción de las tres variables, es decir, pH con la dosis y la gradiente tampoco influye significativamente sobre  $K_B$ .

#### 4.4.2. Contrastación de la hipótesis específica 2:

Se someten a prueba las siguientes hipótesis nula y alternativa:

*Ho: El pH no influye significativamente sobre las constantes cinéticas de agregación y ruptura, en la floculación de las aguas del río Marcará, usando sulfato de aluminio y cloruro férrico – 2021.*

*Ha: El pH influye significativamente sobre las constantes cinéticas de agregación y ruptura, en la floculación de las aguas del río Marcará, usando sulfato de aluminio y cloruro férrico – 2021.*

De acuerdo con las pruebas ANOVA mostradas en Tabla 13 y Tabla 14, el pH tiene un efecto significativo sobre la constante cinética de agregación ya que el valor del estadístico p es de 0.000 menor al nivel de significancia  $\alpha=0.05$ . Por otro lado, el pH no tiene un efecto significativo sobre la constante cinética de ruptura, ya que el valor del estadístico p es de 0.211, mayor al nivel de significancia  $\alpha=0.05$ .

En ese sentido se acepta la hipótesis alternativa, que establece que existe una influencia significativa del pH sobre  $K_A$ . Con respecto a la constante cinética de ruptura, se acepta la hipótesis nula, que establece que no existe un efecto significativo del pH sobre  $K_B$

#### **4.4.3. Contrastación de la hipótesis específica 3:**

Se someten a prueba las siguientes hipótesis nula y alternativa:

*Ho: La dosis no influye significativamente sobre las constantes cinéticas de agregación y ruptura, en la floculación de las aguas del río Marcará, usando sulfato de aluminio y cloruro férrico – 2021.*

*Ha: La dosis influye significativamente sobre las constantes cinéticas de agregación y ruptura, en la floculación de las aguas del río Marcará, usando sulfato de aluminio y cloruro férrico – 2021.*

De acuerdo con las pruebas ANOVA mostradas en la Tabla 13 y Tabla 14, la dosis no tiene un efecto significativo sobre  $K_A$ , ya que el valor del estadístico p es de 0.214 mayor al nivel de significancia  $\alpha=0.05$ . Por otro lado, la dosis si tiene un efecto significativo sobre  $K_B$ , ya que el valor del estadístico p es de 0.003, menor al nivel de significancia  $\alpha=0.05$ .

En ese sentido se acepta la hipótesis nula, que establece que no existe una influencia significativa de la dosis sobre  $K_A$ . Sin embargo, se acepta la hipótesis alternativa, que establece que si existe una influencia significativa de la dosis sobre  $K_B$ .

#### 4.4.4. Contrastación de la hipótesis específica 4:

Se someten a prueba las siguientes hipótesis nula y alternativa:

*Ho: La gradiente no influye significativamente sobre las constantes cinéticas de agregación y ruptura, en la floculación de las aguas del río Marcará, usando sulfato de aluminio y cloruro férrico – 2021.*

*Ha: La gradiente influye significativamente sobre las constantes cinéticas de agregación y ruptura, en la floculación de las aguas del río Marcará, usando sulfato de aluminio y cloruro férrico – 2021.*

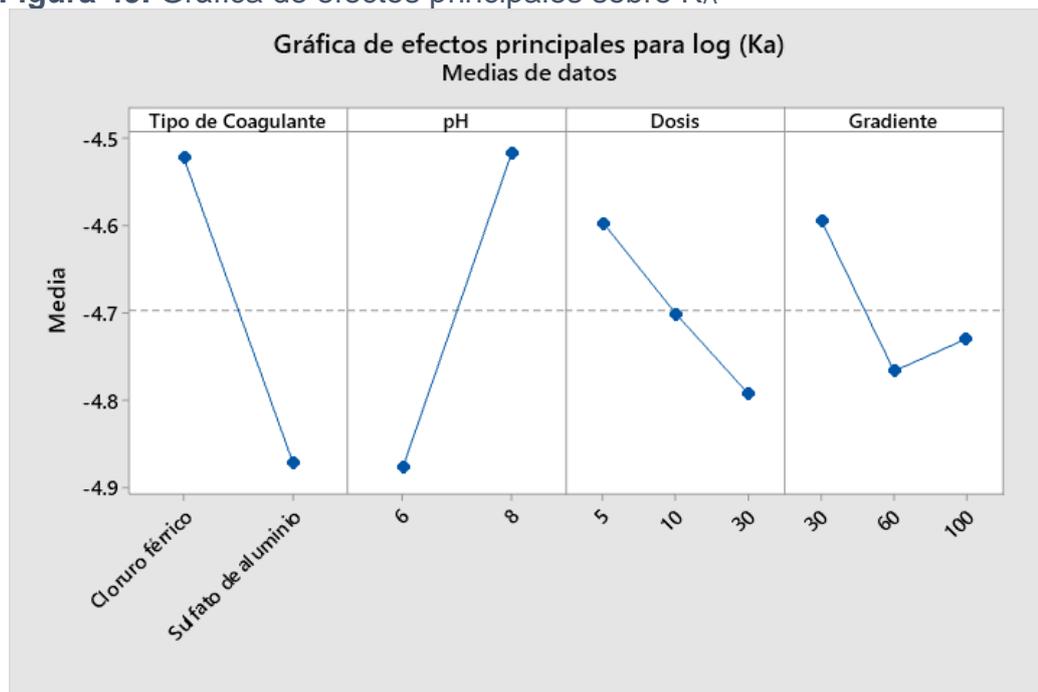
De acuerdo con las pruebas ANOVA mostradas en la Tabla 13 y Tabla 14, la gradiente no tiene un efecto significativo sobre  $K_A$  y  $K_B$ , debido que el valor del estadístico p son de 0.270 y de 0.811 respectivamente, es decir mayores al nivel de significancia  $\alpha=0.05$

En ese sentido se acepta la hipótesis nula, que establece que no existe una influencia significativa de la gradiente con respecto a  $K_A$  y  $K_B$ .

Asimismo, de acuerdo con las pruebas ANOVA mostradas en la Tabla 13 y Tabla 14, el valor del estadístico p para la interacción de los factores pH-Dosis, pH-Gradiente y pH-Dosis-Gradiente, es mayor al valor de significancia  $\alpha=0.05$ , tanto para  $K_A$  y para  $K_B$ , por lo que no influyen significativamente sobre las constantes cinéticas. Asimismo, existe la particularidad de que la interacción pH-Dosis tiene un estadístico p de 0.055 para el caso de  $K_A$ , por lo que está muy cerca de ser estadísticamente significativa, sin embargo, a un valor de significancia 0.05 no lo es. Finalmente, la interacción del pH-Dosis-Gradiente tiene un valor de p mayor al valor de significancia  $\alpha=0.05$ , por lo que tampoco tiene una influencia significativa sobre  $K_A$  y  $K_B$ .

Entonces, los análisis de varianza realizados han mostrado que estadísticamente solo el pH y la dosis son significativos de forma independiente y tienen una influencia directa sobre las constantes cinéticas. Al respecto la Figura 49 muestra la gráfica de efectos principales del tipo de coagulante, pH, dosis y gradiente sobre  $K_A$ .

**Figura 49.** Gráfica de efectos principales sobre  $K_A$

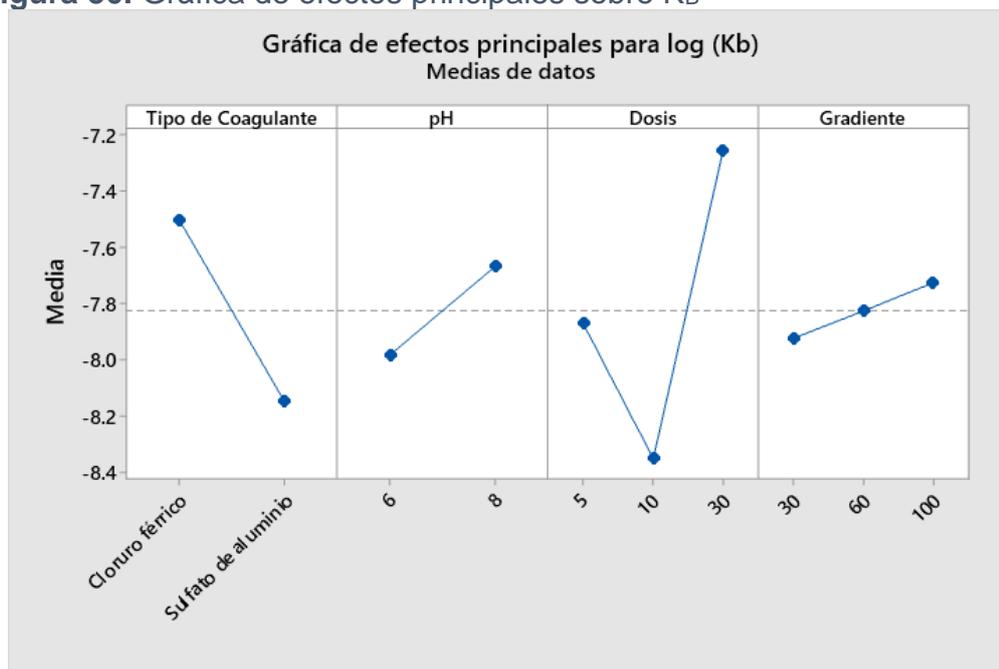


**Fuente:** Propio

Se observa que, en cuanto al tipo de coagulante, el cloruro férrico tiene una media superior al del sulfato de aluminio, por lo que se comprueba que efectivamente el tipo de coagulante influye significativamente sobre  $K_A$ . Asimismo, el pH es otra variable que tiene un efecto considerable sobre  $K_A$ , un pH de 8.0 produce una media mayor a lo que se obtiene con pH de 6.0. por otro lado, la variación en las medias de las variables dosis y gradiente no son tan pronunciadas y no son estadísticamente significativas.

La Figura 50, muestra la gráfica de efectos principales del tipo de coagulante, pH, dosis y gradiente sobre  $K_B$ .

**Figura 50.** Gráfica de efectos principales sobre  $K_B$



**Fuente:** Propio

Se observa que al igual para  $K_A$ , el efecto del tipo de coagulante es significativa sobre  $K_B$ , ya que se observa que la media es mayor con cloruro férrico, además se observa que el efecto de la dosis es notoriamente significativo, especialmente una dosis de 30 mg/l producen valores en  $K_B$  más grandes con respecto a las dosis de 5 y 10 mg/l. Finalmente las variables pH y gradiente si bien es cierto se observa una pequeña variación en sus respuestas en cada uno de sus niveles, estos no son estadísticamente significativos.

#### 4.5. Comportamiento de un reactor de floculación de acuerdo con las constantes cinéticas de agregación y ruptura.

Una de aplicaciones prácticas de las constantes cinéticas determinadas para un tipo de agua, dosis y pH en particular, es que permite estudiar el comportamiento de un reactor de mezcla completa y flujo continuo (CSTR) para la floculación del agua en estudio. El estudio se basa en el modelo desarrollado por Argaman y Kaufman, el cual se muestra en la ecuación 66 para el caso particular en las que se consideren un perfil de gradientes de forma escalonada en cada cámara del reactor o el modelo mostrado en la

ecuación 34 para el caso particular en la que la gradiente se mantiene constante en las cámaras (compartimientos).

El estudio del comportamiento de un reactor CSTR para la floculación de las aguas del río Marcará se han hecho para la condición en la que se obtuvieron mejores tasas de agregación, los cuales corresponden a un pH de 8.0, una dosis de 5 mg/l y tanto para el sulfato de aluminio y cloruro férrico. Además, se consideraron valores de  $K_A$  y  $K_B$  correspondientes a la condición más desfavorable, es decir a la primera réplica en la que el agua presentó mayor concentración de partículas primarias, por ser época de lluvia.

**Tabla 15:** Valores de  $K_A$  y  $K_B$  para una dosis de 5mg/l, pH 8.0, correspondientes a la primera réplica.

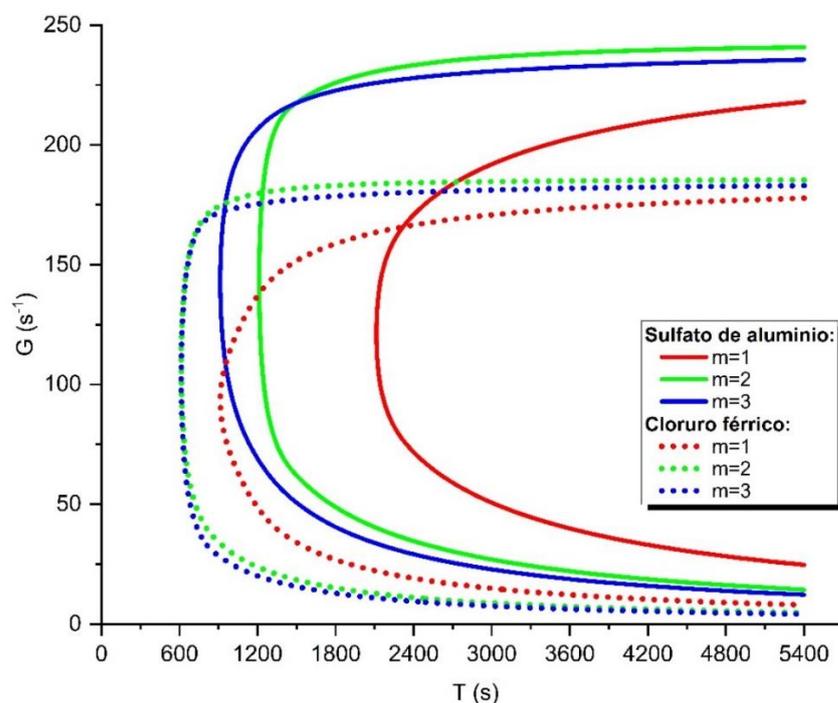
Tipo de coagulante	pH	Dosis	Gradiente	$K_A$	$K_B$
Sulfato de aluminio	8.0	5 mg/l	30 s <sup>-1</sup>	3.17x10 <sup>-5</sup>	1.00x10 <sup>-9</sup> s
			60 s <sup>-1</sup>	5.40x10 <sup>-5</sup>	7.30x10 <sup>-8</sup> s
			100 s <sup>-1</sup>	1.46x10 <sup>-5</sup>	8.69x10 <sup>-9</sup> s
Cloruro férrico	8.0	5 mg/l	30 s <sup>-1</sup>	1.50x10 <sup>-4</sup>	2.21x10 <sup>-7</sup> s
			60 s <sup>-1</sup>	6.45x10 <sup>-5</sup>	2.70x10 <sup>-8</sup> s
			100 s <sup>-1</sup>	7.91x10 <sup>-5</sup>	6.83x10 <sup>-8</sup> s

**Fuente:** Propio.

Primero se graficaron tiempo versus gradiente en función de los valores de  $K_A$  y  $K_B$  considerando que se debe de alcanzar una eficiencia de 80%, es decir  $N_0/N_m=5$ . Esto se logra empleando la ecuación 34 y a través de un proceso de iteración (el que se muestra a detalle en el anexo) se establece el valor de las gradientes para cada tiempo.

En la Figura 51 se muestra la gráfica entre el tiempo y la gradiente para un reactor CSTR con “m” compartimientos, para obtener una eficiencia de 80% ( $R=5$ ), teniendo en cuenta valores promedio de  $K_A$  y  $K_B$  tanto para el sulfato de aluminio y cloruro férrico.

**Figura 51:** Gráfica que relaciona tiempo con gradiente para un reactor CSTR con “m” compartimientos.



**Fuente:** Propio

Se observa que para el sulfato de aluminio en el caso en la que el reactor tenga una sola cámara no existe ningún mecanismo de agregación para tiempos por debajo de 2,100 s (35 min) a diferencia del caso del cloruro férrico que el mecanismo de agregación ocurre a partir de un tiempo de 900 s (15 min). En el caso de usar 2 o 3 cámaras se observa que, para el caso del sulfato de aluminio, el tiempo mínimo a partir del cual ocurre formación de flocs se reduce a 1,200 y 900 s respectivamente, y para el caso del cloruro férrico, cuando se usan 2 y 3 compartimientos el tiempo se reduce a 600 s (10 min). Este comportamiento del reactor muestra que la compartimentalización en un reactor reduce significativamente el tiempo mínimo a partir del cual ocurre el mecanismo de floculación.

Asimismo, se determinó el tiempo requerido para alcanzar una eficiencia de 75%, 80% y 90% es decir para  $R=4$ ,  $R=5$  y  $R=10$ , para la floculación de las aguas del río Marcará tanto para el sulfato de aluminio y cloruro férrico, consideran de uno a tres compartimientos y para las tres gradientes estudiadas.

**Tabla 16:** Tiempo de floculación total (T) como función de la gradiente de velocidad y número de compartimientos, para una eficiencia de 75% (R=4)

Tipo de coagulante	G (s <sup>-1</sup> )	R	T (min) m=1	T (min) m=2	T (min) m=3
Sulfato de aluminio	30	4	52.78	35.14	30.96
	60	4	22.84	13.71	11.71
	100	4	44.95	27.90	24.07
Cloruro férrico	30	4	13.50	8.56	7.43
	60	4	14.36	9.32	8.15
	100	4	9.66	5.74	4.89

**Fuente:** Propio

Se observa que para una eficiencia de 75%, el cloruro férrico requiere menor tiempo de floculación con respecto al sulfato de aluminio, independientemente del número de compartimientos. Específicamente con gradientes de 30 y 100 s<sup>-1</sup> se requieren los menores tiempos de detención, tal que, si se emplea un reactor con tres compartimientos (m=3) y una gradiente de 30 s<sup>-1</sup> el tiempo requerido es de 7.43 min y con una gradiente de 100 s<sup>-1</sup> el tiempo se reduce a 4.89 min.

**Tabla 17:** Tiempo de floculación total (T) como función de la gradiente de velocidad y número de compartimientos, para una eficiencia de 80% (R=5)

Tipo de coagulante	G (s <sup>-1</sup> )	R	T (min) m=1	T (min) m=2	T (min) m=3
Sulfato de aluminio	30	5	70.43	43.47	37.44
	60	5	34.61	18.31	15.08
	100	5	65.01	36.24	30.30
Cloruro férrico	30	5	19.02	10.94	9.23
	60	5	19.70	11.72	9.99
	100	5	14.83	7.73	6.34

**Fuente:** Propio

Se observa que para una eficiencia de 80%, el cloruro férrico requiere menor tiempo de floculación con respecto al sulfato de aluminio,

independientemente del número de compartimientos. Específicamente con gradientes de 30 y 100 s<sup>-1</sup> se requieren los menores tiempos de detención, tal que, si se emplea un reactor con tres compartimientos (m=3) y una gradiente de 30 s<sup>-1</sup> el tiempo requerido es de 9.23 min y con una gradiente de 100 s<sup>-1</sup> el tiempo se reduce a 6.34 min.

**Tabla 18:** Tiempo de floculación total (T) como función de la gradiente de velocidad y número de compartimientos, para una eficiencia de 90% (R=10)

Tipo de coagulante	G (s <sup>-1</sup> )	R	T (min) m=1	T (min) m=2	T (min) m=3
Sulfato de aluminio	30	10	159.23	76.26	61.02
	60	10	245.10	61.47	40.90
	100	10	253.81	87.22	63.47
Cloruro férrico	30	10	59.74	23.25	17.53
	60	10	51.76	22.46	17.47
	100	10	138.89	30.26	19.34

**Fuente:** Propio

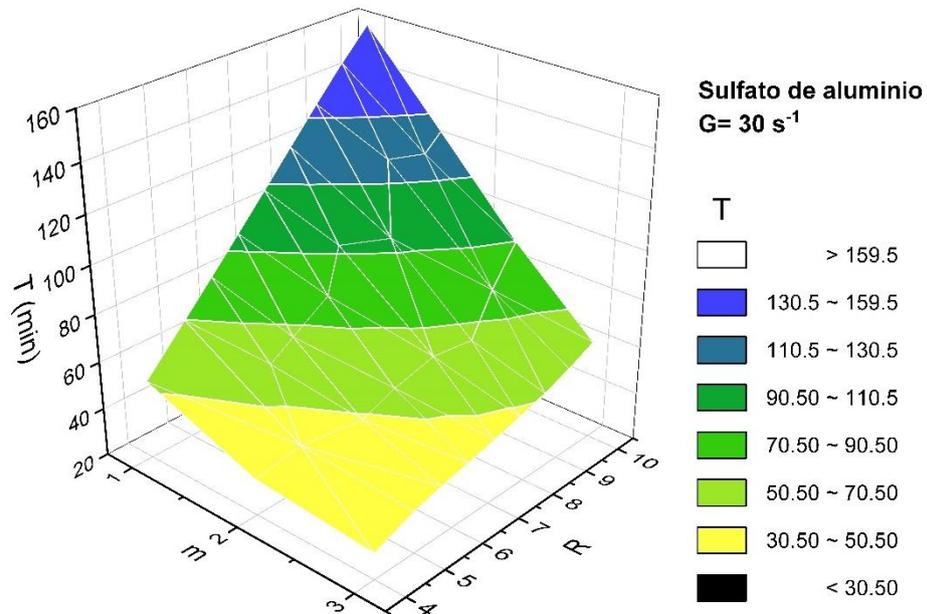
Se observa que para una eficiencia de 90%, el cloruro férrico requiere menor tiempo de floculación con respecto al sulfato de aluminio, independientemente del número de compartimientos. Específicamente con gradientes de 30 y 60 s<sup>-1</sup> se requieren los menores tiempos de detención, tal que, si se emplea un reactor con tres compartimientos (m=3) y una gradiente de 30 s<sup>-1</sup> el tiempo requerido es de 17.53 min y con una gradiente de 60 s<sup>-1</sup> el tiempo se reduce a 17.47 min.

Por otro lado, teniendo los valores de los tiempos de detención necesarios para alcanzar una eficiencia R, en un reactor CSTR de 1 a 3 compartimientos y para las tres gradientes de floculación estudiados, se graficaron valores de m vs R vs T en una gráfica de superficie que permite explicar de forma gráfica el comportamiento del reactor.

En la Figura 52 se muestra una gráfica de la simulación del tiempo de detención total (T) en reactores en serie (m=1, 2 y 3) para varias eficiencias

de floculación expresado como R, para una gradiente de velocidad de  $30 \text{ s}^{-1}$  y cuando se usa sulfato de aluminio.

**Figura 52:** Comportamiento de un floculador CSTR con m compartimientos cuando se emplea sulfato de aluminio y gradiente de  $30 \text{ s}^{-1}$ .

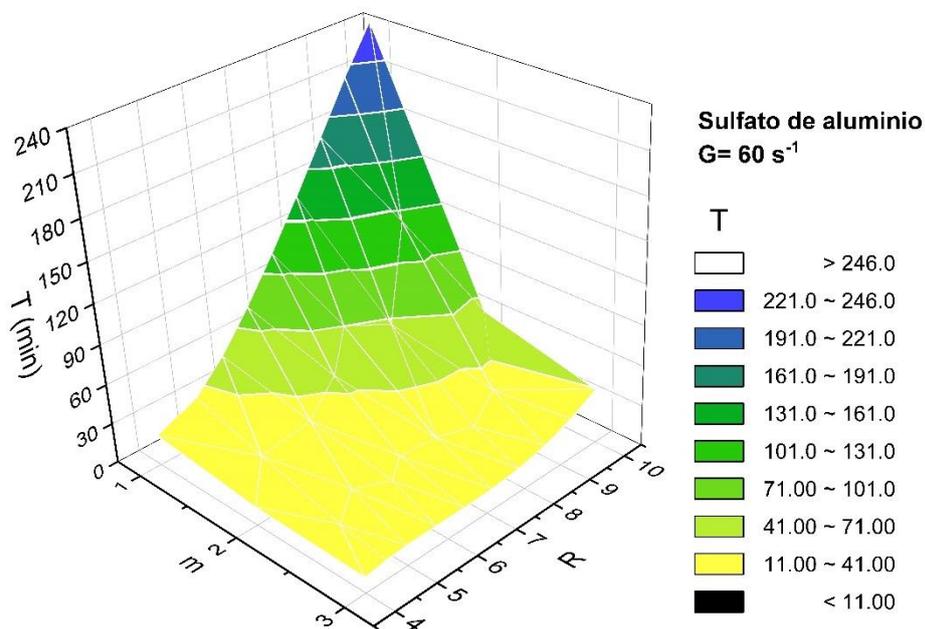


**Fuente:** Propio

Se observa que los menores tiempos de detención se concentran en  $m=3$  para cualquier valor de R, es decir la compartimentalización influye directamente en la reducción del tiempo T requerido para lograr una eficiencia R determinada. La pendiente de la superficie es considerablemente pronunciada por lo que la compartimentalización es significativa y también las eficiencias estudiadas afecta al tiempo mínimo requerido, cuanto mayor eficiencia se requiera el tiempo mínimo necesario se incrementa.

También en la Figura 53 se muestra una gráfica de la simulación del tiempo de detención total (T) en reactores en serie ( $m=1, 2$  y  $3$ ) para varias eficiencias de floculación expresado como R, para una gradiente de velocidad de  $60 \text{ s}^{-1}$  y cuando se usa sulfato de aluminio.

**Figura 53:** Comportamiento de un floculador CSTR con  $m$  compartimientos cuando se emplea sulfato de aluminio y gradiente de  $60 \text{ s}^{-1}$ .

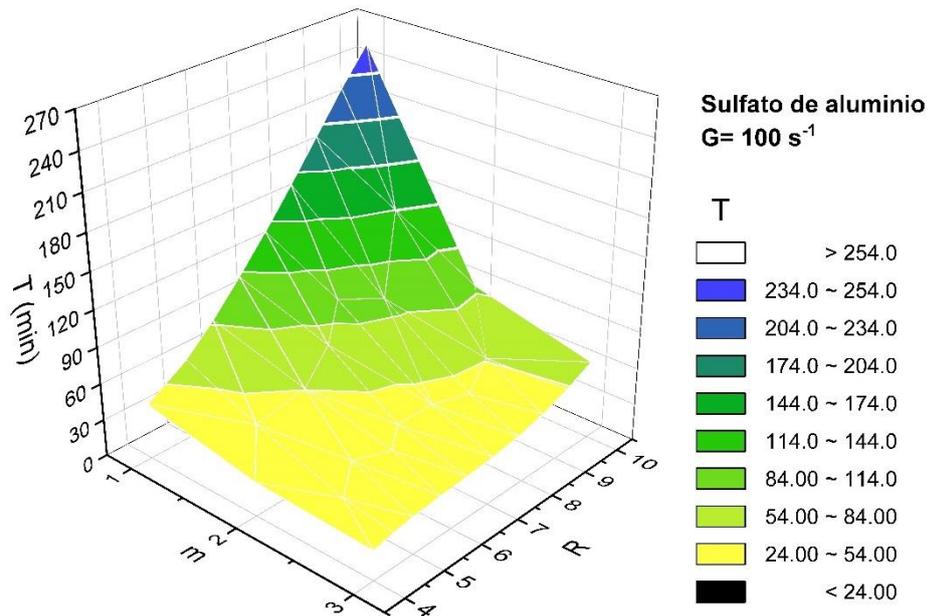


**Fuente:** Propio

Se observa que los menores tiempos de detención se concentran en  $m=3$  para cualquier valor de  $R$ , es decir la compartimentalización influye directamente en la reducción del tiempo  $T$  requerido para lograr una eficiencia  $R$  determinada. En este caso la pendiente es menos pronunciada para periodos de 11 a 41 min, aun así, la compartimentalización y el valor de la eficiencia afectan el tiempo mínimo requerido, tal que si se usara un solo compartimiento y una eficiencia deseada de  $R=10$  (90%), se requeriría al menos tiempos de hasta 221 m.

En la Figura 54 se muestra una gráfica de la simulación del tiempo de detención total ( $T$ ) en reactores en serie ( $m=1, 2$  y  $3$ ) para varias eficiencias de floculación expresado como  $R$ , para una gradiente de velocidad de  $100 \text{ s}^{-1}$  y cuando se usa sulfato de aluminio.

**Figura 54:** Comportamiento de un floculador CSTR con  $m$  compartimentos cuando se emplea sulfato de aluminio y gradiente de  $100 \text{ s}^{-1}$ .

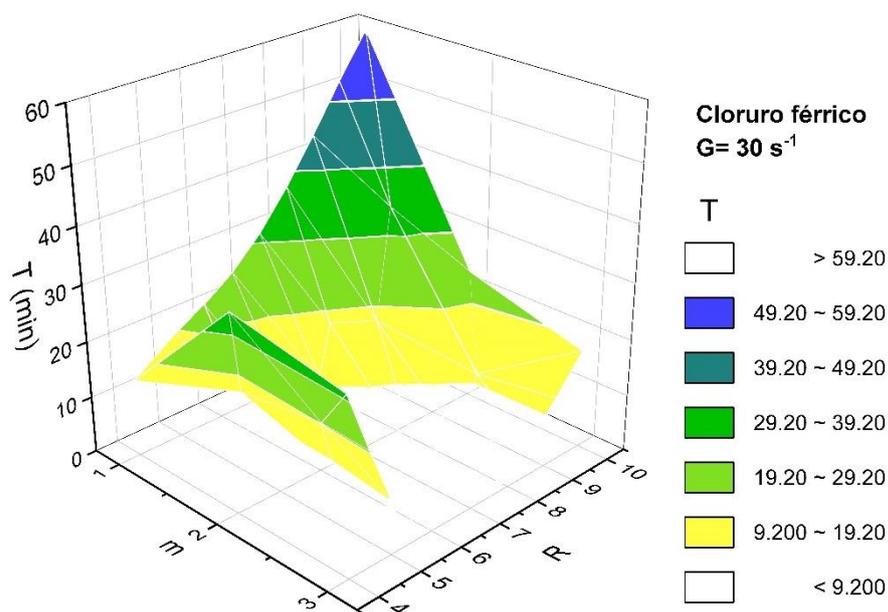


**Fuente:** Propio

Se observa que los menores tiempos de detención se concentran en  $m=3$  para cualquier valor de  $R$ , es decir la compartimentalización influye directamente en la reducción del tiempo  $T$  requerido para lograr una eficiencia  $R$  determinada. Además, se observa que el tiempo mínimo requerido para lograr la eficiencia más baja analizada, es decir  $R=4$  (75%), es al menos 24 min, mientras que para esa misma eficiencia con una gradiente de  $60 \text{ s}^{-1}$  requería un tiempo de al menos 11 min, y con una gradiente de  $30 \text{ s}^{-1}$  el tiempo es de al menos de 30 min.

En la Figura 55 se muestra una gráfica de la simulación del tiempo de detención total ( $T$ ) en reactores en serie ( $m=1, 2$  y  $3$ ) para varias eficiencias de floculación expresado como  $R$ , para una gradiente de velocidad de  $30 \text{ s}^{-1}$  y cuando se usa cloruro férrico.

**Figura 55:** Comportamiento de un floculador CSTR con  $m$  compartimentos cuando se emplea cloruro férrico y gradiente de  $30 \text{ s}^{-1}$ .

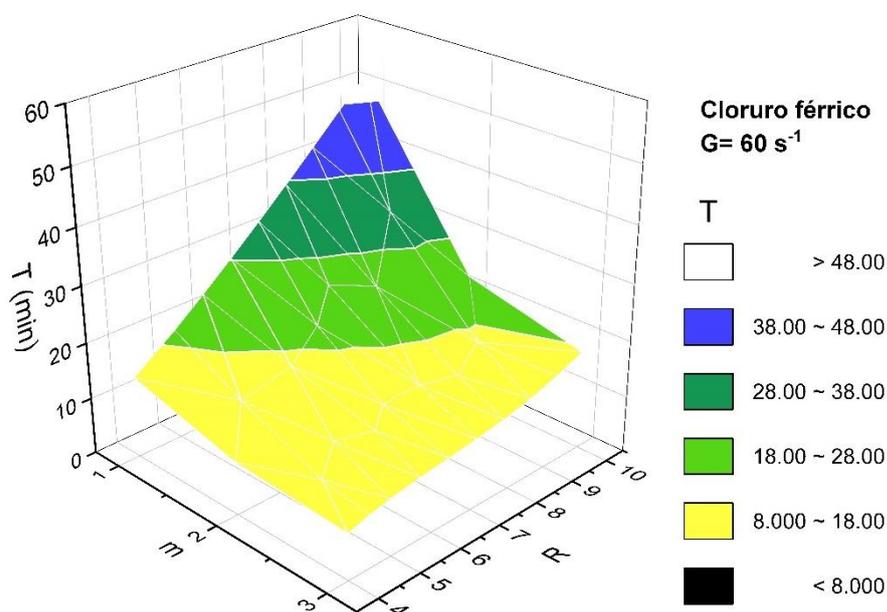


**Fuente:** Propio

Se observa que los menores tiempos de detención se concentran en  $m=3$  para cualquier valor de  $R$ , es decir la compartimentalización influye directamente en la reducción del tiempo  $T$  requerido para lograr una eficiencia  $R$  determinada. Sin embargo, aquí se identifica que la variación del tiempo para uno o más compartimentos no es tan pronunciada como las que se observó con el sulfato de aluminio y además el tiempo mínimo para logra una eficiencia “ $R$ ” es significativamente menor con el cloruro férrico, tal que un tiempo de 9.20 min es suficiente para lograr una eficiencia de  $R=4$  (75%) al usar tres cámaras en el reactor.

En la Figura 56 se muestra una gráfica de la simulación del tiempo de detención total ( $T$ ) en reactores en serie ( $m=1, 2$  y  $3$ ) para varias eficiencias de floculación expresado como  $R$ , para una gradiente de velocidad de  $60 \text{ s}^{-1}$  y cuando se usa cloruro férrico.

**Figura 56:** Comportamiento de un floculador CSTR con  $m$  compartimientos cuando se emplea cloruro férrico y gradiente de  $60 \text{ s}^{-1}$ .

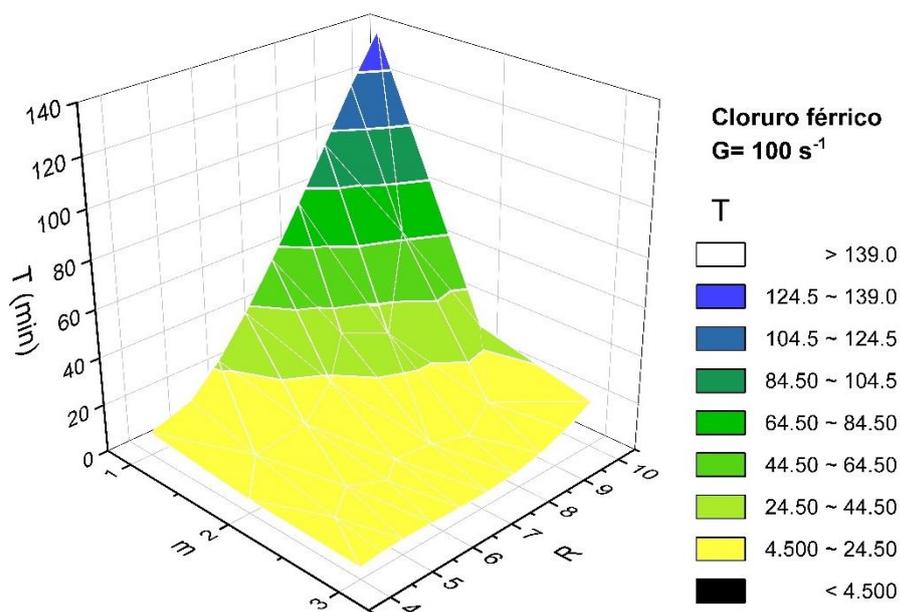


**Fuente:** Propio

Se observa que los menores tiempos de detención se concentran en  $m=3$  para cualquier valor de  $R$ , es decir la compartimentalización influye directamente en la reducción del tiempo  $T$  requerido para lograr una eficiencia  $R$  determinada. Además, se observa que el tiempo mínimo requerido al emplear tres cámaras para la eficiencia más baja, es decir 75%, es de al menos 8 min, ligeramente inferior al que se obtendría con una gradiente de  $30 \text{ s}^{-1}$ , además en el peor de los escenarios, es decir, una sola cámara y para una eficiencia de 90% se requiere un tiempo de al menos de 38 min, mientras que con una gradiente de  $30 \text{ s}^{-1}$  este tiempo es de al menos 49.20 min.

En la Figura 57 se muestra una gráfica de la simulación del tiempo de detención total ( $T$ ) en reactores en serie ( $m=1, 2$  y  $3$ ) para varias eficiencias de floculación expresado como  $R$ , para una gradiente de velocidad de  $100 \text{ s}^{-1}$  y cuando se usa cloruro férrico.

**Figura 57:** Comportamiento de un floculador CSTR con  $m$  compartimentos cuando se emplea cloruro férrico y gradiente de  $100 \text{ s}^{-1}$ .



**Fuente:** Propio

Se observa que los menores tiempos de detención se concentran en  $m=3$  para cualquier valor de  $R$ , es decir la compartimentalización influye directamente en la reducción del tiempo  $T$  requerido para lograr una eficiencia  $R$  determinada. Además, se observa que el tiempo mínimo requerido al emplear tres cámaras para la eficiencia más baja, es decir 75%, es de al menos 4.5 min, inferior al que se obtendría con una gradiente de  $30$  y  $60 \text{ s}^{-1}$ , además en el peor de los escenarios, es decir, una sola cámara y para una eficiencia de 90% se requiere un tiempo de al menos de 139 min, mientras que con una gradiente de  $30$  y  $60 \text{ s}^{-1}$  este tiempo es de al menos 38 y 49.20 min, lo que demuestra que en tiempos largos una mayor gradiente es contraproducente.

Por otro lado, se hizo uso del modelo de Argaman y Kaufman expresado en la ecuación 65, para los casos en los que la gradiente varía de un compartimento (cámara) a otro. Para este caso solo se hizo el análisis para el cloruro férrico ya que con gradientes constantes a mostrado mejor desempeño que el sulfato de aluminio. Suponiendo un tiempo de floculación  $T=30$  min, que es un tiempo típico para unidades de floculación,

en la Tabla 19 se muestra la eficiencia alcanzada para diversos perfiles de gradientes. Cabe indicar que el procedimiento detallado de la determinación de estas eficiencias se muestra en el anexo.

**Tabla 19:** Eficiencia de un floculador CSTR para diversos perfiles de gradiente con uno a tres compartimientos, para un tiempo de floculación de 30 min.

m	Perfil de gradientes	Eficiencia total	Eficiencia Total
	G (s <sup>-1</sup> )	R	(%)
1	100	6.84	85.37 %
1	60	6.78	85.25 %
1	30	6.70	85.08 %
2	100 / 60	15.66	93.61 %
2	100 / 30	13.36	92.52 %
2	60 / 30	11.98	91.65 %
3	100 / 60 / 60	22.19	95.49 %
3	100 / 60 / 30	17.56	94.30 %
3	100 / 30 / 30	16.98	94.11 %
3	60 / 30 / 30	15.57	93.58 %

**Nota. (1)** Eficiencias para el cloruro férrico con dosis de 5 mg/l y pH de 8.0

**Fuente:** Propio

Se observa que las mejores eficiencias se obtienen al aplicar un perfil de gradientes de forma escalonada y empleando tres compartimientos, específicamente para perfil de gradientes de 100 / 60 / 60 se obtuvo una eficiencia de 95.49 % y con un perfil de gradientes de 100 / 60 / 30 se obtuvo una eficiencia de 94.30 %.

Finalmente se realizó una prueba t de student a un nivel de significancia  $\alpha=0.05$ , para ver si las eficiencias obtenidas al usar diferentes números de compartimientos son significativamente diferentes. En la Tabla 20 se muestra la prueba t para las eficiencias obtenidas con m=1 y m=2 y para las eficiencias obtenidas con m=2 y m=3.

**Tabla 20:** Prueba T Student para las eficiencias de floculación obtenidas con uno a tres compartimientos.

<p><b>Método</b>  <math>\mu_1</math>: media de R para m=1  <math>\mu_2</math>: media de R para m=2                      Diferencia: <math>\mu_1 - \mu_2</math></p> <p><b>Prueba</b>                      Hipótesis nula <math>H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0</math>                      Hipótesis alterna <math>H_1: \mu_1 - \mu_2 &lt; 0</math></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Valor T</th> <th>GL</th> <th>Valor p</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-6.43</td> <td>2</td> <td>0.012</td> </tr> </tbody> </table>	Valor T	GL	Valor p	-6.43	2	0.012	<p><b>Método</b>  <math>\mu_1</math>: media de R para m=2  <math>\mu_2</math>: media de R para m=3                      Diferencia: <math>\mu_1 - \mu_2</math></p> <p><b>Prueba</b>                      Hipótesis nula <math>H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0</math>                      Hipótesis alterna <math>H_1: \mu_1 - \mu_2 &lt; 0</math></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Valor T</th> <th>GL</th> <th>Valor p</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-2.46</td> <td>4</td> <td>0.035</td> </tr> </tbody> </table>	Valor T	GL	Valor p	-2.46	4	0.035
Valor T	GL	Valor p											
-6.43	2	0.012											
Valor T	GL	Valor p											
-2.46	4	0.035											

**Fuente:** Propio

Se observa que para la comparación de las eficiencias de obtenidas con m=1 y m=2 se tiene un valor del estadístico p de 0.012 y para la comparación de las eficiencias obtenidas con m=2 y m=3 se tiene un valor del estadístico p de 0.035, estos dos resultados indican que la media de las eficiencias obtenidas con m=1 es significativamente inferior que las obtenidas con m=2 y de la misma manera, la media de las eficiencias obtenidas con m=2 es significativamente inferior que las obtenidas con m=3.

#### 4.5.1. Contrastación de la hipótesis específica 5

*Ho: La media de las eficiencias de floculación obtenidas en un reactor CSTR no es significativamente diferente cuando se emplean más de un compartimiento para diversas condiciones de gradiente.*

*Hi: La media de las eficiencias de floculación obtenidas en un reactor CSTR es significativamente diferente cuando se emplean más de un compartimiento para diversas condiciones de gradiente.*

Dado que el valor de los estadísticos p mostrados en la Tabla 20 son menores que el valor de significancia  $\alpha=0.05$ , se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa que establece que la media de las eficiencias obtenidas con m=1 y m=2 son significativamente menores a los obtenidos con m=3.

## CAPÍTULO V

### V. DISCUSIÓN

Se estudió mediante un diseño factorial el efecto que producen las variables tipo de coagulante (sulfato de aluminio y cloruro férrico), pH, dosis y gradiente sobre las constantes cinéticas de agregación y ruptura. Asimismo, se simuló el comportamiento de un reactor de floculación CSTR en función de las constantes cinéticas para diferentes perfiles de gradiente y número de cámaras variables en el reactor. El diseño factorial aleatorizado permitió establecer el orden de los tratamientos de la interacción de los niveles de cada factor, y mediante ensayos de laboratorio se determinaron los valores de  $N_0$  y  $N$ , los que permitieron graficar los índices de floculación ( $N/N_0$ ) versus tiempo ( $T$ ), y mediante un proceso de regresión no lineal en el programa Origin y empleando del modelo de Bratby para ensayos en batch, que es una extensión del modelo de Argaman y Kaufman, se determinaron los valores de las constantes cinéticas para un tipo de coagulante, pH, dosis y gradiente. Es decir que los valores de las constantes cinéticas se determinaron empleando un programa de análisis de datos, tal como el realizado por Dutra (2017) y Marques y Ferreira-Filho (2017).

Se determinaron valores de las constantes cinéticas para cada tratamiento que implica la interacción de un tipo de coagulante, pH, dosis y gradiente, encontrando valores que oscilan entre  $10^{-6}$  y  $10^{-4}$  para  $K_A$  y valores de entre  $10^{-9}$  s a  $10^{-6}$  s para  $K_B$ . Además, de las gráficas realizadas de  $K_B$  versus  $G$  se determinó que para cada tratamiento en particular la relación entre estas dos variables puede ser de forma logarítmica, exponencial o potencial; con respecto al sulfato de aluminio se encontró que para un pH de 6.0 la relación es de forma potencial y para un pH de 8.0 es de forma logarítmica, existiendo en algunos casos una correlación no tan buena. Con respecto al cloruro férrico se encontró que la relación para un pH de 6.0 es de forma exponencial, logarítmica y potencial para dosis de 5, 10 y 30 mg/l y para un pH de 8.0 es

de forma logarítmica para dosis de 5 y 10 mg/l y de forma potencial para una dosis de 30 mg/l, existiendo generalmente una correlación mejor que lo encontrado con el sulfato de aluminio. Al respecto, Manetta (2014) tampoco encontró correlaciones buenas entre estas dos variables lo que significa que no necesariamente en todas las pruebas debe de haber correlación entre ellas. Por otro lado en cuanto al efecto de las variables independientes sobre  $K_A$  y  $K_B$  se encontró que dosis bajas y pH alcalino mostraron tasas de agregación más grandes y tasas de ruptura no tan significativas, en cambio dosis altas y pH ácido mostraron también tasas de agregación altas, pero tasas de ruptura significativamente grandes, por lo que en estas condiciones los índices de floculación, medido como  $N/N_0$ , fueron más pobres que con dosis bajas y pH alcalino. Esta tendencia se observó tanto en la primera y segunda réplica, sin embargo, hubo una variación en los valores de  $K_A$  y  $K_B$  si se comparan ambas réplicas lo que significó que la concentración de partículas primarias tuvo una influencia.

Con respecto al **efecto del tipo de coagulante** sobre las constantes cinéticas, la prueba ANOVA determinó que a un nivel de significancia de 0.05 es significativo, es decir que al usar ya sea sulfato de aluminio y cloruro férrico se obtendrán valores con diferencia significativa en los valores en  $K_A$  y  $K_B$ . Se encontró que en general el cloruro férrico presenta mejor desempeño que el sulfato de aluminio. Al respecto, en la investigación llevada a cabo por Dutra (2017) se determinó que entre los coagulantes testeados se encontró que el uso de cloruro férrico presentó mejores resultados de desempeño en el proceso en comparación con el sulfato de aluminio y el policloruro de aluminio (PAC), por lo que es evidente que el tipo de coagulante tiene un efecto sobre las constantes cinéticas. Por otro lado, con respecto al **efecto del pH** sobre las constantes cinéticas, la prueba ANOVA determinó que el pH tiene un efecto bastante significativo sobre  $K_A$ , tal que a pH ácida los valores de  $K_A$  fueron más pequeñas que las que se obtuvo con pH alcalino, es decir que con pH altos se obtuvieron mejores tasas de agregación independientemente de la dosis empleada; en cambio el pH no mostró tener un efecto significativo sobre  $K_B$ . Al respecto en el trabajo de investigación por Marques y Ferreira-Filho (2017) se encontró que un pH en el rango de 7.5 a 8.36 permitió obtener

mejores índices de floculación,  $N/No$ , en comparación con un pH en el rango de 6.0 a 6.5, por lo que con un pH alcalino permitió obtener altas tasas de agregación, es decir, valores más altos en  $K_A$ . En base a esta comparación se verifica que el pH si es una variable que influye significativamente sobre las constantes cinéticas. Asimismo, con respecto al **efecto de la dosis** sobre las constantes cinéticas, la prueba ANOVA determinó que a un valor de significancia de 0.05, tiene un efecto significativo sobre  $K_B$ , tal que dosis de 30 mg/l producen valores más grandes que los que producen dosis de 5 y 10 mg/l, de forma que con dosis grandes se obtuvieron tasas de ruptura grandes en comparación con su respectivo valor de  $K_A$ , lo que restringió significativamente el desempeño de floculación; por otro lado la dosis no mostró un efecto significativo sobre  $K_A$  sin embargo se determinó pequeñas variaciones en función a la dosis, tal que con dosis de 5 y 10 mg/l se obtuvieron valores más grandes en  $K_A$  en comparación a los obtenidos con una dosis de 30 mg/l, sin embargo estadísticamente no han sido significativos. Al respecto, en la investigación llevada a cabo por Ferreira-Filho, Hespanhol y Moreira (2000), se encontró que cuando la gradiente de velocidad se mantiene constante, un incremento en la dosis resultó en un incremento continuo en  $K_A$ , sin embargo, al llegar a una cierta dosis se produjo una reducción en  $K_A$ , es decir menores tasas de agregación; con respecto a  $K_B$  se encontró que incremento en la dosis generó un incremento en  $K_B$ , ocasionado altas tasas de ruptura, lo que es similar a lo encontrado en la presente investigación. Finalmente, con respecto al **efecto de la gradiente** con respecto a las constantes cinéticas, la prueba ANOVA determinó que a un nivel de significancia de 0.05 la gradiente no tuvo efecto significativo sobre  $K_A$  Y  $K_B$  pero la gráfica de efectos principales mostró que existe una pequeña variación en estas constantes cinéticas con el valor de la gradiente, tal que con gradiente de  $30 \text{ s}^{-1}$  se obtienen valores más grandes en  $K_A$  que los obtenidos con gradientes de 60 y  $100 \text{ s}^{-1}$ , por otro lado, un incremento en la gradiente significó un incremento constante en  $K_B$ , lo que significa que cuanto mayor la gradiente, mayores tasas de ruptura se presentan. Al respecto en la investigación llevada a cabo por Marques y Ferreira-Filho (2022), se determinó mediante análisis de varianza (ANOVA) que el efecto de la

gradiente tampoco es significativo sobre  $K_A$ , esto debido a que los valores (como lo muestran en la información complementaria de su publicación) de esta constante cinética variaron entre  $10^{-3}$  a  $10^{-5}$  para las distintas gradientes estudiadas, los que estadísticamente no representaron variaciones significativas, sin embargo, los valores de  $K_B$  que determinaron variaron desde valores del orden de  $10^{-16}$  s a  $10^{-6}$  s, para las distintas gradientes analizadas y estos claramente representan variaciones muy significativas, por lo que la prueba ANOVA determinó que la gradiente tuvo un efecto significativo sobre  $K_B$ . En cambio, en la presente investigación se obtuvieron valores del orden de  $10^{-6}$  y  $10^{-4}$  para  $K_A$  y valores de entre  $10^{-9}$  s a  $10^{-6}$  s para  $K_B$  para las distintas gradientes estudiadas, cuyas variaciones no fueron estadísticamente significativas.

Finalmente, el estudio del comportamiento de un reactor CSTR para la floculación de las aguas del río Marcará, en función de las constantes cinéticas para un pH de 8.0 y una dosis de 5mg/l, que fueron las variables con mejores desempeño, mostró que para una gradiente fija el tiempo requerido para obtener una eficiencia de  $R=4$  (75%),  $R=5$  (80%) y  $R=10$  (90%), disminuye cuando se emplean más de una cámara en el reactor, tal que con  $m=3$  cámaras se obtienen tiempos mucho más cortos que los que se obtienen con  $m=1$  o  $m=2$  cámaras; particularmente debido a que las tasas de agregación obtenidas con cloruro férrico son más grandes que los obtenidos con el sulfato de aluminio, los tiempos requeridos con el cloruro férrico son mucho menores para obtener las eficiencias estudiadas, tal como se muestra en las gráficas de superficie. Asimismo, se encontró que cuando se emplea un perfil de gradientes de forma escalonada en cada cámara del reactor, las eficiencias que se obtienen se incrementan a comparación de los que se obtiene con gradiente fija, tal que para el caso de un tiempo de floculación de  $T=30$  min y un perfil de gradientes de 100 / 60 / 60 se obtendrá una eficiencia de 95.49%, seguido del perfil de gradientes de 100 / 60 / 30 con el que se obtiene una eficiencia de 94.30%. Al respecto en la investigación llevada a cabo por Moruzzi y De Oliverira (2012), se encontró la misma tendencia, es decir para una gradiente fija, el tiempo requerido para una eficiencia "R" en específico disminuye con el incremento del número de cámaras "m" en el reactor y que

además un perfil de gradientes de forma escalonada redujo el tiempo necesario para obtener una eficiencia  $R=10$  (90%) significativamente, tal que, con una sola cámara y  $G= 30 \text{ s}^{-1}$  el tiempo requerido fue de 136.24 min, mientras que con tres cámaras y perfil de gradientes de 60 / 30 / 20 el tiempo disminuyó a 30.15 min. Es decir que en el presente estudio y en el estudio de Moruzzi y De Oliverira (2012), se observaron comportamientos similares en un reactor de floculación CSTR.

## CAPÍTULO VI

### VI. CONCLUSIONES

El tipo de coagulante usado en los ensayos ya sea el sulfato de aluminio o el cloruro férrico, ha influido significativamente sobre las constantes cinéticas de agregación y ruptura, ya que el análisis de varianza (ANOVA) a un nivel de significancia  $\alpha=0.05$  determinó un valor  $p$  de 0.001 y de 0.012 con respecto a  $K_A$  y  $K_B$  respectivamente, de modo que las medias obtenidas con el cloruro férrico fueron significativamente más grandes que los obtenidos con el sulfato de aluminio.

El pH es una variable que ha influido significativamente sobre la constante cinética de agregación, debido a que el análisis de varianza (ANOVA) a un nivel de significancia  $\alpha=0.05$  determinó un valor  $p=0.000$ , sin embargo, no ha tenido influencia significativa sobre la constante cinética de ruptura ya que la prueba ANOVA determinó un valor  $p=0.211$  para esta constante cinética. Esta influencia significativa mostró que con un pH alcalino se han obtenido mejores tasas de agregación, es decir valores más grandes en  $K_A$ , que los obtenidos con un pH ácido.

La dosis es una variable que ha influido significativamente sobre la constante cinética de ruptura, debido a que el análisis de varianza (ANOVA) a un nivel de significancia  $\alpha=0.05$  determinó un valor  $p=0.003$ , sin embargo, no ha tenido influencia significativa sobre la constante cinética de agregación ya que la prueba ANOVA determinó un valor  $p=0.214$  para esta constante cinética. La influencia significativa sobre  $K_B$  mostró que con una dosis de 30 mg/l se obtienen valores más grandes, es decir tasas de ruptura grandes, que los obtenidos con dosis de 5 y 10 mg/l, asimismo, hubo pequeñas variaciones de  $K_A$  en función a la dosis, pero no han sido estadísticamente significativos.

La gradiente es una variable que no ha influido significativamente sobre las constantes cinéticas de agregación y ruptura, debido a que el análisis de

varianza (ANOVA) a un nivel de significancia  $\alpha=0.05$  determinó un valor  $p=0.270$  y  $p=0.811$  para  $K_A$  y  $K_B$  respectivamente, sin embargo se observaron pequeñas variaciones de las constantes cinéticas en función de la gradiente, tal que, con gradiente baja se obtuvieron mejores tasas de agregación, mientras que con gradientes medias y altas se obtuvieron tasas de ruptura más grandes, es decir, valores más grandes en  $K_B$ .

El estudio del comportamiento de un reactor de floculación CSTR mediante los modelos desarrollados por Argaman y Kaufman, permitió determinar los tiempos requeridos para lograr una eficiencia de 75%, 80% y 90%, considerando una gradiente constante y de  $m=1$  a  $m=3$  cámaras en el reactor, tal que, empleando cloruro férrico, pH de 8.0 y dosis de 5 mg/l, se obtiene los tiempos más cortos, y que este tiempo se reduce aún más cuando se emplea dos o tres cámaras que empleando una sola cámara, como lo demuestra la prueba t que a un nivel de significancia  $\alpha=0.05$ , determinó que la media de eficiencias obtenidas con  $m=1$  y  $m=2$  son significativamente menores que los obtenidos con  $m=3$ . Asimismo, se determinó que empleando un perfil de gradientes de forma escalonado obtiene eficiencias más altas, tal que, para un  $T=30$  min y un perfil de gradientes de 100 / 60 / 60 se obtuvo una eficiencia de 95.49%

## CAPÍTULO VII

### VII. RECOMENDACIONES

En trabajos posteriores se recomienda estudiar la cinética de floculación de las aguas de un río determinado, empleando coagulantes metálicos y naturales y poder establecer mediante la comparación de sus constantes cinéticas de agregación y ruptura, de forma cuantitativa, el grado de agregación y ruptura de flóculos que se produce entre un coagulante metálico y uno natural, así como también simular el tiempo mínimo requerido para obtener una eficiencia determinada, en reactores de floculación de uno o varios compartimentos, para ambos tipos de coagulantes.

Asimismo, se sugiere emplear el modelo cinético de Argaman y Kaufman no solo para aguas superficiales que puedan ser floculadas, sino también, para el estudio de la cinética de floculación de lodos activados en aguas residuales; mediante el cual se pueden determinar la tasa de agregación y ruptura de los flóculos del lodo, el estado inicial de agregación del lodo activado, el grado con el cual pueden removerse las partículas primarias del lodo, la cantidad de turbiedad que puede ser removida por floculación y la tasa promedio de remoción de ésta última mediante floculación, empleando ensayos batch.

## CAPÍTULO VIII

### VIII. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Akinmolayan, F. (2017). *Mathematical modelling of Clean Water Treatment Works* (tesis). London.
- Arboleda, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Santa Fe de Bogotá: McGraw Hill.
- Bagchi, B. (2013). *The pH of water*. En *Water in Biological and Chemical Processes: From Structure and Dynamics to Function* (Cambridge Molecular Science, pp. 71-78). Cambridge: Cambridge University Press
- Bratby, J. (2016). *Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment* (3rd ed.). London: IWA Publishing.
- Benjamin, M. M., y Lawler, D. F. (2013). *Water Quality Engineering: Physical/Chemical Treatment Processes*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Crittenden, J. C., Trushell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., y Tchobanoglous, G. (2012). *Water treatment principles and design*. Hoboken, NJ: John Wiley.
- Dutra, R. H. (2017). *Obtenção dos parâmetros cinéticos da floculação com utilização de técnica de análise por imagem* (tesis). Universidade Federal de Uberlândia, Brasil.
- Ferreira-Filho, S., Hespanhol, I., y Moreira, H. (2000). Flocculation Kinetics of Colloidal Suspensions: Effects of Metallic Coagulant Dosage and Primary Particle Concentration on the Breakup and Aggregation Constants. En H. Hermann, E. Hoffmann, y H. Ødegaard (Eds.), *Chemical Water and Wastewater Treatment VI* (1st ed.). Berlín: Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.

- Hall, S. (2012). Blending and Agitation. *Branan's Rules of Thumb for Chemical Engineers*, 257–279.
- Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, M. (2014). *Metodología de la investigación*. México: McGraw-Hill.
- Illangasinghe, W., Ratnayaka, N., Manatunge, J., y Jayasuriya, N. (2018). Coagulant dose as an operating parameter in a solid contact clarifier. *Water Practice and Technology*, 14(1), 27–35.
- Lawler, D. (2011). Hydraulic characteristics of Water Treatment Reactors and their effects on treatment efficiency. In J. Edzwald (Ed.), *Water quality & treatment: A handbook on drinking water* (6th ed.). New York: McGraw-Hill.
- Letterman, R., y Yiacoumi, S. (2011). Coagulation And Flocculation. En J. Edzwald (Autor), *Water Quality & Treatment* (6th ed.). Denver Colorado: McGraw Hill.
- Leung, G. Y. (2001). Dense Matter Physics. En R. A. Meyers (Ed.), *Encyclopedia of Physical Science and Technology* (3rd ed., Vol. 17, pp. 305–334). Tarzana: Academic Press.
- Lozano-Rivas, W., y Lozano, G. (2015). *Potabilización del agua: Principios de diseño, control de procesos y laboratorio* (1st ed.). Universidad Piloto de Colombia.
- Manetta, L. (2014). *Determinação dos gradientes de velocidade médios em sistemas de câmaras em série visando atender ao critério do menor tempo de floculação total* (tesis). Bauru.
- Marques, R., y Ferreira-Filho, S. (2017). Flocculation kinetics of low-turbidity raw water and the irreversible floc breakup process. *Environmental Technology*, 38(7), 901-910.
- Marques, R., y Ferreira-Filho, S. (2022). Further investigation of the irreversible floc breakup in flocculation kinetics modelling. *Water Supply*, 22(4), 3814–3823.

- Moruzzi, R., y De-Oliveira, S. (2012). Mathematical modeling and analysis of the flocculation process in Chambers in series. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 36(3), 357–363.
- OriginLab Corporation (Ed.). (s.f). Theory of Nonlinear Curve Fitting. Consultado el 25 de febrero de 2021, de: <https://www.originlab.com/doc/Origin-Help/NLFit-Theory>.
- Rehm, B., Consultant, D., Haghshenas, A., Paknejad, A. S., y Schubert, J. (2008). Situational problems in MPD. *Managed Pressure Drilling*, 39–80.
- Simon, L. L., Simone, E., y Oucherif, K. A. (2018). *Crystallization process monitoring and control using process analytical technology*. En R. Singh y Z. Yuan (Eds.), *Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. 41, pp. 215–242). Netherlands: Elsevier.
- Sekiou, F., y Kellil, A. (2009). Effect of organic and mineral matters on kinetic and performance of flocculation. *Desalination*, 249(2), 891-894.
- Ting, D. S. (2016). *Basics of engineering turbulence*. London: Elsevier academic Press.
- Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., y Ye, K. (2011). *Probability & statistics for engineers & scientists: MyStatLab update* (9th ed.). Boston: Pearson education.

## CAPÍTULO IX

### IX. ANEXO

#### 6.1. Panel fotográfico

**Imagen 1:** Mapa de ubicación del punto de muestreo de las aguas del río Marcará.



**Imagen 2:** Muestreo de agua en el río Marcará.



Imagen 3: Calibración de pH-metro con soluciones buffer.



Imagen 4: Calibración de turbidímetro con los estándares de calibración.



**Imagen 5:** Extracción de 30 ml de muestra para medición de turbiedad y medición de pH y temperatura del agua cruda.



**Imagen 6:** Corrección de pH del agua con NaOH y/o H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.1N en 1L de muestra a un valor deseado.



**Imagen 7:** Extracción del sulfato de aluminio para su dilución (izquierda) y proceso de disolución con agua destilada (derecha)



**Imagen 8:** Preparación de solución de Sulfato de Aluminio y Cloruro Férrico al 1% a partir de concentraciones de 99.5% y 40% de Sulfato de Aluminio y Cloruro férrico comerciales respectivamente.



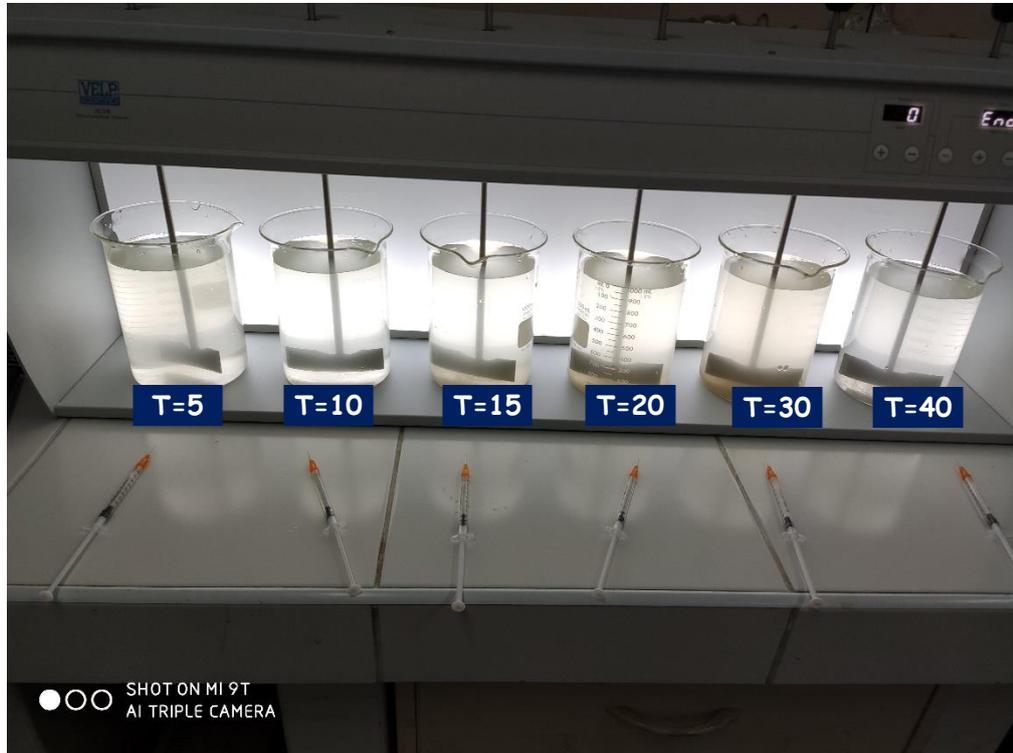
**Imagen 9:** Soluciones stock de Sulfato de Aluminio (izquierda) y Cloruro Férrico (derecha) al 1% de concentración.



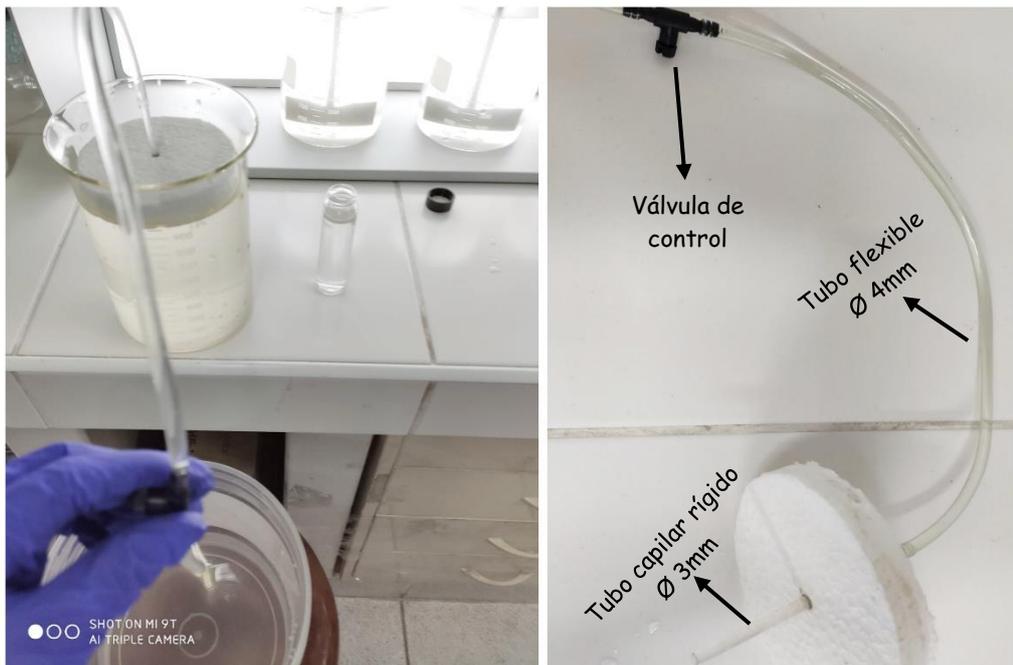
**Imagen 10:** Realización de la mezcla rápida para un tipo de coagulante (Cloruro Férrico en este caso), un pH y una dosis establecida para un tiempo de floculación  $T=0$  y tiempo de sedimentación de 20 min.



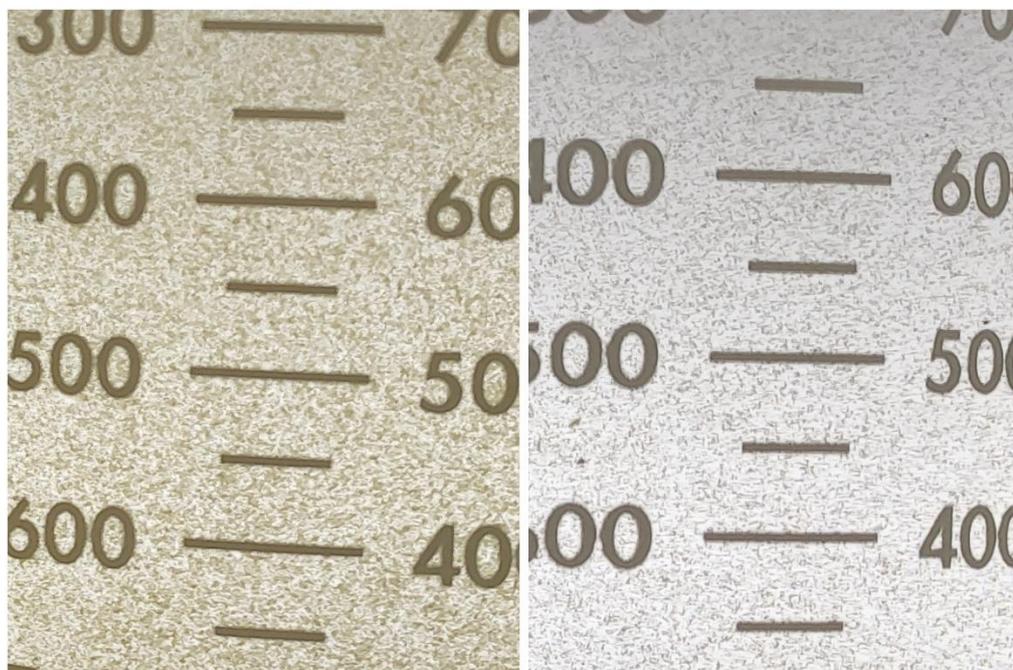
**Imagen 11:** Ensayo de floculación con un tipo de coagulante, un pH, una dosis y una gradiente establecida para tiempos de floculación T de 5, 10, 15, 20, 30 y 40 min y un tiempo de sedimentación de 20 min.



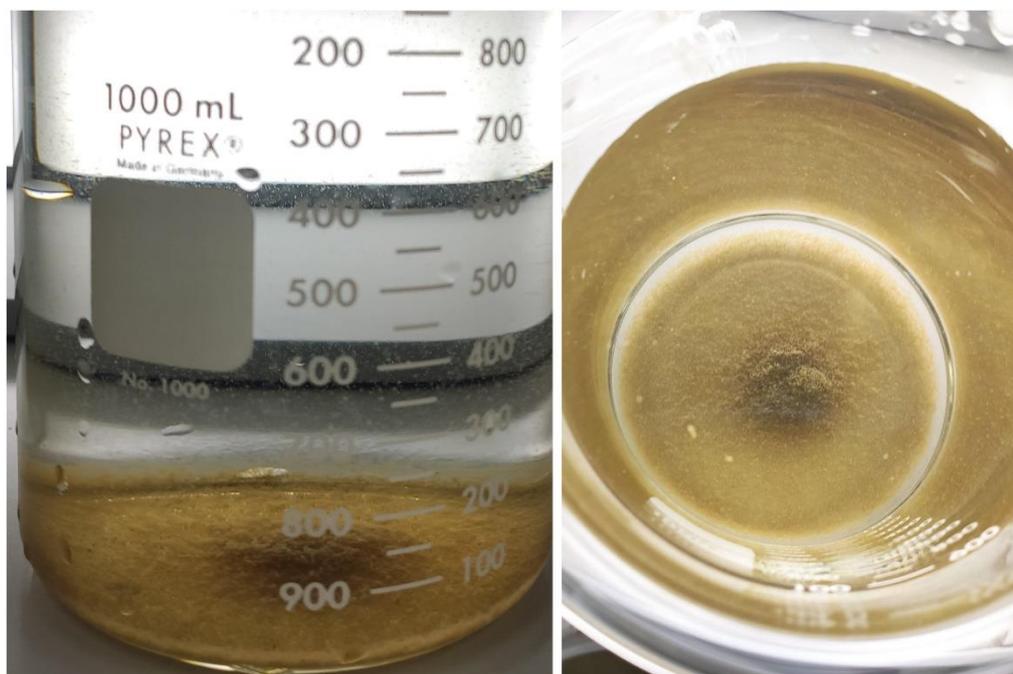
**Imagen 12:** Extracción de muestra a 5 cm de profundidad, después de un tiempo T de floculación y 20 min de sedimentación (izquierda) y sistema de sifón (derecha).



**Imagen 13:** Generación de flocs para una dosis, un pH, una gradiente y un tiempo T de floculación, cuando se emplea Sulfato de Aluminio (derecha) y Cloruro Férrico (izquierda).



**Imagen 14:** Flocs sedimentados. Vista frontal (izquierda) y vista superior (derecha).

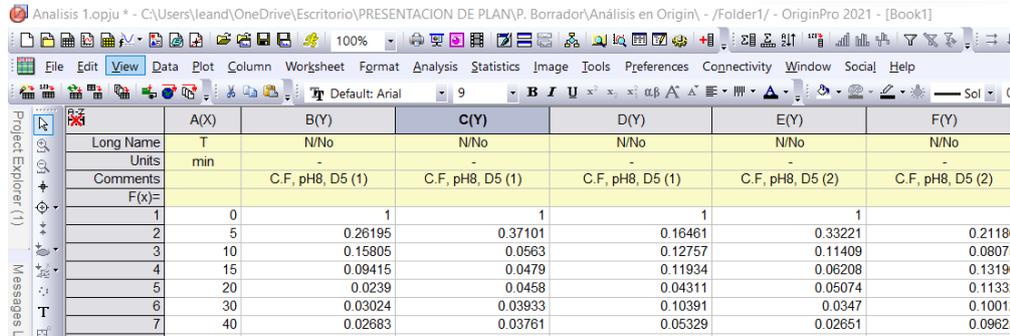


**Imagen 15:** Medición de turbiedad, del agua cruda, después de la desestabilización sin floculación con sedimentación y/o después de la floculación con sedimentación, según corresponda.



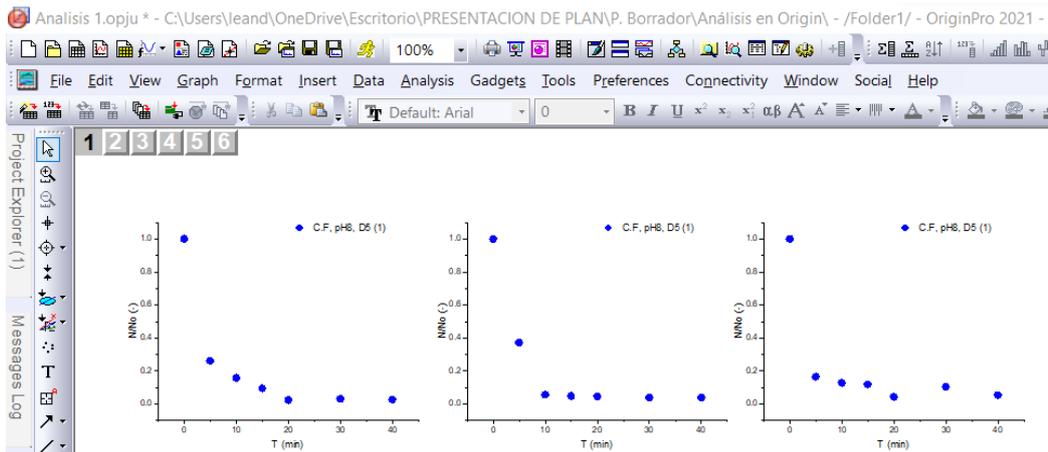
## 6.2. Proceso de determinación de las constantes cinéticas en Origin

**Paso 1:** se introduce en la hoja de trabajo los valores de tiempo y los índices de floculación (N/No) determinados para un tipo de coagulante, pH, dosis y gradiente.

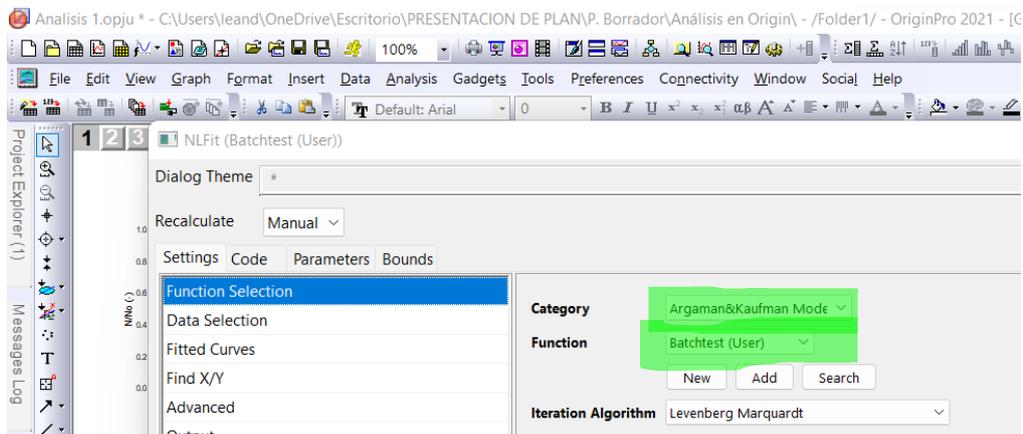


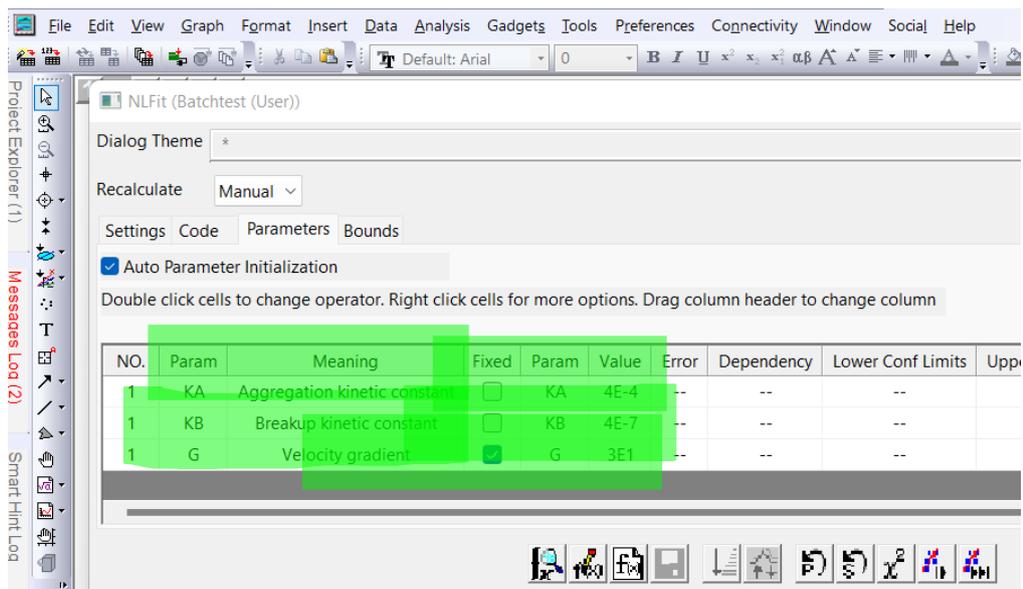
	A(X)	B(Y)	C(Y)	D(Y)	E(Y)	F(Y)
Long Name	T	N/No	N/No	N/No	N/No	N/No
Units	min	-	-	-	-	-
Comments		C.F, pH8, D5 (1)	C.F, pH8, D5 (1)	C.F, pH8, D5 (1)	C.F, pH8, D5 (2)	C.F, pH8, D5 (2)
F(x)=						
1	0	1	1	1	1	1
2	5	0.26195	0.37101	0.16461	0.33221	0.2118
3	10	0.15805	0.0563	0.12757	0.11409	0.0807
4	15	0.09415	0.0479	0.11934	0.06208	0.1319
5	20	0.0239	0.0458	0.04311	0.05074	0.1133
6	30	0.03024	0.03933	0.10391	0.0347	0.1001
7	40	0.02683	0.03761	0.05329	0.02651	0.0962

**Paso 2:** se plotea tiempo versus índices de floculación en una gráfica de dispersión.

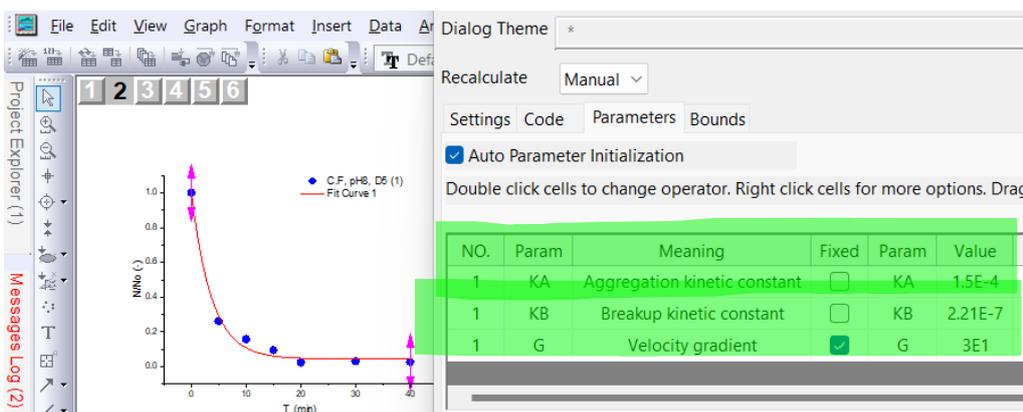


**Paso 3:** mediante regresión lineal y empleando la ecuación del modelo de Argaman y Kaufman para ensayos en batch, se determina la curva de ajuste





(\*) Valores de inicialización para el ajuste



(\*) Valores de  $K_A$  y  $K_B$  determinados por el programa.

Siguiendo el mismo procedimiento se determinaron la totalidad de los valores de las constantes cinéticas para todos los tratamientos, tal como se muestra en el siguiente cuadro

Orden corrida	T.C	pH	D (mg/l)	G (s <sup>-1</sup> )	Ka	Kb (s)
1	Cloruro férrico	6	10	30	2.24E-05	1.00E-09
2	Sulfato de aluminio	6	10	30	3.33E-05	1.00E-09
3	Sulfato de aluminio	6	5	100	2.58E-05	4.28E-08
4	Cloruro férrico	8	10	60	5.00E-05	4.60E-09
5	Cloruro férrico	8	30	60	1.50E-05	1.18E-07
6	Sulfato de aluminio	6	5	60	8.39E-06	8.51E-08
7	Sulfato de aluminio	8	5	30	3.17E-05	1.00E-09
8	Cloruro férrico	8	5	30	1.50E-04	2.21E-07
9	Cloruro férrico	8	5	60	6.45E-05	2.70E-08
10	Sulfato de aluminio	8	10	60	1.51E-05	1.00E-09

11	Sulfato de aluminio	8	5	60	5.40E-05	7.30E-08
12	Sulfato de aluminio	6	10	60	1.62E-05	1.00E-09
13	Cloruro férrico	6	10	60	1.49E-05	2.17E-07
14	Sulfato de aluminio	8	30	100	4.28E-04	3.55E-06
15	Cloruro férrico	8	5	100	7.91E-05	6.83E-08
16	Cloruro férrico	8	10	30	6.23E-05	1.00E-09
17	Sulfato de aluminio	6	10	100	1.91E-05	5.09E-08
18	Sulfato de aluminio	8	30	30	3.70E-06	5.31E-08
19	Sulfato de aluminio	6	30	60	1.23E-05	1.00E-09
20	Sulfato de aluminio	8	10	100	1.16E-05	4.88E-09
21	Sulfato de aluminio	6	30	30	1.20E-05	1.00E-09
22	Cloruro férrico	6	30	100	4.39E-05	4.37E-07
23	Cloruro férrico	6	5	30	2.17E-05	1.00E-09
24	Sulfato de aluminio	8	5	100	1.46E-05	8.69E-09
25	Sulfato de aluminio	8	30	60	7.73E-06	1.00E-09
26	Cloruro férrico	6	30	60	4.15E-05	5.92E-07
27	Sulfato de aluminio	8	10	30	3.59E-05	1.00E-09
28	Cloruro férrico	8	30	30	3.51E-05	1.04E-06
29	Cloruro férrico	6	30	30	4.15E-05	1.38E-06
30	Sulfato de aluminio	6	5	30	5.08E-06	1.00E-09
31	Cloruro férrico	8	10	100	5.82E-05	3.48E-08
32	Cloruro férrico	8	30	100	3.65E-05	3.62E-07
33	Cloruro férrico	6	5	100	1.49E-05	1.97E-08
34	Cloruro férrico	6	5	60	1.32E-05	1.00E-09
35	Sulfato de aluminio	6	30	100	3.84E-06	1.00E-09
36	Cloruro férrico	6	10	100	3.93E-06	1.00E-09
37	Sulfato de aluminio	6	5	30	2.48E-05	3.25E-07
38	Sulfato de aluminio	6	30	60	1.09E-05	2.74E-08
39	Sulfato de aluminio	8	5	60	2.82E-05	5.15E-08
40	Cloruro férrico	8	30	30	2.80E-05	9.19E-07
41	Cloruro férrico	6	5	100	2.17E-05	1.43E-08
42	Cloruro férrico	8	30	100	3.14E-05	3.12E-07
43	Cloruro férrico	6	5	60	1.81E-05	1.00E-09
44	Sulfato de aluminio	8	10	100	9.55E-06	7.76E-09
45	Cloruro férrico	8	5	60	1.21E-04	2.07E-07
46	Cloruro férrico	6	10	30	1.71E-05	1.00E-09
47	Sulfato de aluminio	6	5	60	7.23E-06	3.77E-08
48	Sulfato de aluminio	8	30	60	1.66E-06	1.00E-09
49	Cloruro férrico	6	30	30	1.29E-05	4.23E-07
50	Cloruro férrico	6	30	100	3.06E-05	3.04E-07
51	Cloruro férrico	6	10	60	6.76E-06	1.00E-09
52	Sulfato de aluminio	8	10	30	2.22E-05	1.00E-09
53	Sulfato de aluminio	8	30	30	7.64E-06	1.00E-09
54	Sulfato de aluminio	6	10	100	3.86E-06	1.00E-09

55	Sulfato de aluminio	6	30	30	2.03E-05	4.95E-07
56	Sulfato de aluminio	6	10	60	3.40E-06	1.00E-09
57	Cloruro férrico	8	10	100	8.61E-05	6.13E-08
58	Cloruro férrico	8	10	30	8.13E-05	1.79E-09
59	Cloruro férrico	8	10	60	9.30E-05	5.17E-08
60	Cloruro férrico	8	30	60	1.77E-05	2.93E-07
61	Sulfato de aluminio	8	5	100	1.36E-05	6.78E-09
62	Sulfato de aluminio	8	5	30	1.83E-05	1.00E-09
63	Sulfato de aluminio	8	10	60	2.79E-05	4.04E-08
64	Cloruro férrico	8	5	30	1.32E-04	1.45E-07
65	Cloruro férrico	6	10	100	4.10E-06	1.00E-09
66	Cloruro férrico	6	5	30	2.21E-05	1.00E-09
67	Sulfato de aluminio	6	10	30	4.00E-05	2.36E-07
68	Cloruro férrico	6	30	60	1.11E-05	1.83E-07
69	Sulfato de aluminio	8	30	100	1.23E-05	9.94E-09
70	Sulfato de aluminio	6	5	100	6.26E-06	1.00E-09
71	Sulfato de aluminio	6	30	100	3.80E-06	1.00E-09
72	Cloruro férrico	8	5	100	4.77E-05	3.48E-08

### 6.3. Análisis del comportamiento de un reactor CSTR en función de gradiente y tiempo, con m=1, 2 y 3 compartimientos

1: Valores de  $K_A$  y  $K_B$  para el sulfato de aluminio, basado en el promedio obtenido con las tres gradientes, pH 8.0 y dosis de 5 mg/l.

$K_A$	$K_B$ (s)	Tiempo (s)	Gradiente ( $s^{-1}$ ) (m=1)	Gradiente ( $s^{-1}$ ) (m=2)	Gradiente ( $s^{-1}$ ) (m=3)	$N_0/N_1$ (m=1)	$N_0/N_2$ (m=2)	$N_0/N_3$ (m=3)
3.34E-05	2.76E-08	300	-	-	-	-	-	-
3.34E-05	2.76E-08	600	-	-	-	-	-	-
3.34E-05	2.76E-08	900	-	-	102.03	-	-	5.00
3.34E-05	2.76E-08	1200	-	82.68	65.69	-	5.00	5.00
3.34E-05	2.76E-08	1500	-	60.43	49.57	-	5.00	5.00
3.34E-05	2.76E-08	1800	-	48.10	39.99	-	5.00	5.00
3.34E-05	2.76E-08	2100	91.43	40.07	33.56	5.00	5.00	5.00
3.34E-05	2.76E-08	2400	70.12	34.38	28.94	5.00	5.00	5.00
3.34E-05	2.76E-08	2700	58.34	30.12	25.44	5.00	5.00	5.00
3.34E-05	2.76E-08	3000	50.32	26.81	22.70	5.00	5.00	5.00
3.34E-05	2.76E-08	3300	44.37	24.16	20.50	5.00	5.00	5.00
3.34E-05	2.76E-08	3600	39.75	21.99	18.69	5.00	5.00	5.00
3.34E-05	2.76E-08	3900	36.03	20.18	17.17	5.00	5.00	5.00
3.34E-05	2.76E-08	4200	32.97	18.65	15.88	5.00	5.00	5.00
3.34E-05	2.76E-08	4500	30.40	17.33	14.78	5.00	5.00	5.00
3.34E-05	2.76E-08	4800	28.20	16.19	13.81	5.00	5.00	5.00
3.34E-05	2.76E-08	5100	26.31	15.19	12.97	5.00	5.00	5.00
3.34E-05	2.76E-08	5400	24.66	14.31	12.22	5.00	5.00	5.00
3.34E-05	2.76E-08	300	-	-	-	-	-	-
3.34E-05	2.76E-08	600	-	-	-	-	-	-
3.34E-05	2.76E-08	900	-	-	184.59	-	-	5.00
3.34E-05	2.76E-08	1200	-	203.52	209.34	-	5.00	5.00
3.34E-05	2.76E-08	1500	-	219.01	218.23	-	5.00	5.00
3.34E-05	2.76E-08	1800	-	226.43	222.95	-	5.00	5.00
3.34E-05	2.76E-08	2100	151.16	230.73	225.92	5.00	5.00	5.00
3.34E-05	2.76E-08	2400	172.48	233.48	227.98	5.00	5.00	5.00
3.34E-05	2.76E-08	2700	184.25	235.36	229.53	5.00	5.00	5.00
3.34E-05	2.76E-08	3000	192.28	236.70	230.73	5.00	5.00	5.00
3.34E-05	2.76E-08	3300	198.22	237.70	231.71	5.00	5.00	5.00
3.34E-05	2.76E-08	3600	202.85	238.46	232.52	5.00	5.00	5.00
3.34E-05	2.76E-08	3900	206.57	239.05	233.21	5.00	5.00	5.00
3.34E-05	2.76E-08	4200	209.63	239.53	233.80	5.00	5.00	5.00
3.34E-05	2.76E-08	4500	212.20	239.91	234.32	5.00	5.00	5.00
3.34E-05	2.76E-08	4800	214.39	240.23	234.77	5.00	5.00	5.00
3.34E-05	2.76E-08	5100	216.28	240.49	235.18	5.00	5.00	5.00
3.34E-05	2.76E-08	5400	217.93	240.71	235.54	5.00	5.00	5.00

2: Valores de  $K_A$  y  $K_B$  para el cloruro férrico, basado en el promedio obtenido con las tres gradientes, pH 8.0 y dosis de 5 mg/l.

$K_A$	$K_B$ (s)	Tiempo (s)	Gradiente ( $s^{-1}$ ) (m=1)	Gradiente ( $s^{-1}$ ) (m=2)	Gradiente ( $s^{-1}$ ) (m=3)	$N_0/N_1$ (m=1)	$N_0/N_2$ (m=2)	$N_0/N_3$ (m=3)
9.79E-05	1.05E-07	300	-	-	-	-	-	-
9.79E-05	1.05E-07	600	-	53.60	43.43	-	5.00	5.00
9.79E-05	1.05E-07	900	79.21	32.16	26.89	5.00	5.00	5.00
9.79E-05	1.05E-07	1200	44.94	23.16	19.56	5.00	5.00	5.00
9.79E-05	1.05E-07	1500	33.18	18.13	15.39	5.00	5.00	5.00
9.79E-05	1.05E-07	1800	26.49	14.90	12.69	5.00	5.00	5.00
9.79E-05	1.05E-07	2100	22.09	12.66	10.80	5.00	5.00	5.00
9.79E-05	1.05E-07	2400	18.97	11.00	9.39	5.00	5.00	5.00
9.79E-05	1.05E-07	2700	16.63	9.73	8.32	5.00	5.00	5.00
9.79E-05	1.05E-07	3000	14.80	8.72	7.46	5.00	5.00	5.00
9.79E-05	1.05E-07	3300	13.34	7.90	6.76	5.00	5.00	5.00
9.79E-05	1.05E-07	3600	12.15	7.22	6.19	5.00	5.00	5.00
9.79E-05	1.05E-07	3900	11.15	6.65	5.70	5.00	5.00	5.00
9.79E-05	1.05E-07	4200	10.30	6.16	5.28	5.00	5.00	5.00
9.79E-05	1.05E-07	4500	9.58	5.74	4.93	5.00	5.00	5.00
9.79E-05	1.05E-07	4800	8.95	5.38	4.61	5.00	5.00	5.00
9.79E-05	1.05E-07	5100	8.39	5.05	4.34	5.00	5.00	5.00
9.79E-05	1.05E-07	5400	7.91	4.77	4.09	5.00	5.00	5.00
9.79E-05	1.05E-07	300	-	-	-	-	-	-
9.79E-05	1.05E-07	600	-	162.71	164.09	-	5.00	5.00
9.79E-05	1.05E-07	900	106.44	175.80	172.34	5.00	5.00	5.00
9.79E-05	1.05E-07	1200	140.71	180.06	175.61	5.00	5.00	5.00
9.79E-05	1.05E-07	1500	152.47	182.03	177.45	5.00	5.00	5.00
9.79E-05	1.05E-07	1800	159.16	183.11	178.67	5.00	5.00	5.00
9.79E-05	1.05E-07	2100	163.55	183.76	179.56	5.00	5.00	5.00
9.79E-05	1.05E-07	2400	166.68	184.19	180.23	5.00	5.00	5.00
9.79E-05	1.05E-07	2700	169.02	184.49	180.76	5.00	5.00	5.00
9.79E-05	1.05E-07	3000	170.84	184.71	181.20	5.00	5.00	5.00
9.79E-05	1.05E-07	3300	172.30	184.87	181.56	5.00	5.00	5.00
9.79E-05	1.05E-07	3600	173.50	184.99	181.87	5.00	5.00	5.00
9.79E-05	1.05E-07	3900	174.50	185.08	182.13	5.00	5.00	5.00
9.79E-05	1.05E-07	4200	175.34	185.16	182.36	5.00	5.00	5.00
9.79E-05	1.05E-07	4500	176.07	185.22	182.56	5.00	5.00	5.00
9.79E-05	1.05E-07	4800	176.70	185.27	182.74	5.00	5.00	5.00
9.79E-05	1.05E-07	5100	177.25	185.31	182.90	5.00	5.00	5.00
9.79E-05	1.05E-07	5400	177.74	185.35	183.04	5.00	5.00	5.00

En cada caso, se simuló el comportamiento para una eficiencia  $R=5$  (80%) y se empleó el modelo de Argaman y Kaufman para el que la gradiente permanece constante en cada cámara:

$$\frac{n_0}{n_m} = \frac{(1 + K_a G_m^T)^m}{1 + K_b G^2 \frac{T}{m} \sum_{i=0}^{m-1} (1 + K_a G_m^T)^i}$$

**6.4. Determinación de los tiempos (T) para alcanzar una eficiencia R=4, 5 y 10, con m=1, 2 y 3 cámaras, empleando gradientes constantes.**

Tipo de coagulante	pH	Dosis	Gradiente	$K_A$	$K_B$			
Sulfato de aluminio	8	5 mg/l	30 s <sup>-1</sup>	3.17E-05	1.00E-09			
			60 s <sup>-1</sup>	5.40E-05	7.30E-08			
			100 s <sup>-1</sup>	1.46E-05	8.69E-09			
Cloruro férrico	8	5 mg/l	30 s <sup>-1</sup>	1.50E-04	2.21E-07			
			60 s <sup>-1</sup>	6.45E-05	2.70E-08			
			100 s <sup>-1</sup>	7.91E-05	6.83E-08			
Tipo de coagulante	G (s <sup>-1</sup> )	R	T (min)	T (min)	T (min)	n0/n1	no/n2	no/n3
			m=1	m=2	m=3	m=1	m=2	m=3
Sulfato de aluminio	30	4	52.78	35.14	30.96	4.00	4.00	4.00
	60	4	22.84	13.71	11.71	4.00	4.00	4.00
	100	4	44.95	27.90	24.07	4.00	4.00	4.00
Cloruro férrico	30	4	13.50	8.56	7.43	4.00	4.00	4.00
	60	4	14.36	9.32	8.15	4.00	4.00	4.00
	100	4	9.66	5.74	4.89	4.00	4.00	4.00
Tipo de coagulante	G (s <sup>-1</sup> )	R	T (min)	T (min)	T (s)	n0/n1	no/n2	no/n3
			m=1	m=2	m=3	m=1	m=2	m=3
Sulfato de aluminio	30	5	70.43	43.47	37.44	5.00	5.00	5.00
	60	5	34.61	18.31	15.08	5.00	5.00	5.00
	100	5	65.01	36.24	30.30	5.00	5.00	5.00
Cloruro férrico	30	5	19.02	10.94	9.23	5.00	5.00	5.00
	60	5	19.70	11.72	9.99	5.00	5.00	5.00
	100	5	14.83	7.73	6.34	5.00	5.00	5.00
Tipo de coagulante	G (s <sup>-1</sup> )	R	T (min)	T (min)	T (min)	n0/n1	no/n2	no/n3
			m=1	m=2	m=3	m=1	m=2	m=3
Sulfato de aluminio	30	10	159.23	76.26	61.02	10.00	10.00	10.00
	60	10	245.10	61.47	40.90	10.00	10.00	10.00
	100	10	253.81	87.22	63.47	10.00	10.00	10.00
Cloruro férrico	30	10	59.74	23.25	17.53	10.00	10.00	10.00
	60	10	51.76	22.46	17.47	10.00	10.00	10.00
	100	10	138.89	30.26	19.34	10.00	10.00	10.00

Para la determinación del tiempo se empleó el modelo de Argaman y Kaufman para el que la gradiente permanece constante en cada cámara.

**6.5. Estudio de la eficiencia de un reactor CSTR para un tiempo T=30 min, empleando cloruro férrico.**

Tipo de coagulante	pH	Dosis	Gradiente	K <sub>A</sub>	K <sub>B</sub>
Cloruro férrico	8	5 mg/l	30 s <sup>-1</sup>	1.50E-04	2.21E-07
			60 s <sup>-1</sup>	6.45E-05	2.70E-08
			100 s <sup>-1</sup>	7.91E-05	6.83E-08

m	Perfil de gradientes (s <sup>-1</sup> )			n <sub>0</sub> /n <sub>1</sub>	n <sub>1</sub> /n <sub>2</sub>	n <sub>2</sub> /n <sub>3</sub>	Eficiencia Total	Eficiencia Total
	1	2	3				R	%
1	100	-	-	6.84	-	-	6.84	85.37%
1	60	-	-	6.78	-	-	6.78	85.25%
1	30	-	-	6.70	-	-	6.70	85.08%
2	100	60	-	5.03	3.11	-	15.66	93.61%
2	100	30	-	5.03	2.66	-	13.36	92.52%
2	60	30	-	4.12	2.91	-	11.98	91.65%
3	100	60	60	4.08	2.68	2.03	22.19	95.49%
3	100	60	30	4.08	2.68	1.60	17.56	94.30%
3	100	30	30	4.08	2.49	1.67	16.98	94.11%
3	60	30	30	3.14	2.69	1.84	15.57	93.58%

En este caso se empleó la ecuación del modelo de Argaman y Kaufman en la que la gradiente es variable en cada cámara del reactor:

$$\frac{n_{i-1}}{n_i} = \frac{1 + K_{A_i} G_i \frac{T}{m}}{1 + \frac{n_0}{n_{i-1}} K_{B_i} G_i^2 \frac{T}{m}}$$

## 6.6. Evaluación económica del planteamiento en la tesis

La evaluación económica se basa básicamente el comparar el costo que permite estudiar el comportamiento o cinética de la floculación para un agua en particular en reactores a escala piloto y lo propuesto en la tesis, que consiste en ensayos batch que permite obtener parámetros cinéticos con los cuales se pueden predecir el comportamiento de un reactor de floculación CSTR. Sobre el estudio de la cinética de floculación para una fuente de agua en particular, Bratby (2016) indica: “Un método consiste en realizar ensayos en planta piloto de tipo continuo. Sin embargo, esto tiene la desventaja de que se requieren aparatos relativamente complicados y costosos y largos procedimientos de prueba” (p. 327).

### a) Planta piloto con materiales y accesorios plásticos:

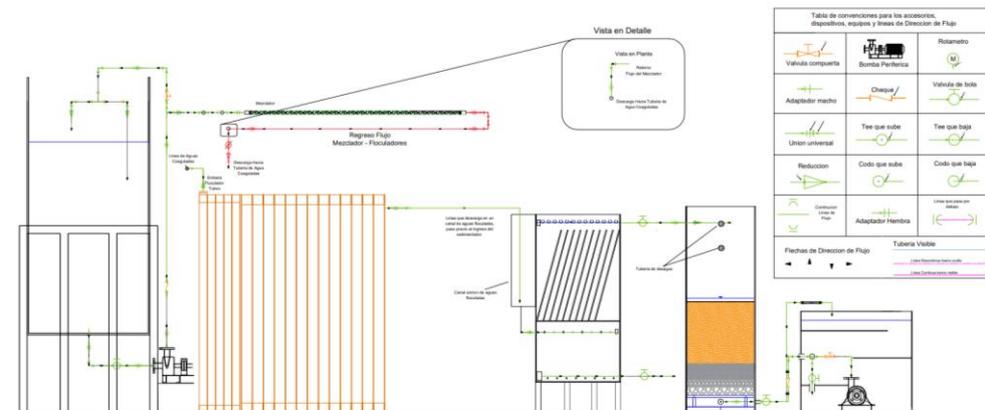
Una planta piloto para el estudio de tratabilidad del agua, implementado por Obando y Uribe (2021) consistió en un sistema conformado por unidades de abasto, vertedero triangular, tubo Venturi, mezclador estático en línea, floculador horizontal, floculador tubular, sedimentador de alta tasa, filtro rápido de arena.

Específicamente el sistema de floculación, conformado por el sistema de abasto, vertedero triangular, mezclador estático en línea, floculador horizontal y tubular y un sedimentador de alta tasa; construidas con material acrílico de 7 mm de espesor, para funcionar a un caudal de 12 L/min.

El costo de la implementación de la planta piloto en peso colombiano fue de \$ 24,999,051.9, que en dólares americanos es de US\$ 6,487.63.

Asimismo, esta planta piloto fue diseñada considerando un caudal de diseño y, además la unidad de floculación al ser de tipo hidráulico, la única forma de estudiar diversas gradientes es variando el caudal de ingreso, en cambio en un floculador de mezcla completa y flujo continuo la variación de las gradientes puede ser regulada con la variación de la velocidad de rotación de las paletas que son accionadas por bombas.

En la siguiente imagen se muestra el esquema de la planta piloto implementada



## b) Plantas piloto compacto

Por otro lado, el estudio de la cinética de floculación que permita determinar el comportamiento y grado de tratabilidad para un agua en particular puede ser realizada en una planta piloto compacta.

La característica de la planta piloto compacta es que son relativamente costosos, debido al material, la instrumentación y la confiabilidad de las pruebas que arrojan, debido a que sus componentes han sido cuidadosamente calibradas en laboratorio, y también por el hecho de que los componentes son fabricados industrialmente.

La planta piloto, tiene las siguientes características:

- Armazón de acero inoxidable AISI 304 con ruedas
- Depósito cilíndrico de alimentación de metacrilato transparente para el agua a tratar con bomba sumergible y capacidad de 300 L
- Depósito de alimentación de metacrilato transparente para coagulante con capacidad de 60 L
- Tanque de alimentación de vidrio para floculante, provisto de agitador magnético de placa calefactora, con capacidad de 0,5 L
- Reactor de coagulación de vidrio borosilicato, equipado con agitador motorizado (0 a 300 r.p.m.), con capacidad de 30 L

- Reactor de floculación de vidrio borosilicato, equipado con agitador motorizado (0 a 100 r.p.m.), con capacidad de 8 L
- Decantador rectangular de metacrilato transparente con fondo cónico y placas móviles para su funcionamiento en paralelo y contracorriente
- Caudalímetro de acero inoxidable AISI 304 para medir caudal de alimentación con rango de 30 a 300 l/h
- Caudalímetro de alimentación de coagulante con rango de 2 a 20 l/h
- Bomba de alimentación de tornillo con cuerpo y tornillo de acero inoxidable AISI 316 acero y caudal de 0 a 200 l/h
- Variador electrónico de frecuencia para bomba de tornillo
- Bomba de alimentación de engranajes de acero inoxidable AISI 316 para coagulante, con caudal de 0 a 50 l/h
- Bomba dosificadora de floculante, con caudal de 0 a 200 ml/h
- Cuadro eléctrico IP55, cumpliendo con marcado CE de conformidad, incluye sinóptico de planta y ELCB



El precio de la planta piloto es de US\$ 20,000.00, por lo que, considerando otras opciones para el estudio de tratabilidad del agua, específicamente para el estudio de la cinética de floculación, es una opción costosa.

### c) **Ensayo batch en laboratorio**

Consiste en la opción adoptada en el desarrollo de la tesis para el estudio de la cinética de floculación del agua en particular en ensayos batch en laboratorio, a través de un aparato conocido como equipo de prueba de jarras. Específicamente para el estudio de la cinética de floculación se hizo uso de las pruebas batch y la expresión del modelo cinético de Argaman y Kaufman que permite la determinación de dos constantes cinéticas denominadas de agregación y de ruptura.

Las ventajas de los procedimientos de prueba batch de laboratorio son que normalmente involucran un equipo simple y económico y un período de prueba más corto, en comparación con el aparato costoso y relativamente complicado y la metodología larga requerida para las pruebas de planta piloto de tipo continuo. (Bratby, 2016, p. 384)

Las constantes cinéticas de agregación y ruptura, a su vez permiten simular el comportamiento de un reactor de floculación de mezcla completa y flujo continuo para un número variable de cámaras o compartimientos y para diversos perfiles de gradiente, para un pH y una dosis determinada. Siendo esta utilidad de gran valor que hacen que se pueda prescindir de las pruebas piloto.



Si se cuenta con un laboratorio con la instrumentación adecuada, el costo del ensayo batch radica básicamente en la adquisición del equipo y de los coagulantes metálicos. Este costo asciende a la suma de US\$ 2,520.13.

En síntesis, de las tres alternativas viables para el estudio de la cinética de floculación para una muestra de agua en particular, la opción de los ensayos batch en laboratorio resulta la opción más económica.



## 6.7. Reporte de los análisis estadísticos

### a) Análisis de igualdad de varianzas

#### Prueba de igualdad de varianzas: log (Ka) vs. pH; Dosis; Gradiente

##### Método

Hipótesis nula	Todas las varianzas son iguales
Hipótesis alterna	Por lo menos una varianza es diferente
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$

Se utiliza el método de Bartlett. Este método es exacto sólo para datos normales.

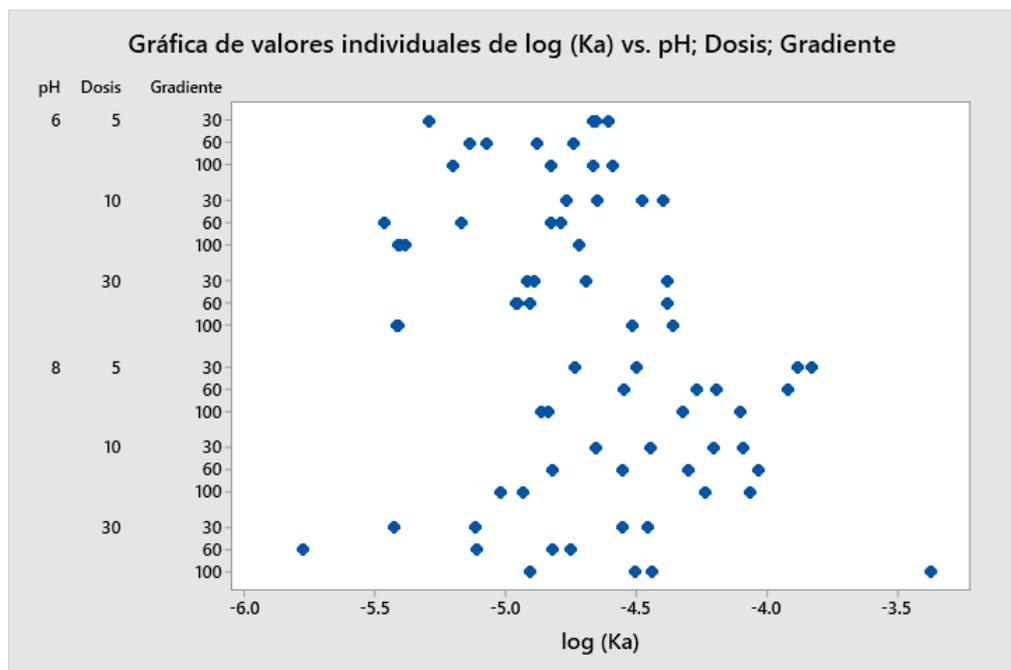
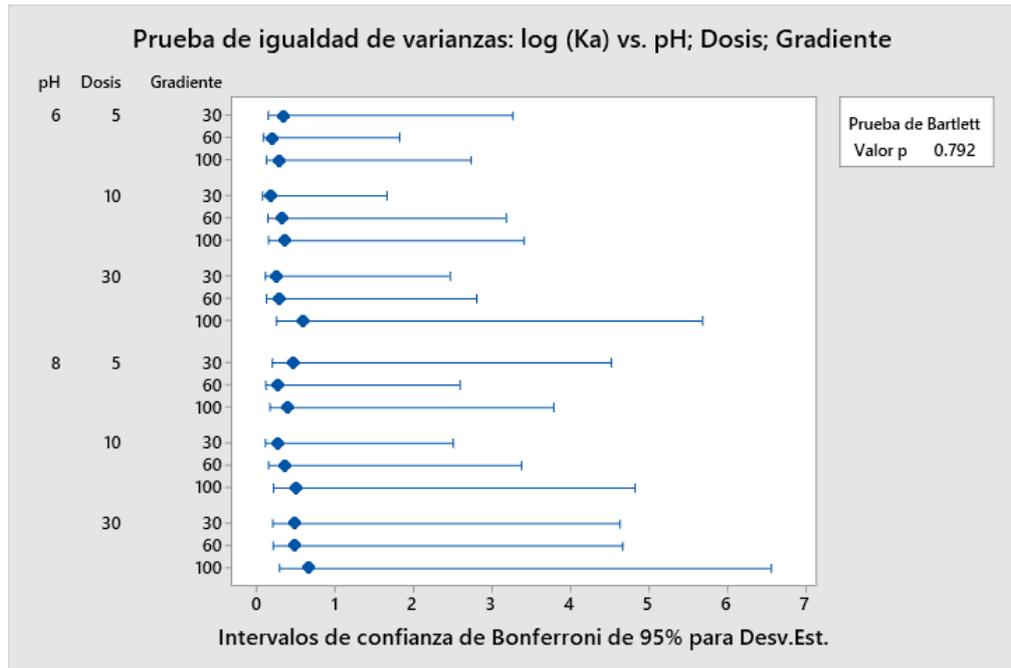
#### Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

pH	Dosis	Gradiente	N	Desv.Est.	IC
6	5	30	4	0.327294	(0.143665; 3.25763)
6	5	60	4	0.182664	(0.080180; 1.81809)
6	5	100	4	0.273978	(0.120262; 2.72696)
6	10	30	4	0.166617	(0.073136; 1.65838)
6	10	60	4	0.319350	(0.140178; 3.17856)
6	10	100	4	0.341733	(0.150003; 3.40134)
6	30	30	4	0.247693	(0.108724; 2.46534)
6	30	60	4	0.281199	(0.123432; 2.79884)
6	30	100	4	0.570581	(0.250456; 5.67912)
8	5	30	4	0.453743	(0.199170; 4.51621)
8	5	60	4	0.260159	(0.114197; 2.58942)
8	5	100	4	0.380103	(0.166846; 3.78325)
8	10	30	4	0.251478	(0.110386; 2.50302)
8	10	60	4	0.338506	(0.148587; 3.36923)
8	10	100	4	0.484139	(0.212512; 4.81874)
8	30	30	4	0.464828	(0.204036; 4.62654)
8	30	60	4	0.468530	(0.205661; 4.66338)
8	30	100	4	0.658258	(0.288942; 6.55179)

Nivel de confianza individual = 99.7222%

#### Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
Bartlett	12.13	0.792



**Prueba de igualdad de varianzas: log (Kb) vs. pH; Dosis; Gradiente**

**Método**

- Hipótesis nula            Todas las varianzas son iguales
- Hipótesis alterna        Por lo menos una varianza es diferente
- Nivel de significancia     $\alpha = 0.05$

*Se utiliza el método de Bartlett. Este método es exacto sólo para datos normales.*

**Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar**

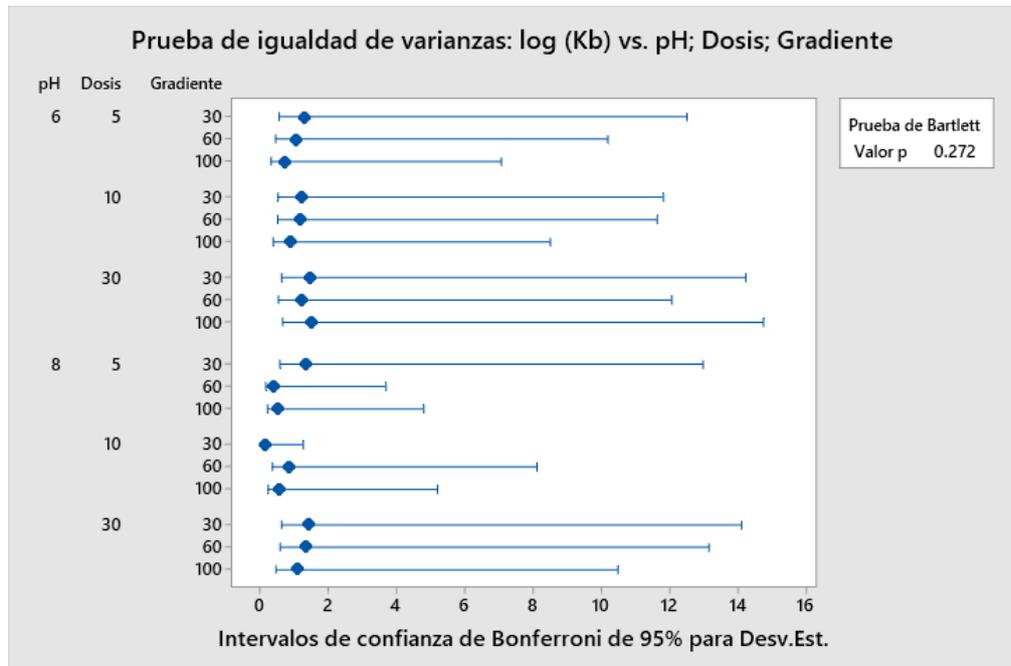


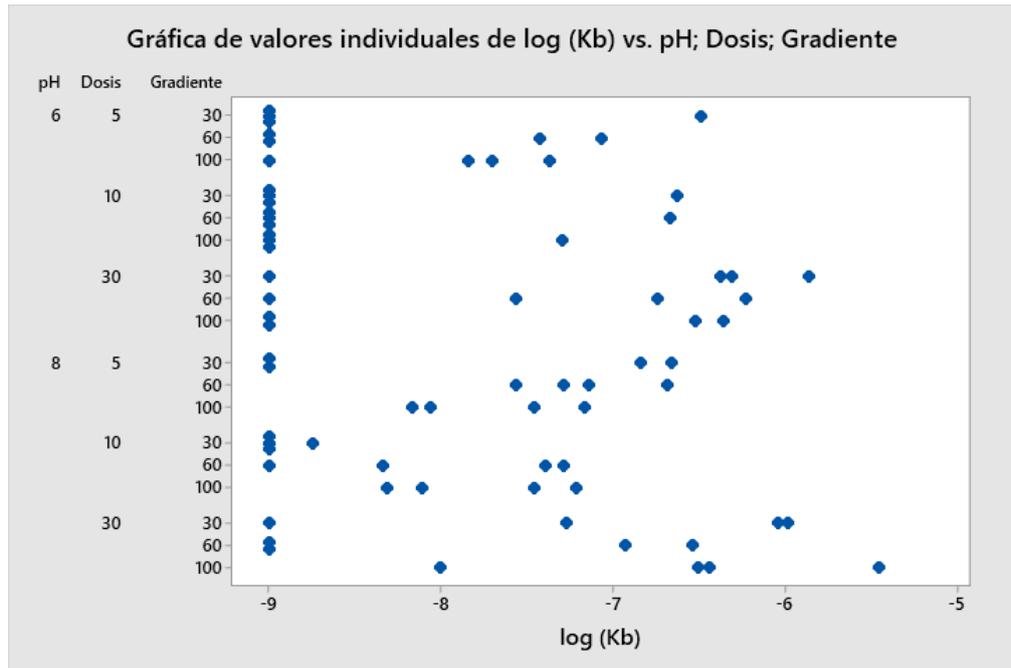
pH	Dosis	Gradiente	N	Desv.Est.	IC
6	5	30	4	1.25594	(0.551294; 12.5007)
6	5	60	4	1.02241	(0.448788; 10.1763)
6	5	100	4	0.70897	(0.311201; 7.0565)
6	10	30	4	1.18646	(0.520794; 11.8091)
6	10	60	4	1.16823	(0.512793; 11.6277)
6	10	100	4	0.85336	(0.374581; 8.4937)
6	30	30	4	1.42840	(0.626996; 14.2172)
6	30	60	4	1.21081	(0.531484; 12.0515)
6	30	100	4	1.48038	(0.649813; 14.7346)
8	5	30	4	1.30285	(0.571883; 12.9675)
8	5	60	4	0.36976	(0.162304; 3.6803)
8	5	100	4	0.48073	(0.211015; 4.7848)
8	10	30	4	0.12643	(0.055495; 1.2584)
8	10	60	4	0.81449	(0.357518; 8.1068)
8	10	100	4	0.52179	(0.229041; 5.1935)
8	30	30	4	1.41612	(0.621606; 14.0950)
8	30	60	4	1.32011	(0.579461; 13.1393)
8	30	100	4	1.05268	(0.462073; 10.4776)

Nivel de confianza individual = 99.7222%

## Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
Bartlett	20.04	0.272





**b) Análisis de varianza (ANOVA), para la determinación del efecto de las variables independientes sobre las constantes cinéticas**

**ANOVA de un solo factor: log (Ka) vs. Tipo de Coagulante**

**Método**

Hipótesis nula                      Todas las medias son iguales  
 Hipótesis alterna                  No todas las medias son iguales  
 Nivel de significancia             $\alpha = 0.05$

*Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.*

**Información del factor**

<b>Factor</b>	<b>Niveles Valores</b>
Tipo de Coagulante	2 Cloruro férrico; Sulfato de aluminio

**Análisis de Varianza**

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Tipo de Coagulante	1	2.204	2.2041	12.64	0.001
Error	70	12.209	0.1744		
Total	71	14.413			

**Medias**

<b>Tipo de Coagulante</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Desv.Est.</b>	<b>IC de 95%</b>
Cloruro férrico	36	-4.5223	0.3947	(-4.6612; -4.3835)
Sulfato de aluminio	36	-4.8723	0.4394	(-5.0111; -4.7335)

*Desv.Est. agrupada = 0.417628*

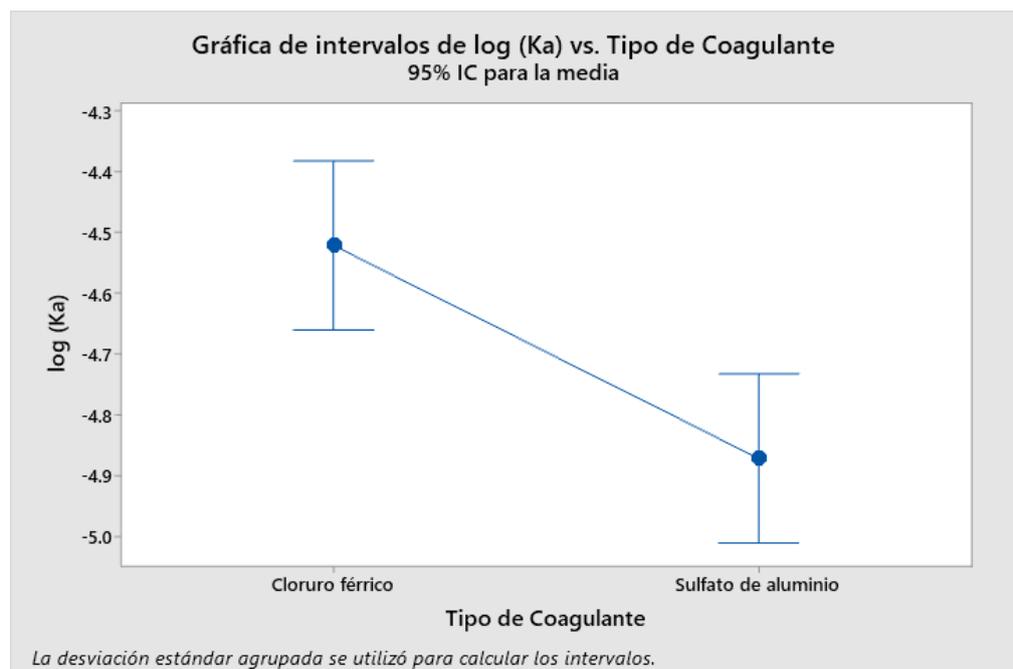
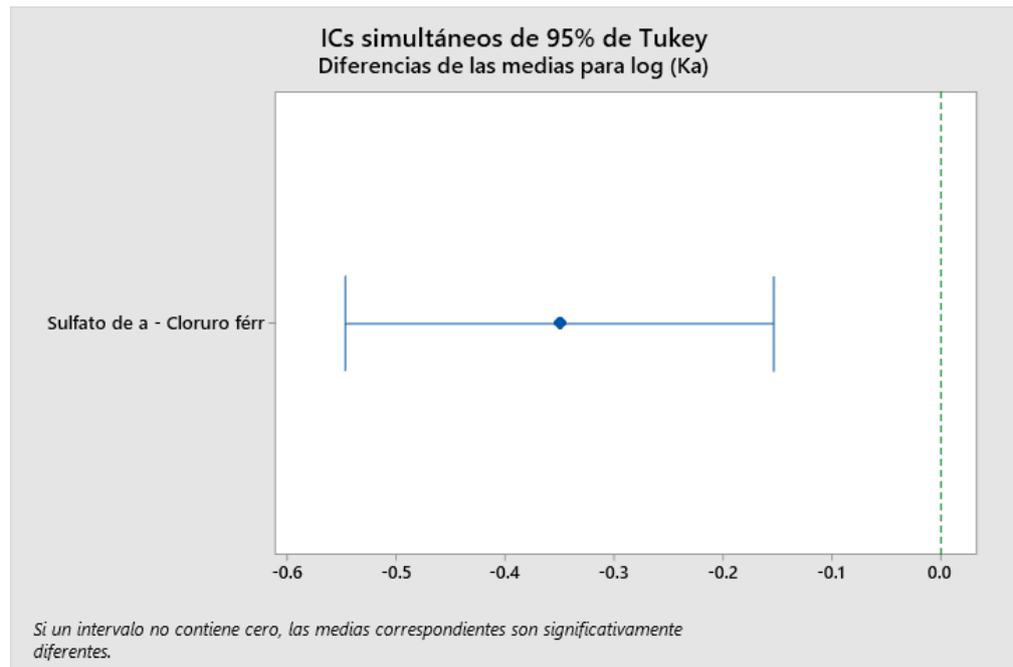


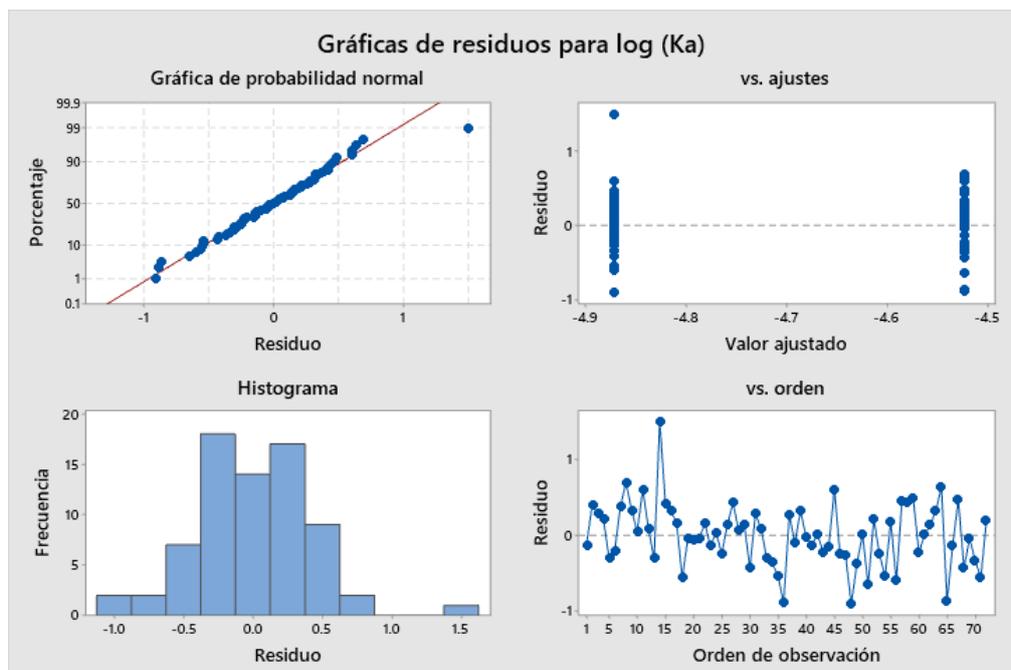
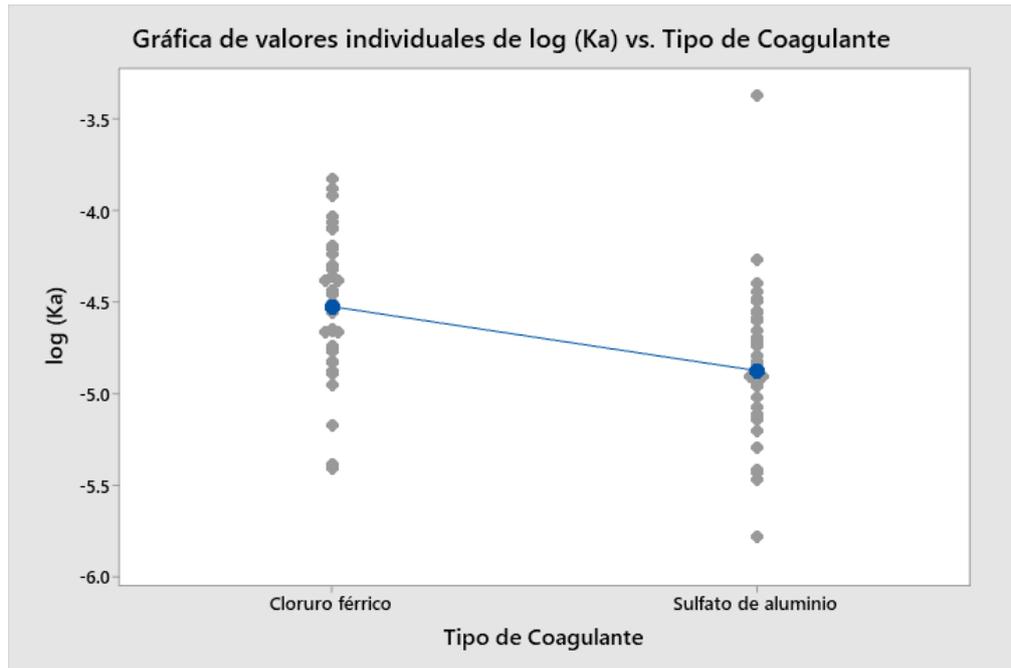
## Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Tipo de Coagulante	N	Media	Agrupación
Cloruro férrico	36	-4.5223	A
Sulfato de aluminio	36	-4.8723	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.





## ANOVA de un solo factor: log (Kb) vs. Tipo de Coagulante

### Método

Hipótesis nula            Todas las medias son iguales  
 Hipótesis alterna        No todas las medias son iguales  
 Nivel de significancia    $\alpha = 0.05$

*Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.*

### Información del factor

Factor	Niveles Valores
--------	-----------------

Tipo de Coagulante            2 Cloruro férrico; Sulfato de aluminio

### Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Tipo de Coagulante	1	7.479	7.479	6.61	0.012
Error	70	79.248	1.132		
Total	71	86.727			

### Medias

Tipo de Coagulante	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Cloruro férrico	36	-7.504	1.120	(-7.857; -7.150)
Sulfato de aluminio	36	-8.148	1.005	(-8.502; -7.795)

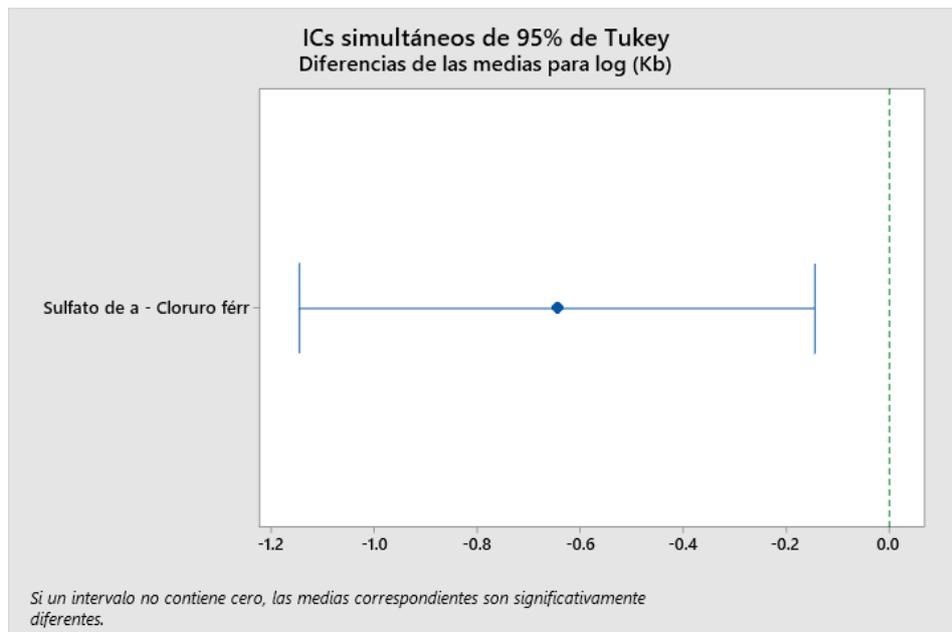
Desv.Est. agrupada = 1.06401

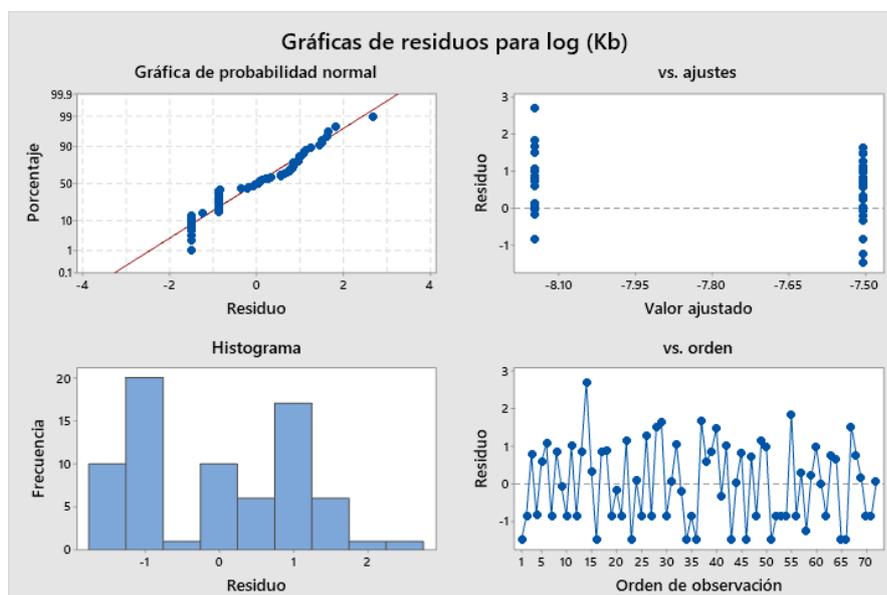
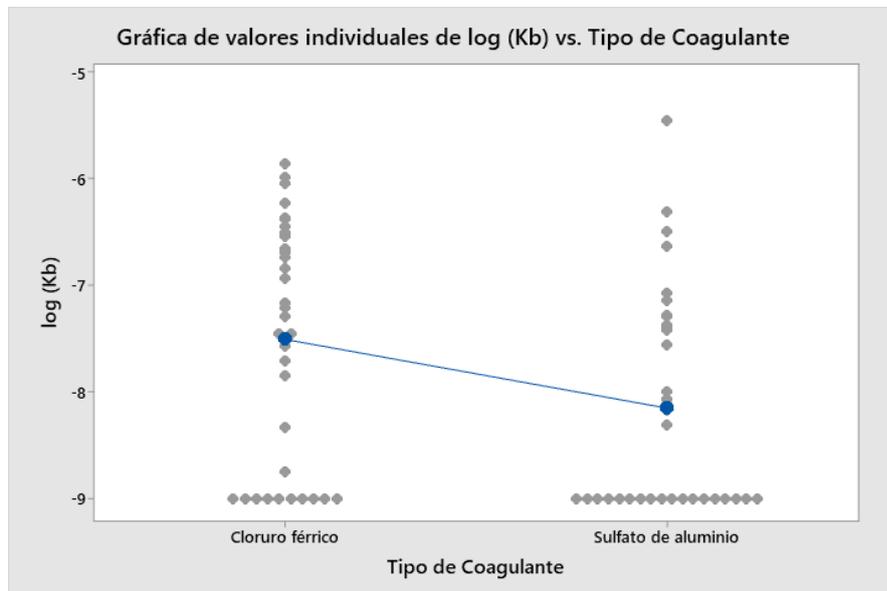
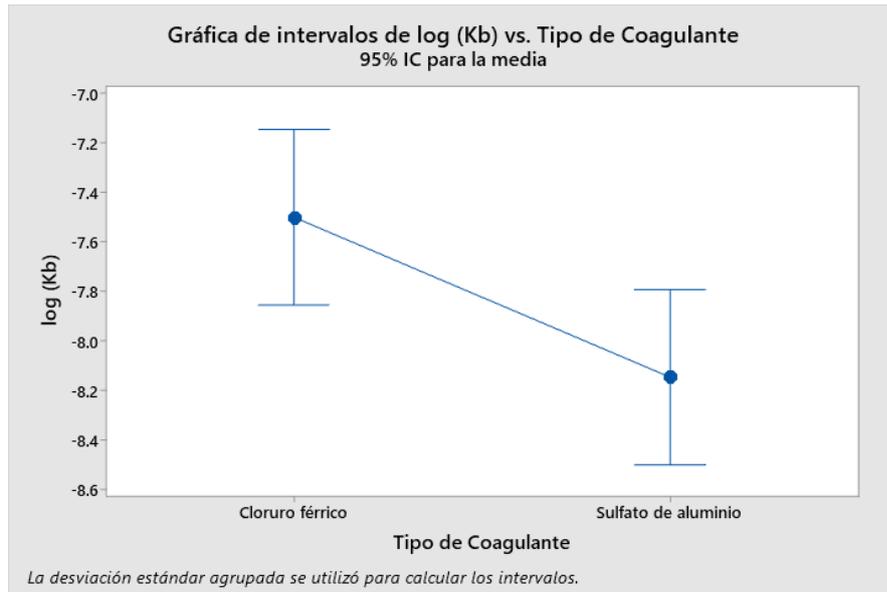
### Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Tipo de Coagulante	N	Media	Agrupación
Cloruro férrico	36	-7.504	A
Sulfato de aluminio	36	-8.148	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.





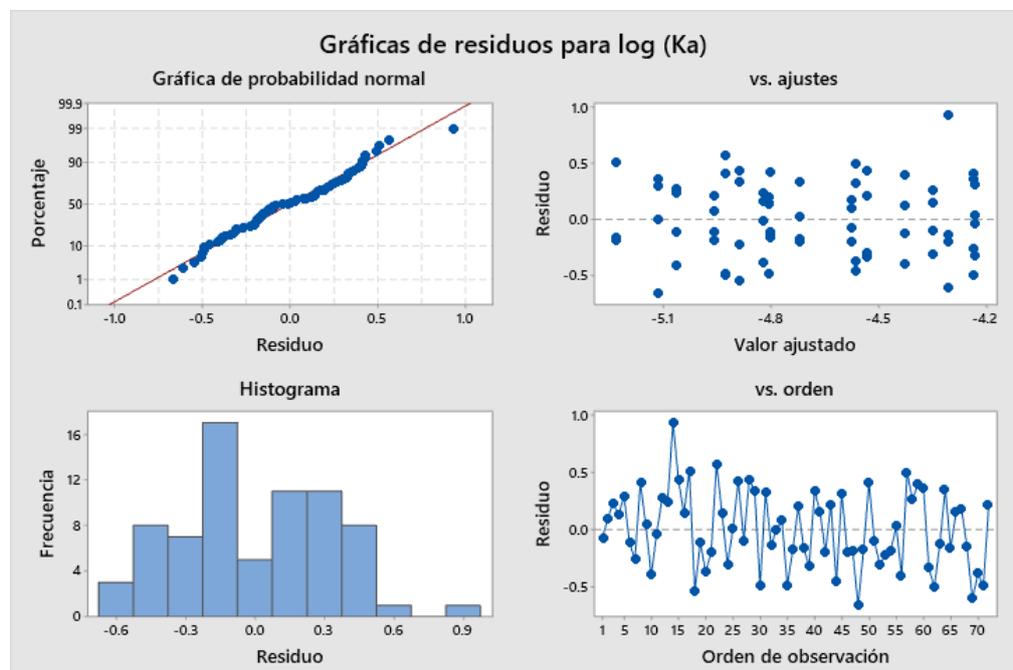
## Regresión factorial general: log (Ka) vs. pH; Dosis; Gradiente

### Información del factor

Factor	Niveles	Valores
pH	2	6; 8
Dosis	3	5; 10; 30
Gradiente	3	30; 60; 100

### Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC	MC		Valor F	Valor p
			Ajust.	Ajust.		
Modelo	17	6.5314	0.3842		2.63	0.004
Lineal	5	3.2110	0.6422		4.40	0.002
pH	1	2.3559	2.3559		16.14	0.000
Dosis	2	0.4636	0.2318		1.59	0.214
Gradiente	2	0.3915	0.1957		1.34	0.270
Interacciones de 2 términos	8	2.1660	0.2708		1.86	0.087
pH*Dosis	2	0.8956	0.4478		3.07	0.055
pH*Gradiente	2	0.3035	0.1517		1.04	0.361
Dosis*Gradiente	4	0.9670	0.2417		1.66	0.174
Interacciones de 3 términos	4	1.1543	0.2886		1.98	0.111
pH*Dosis*Gradiente	4	1.1543	0.2886		1.98	0.111
Error	54	7.8816	0.1460			
Total	71	14.4131				



## Regresión factorial general: log (Kb) vs. pH; Dosis; Gradiente

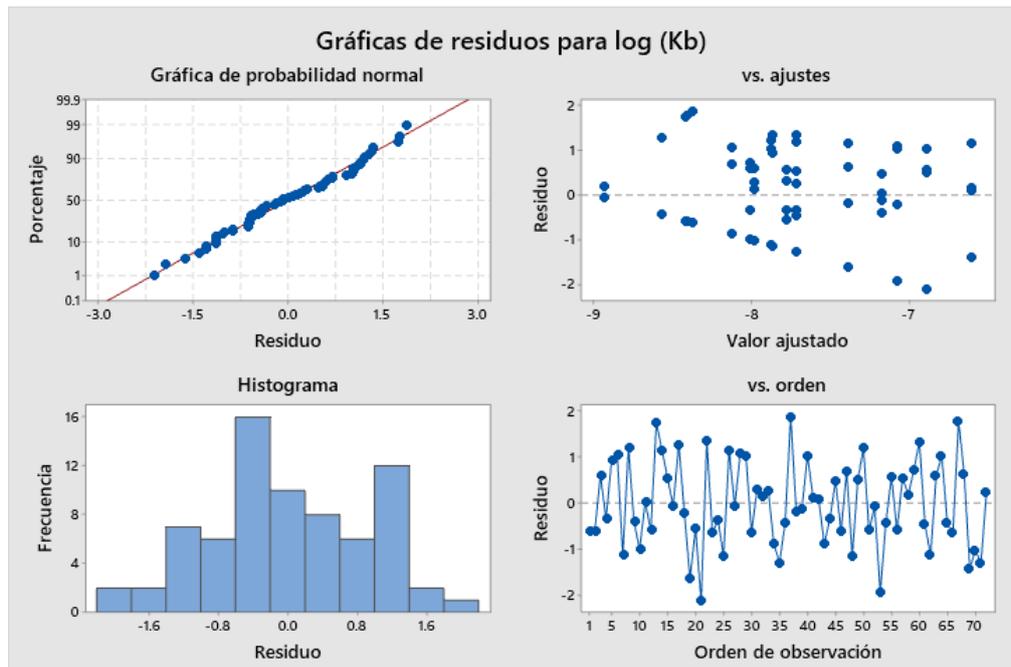
### Información del factor

Factor	Niveles	Valores
pH	2	6; 8

Dosis 3 5; 10; 30  
 Gradiente 3 30; 60; 100

### Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC		
			Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	17	26.1361	1.5374	1.37	0.188
Lineal	5	16.8061	3.3612	3.00	0.019
pH	1	1.8017	1.8017	1.61	0.211
Dosis	2	14.5332	7.2666	6.48	0.003
Gradiente	2	0.4712	0.2356	0.21	0.811
Interacciones de 2 términos	8	5.9921	0.7490	0.67	0.718
pH*Dosis	2	0.6107	0.3053	0.27	0.763
pH*Gradiente	2	1.9342	0.9671	0.86	0.428
Dosis*Gradiente	4	3.4472	0.8618	0.77	0.551
Interacciones de 3 términos	4	3.3378	0.8345	0.74	0.566
pH*Dosis*Gradiente	4	3.3378	0.8345	0.74	0.566
Error	54	60.5911	1.1221		
Total	71	86.7272			



c) Prueba t para el análisis de la eficiencia de un reactor CSTR en función del tiempo de floculación y número de cámaras en el reactor

Prueba T e IC de dos muestras: R para m=1; R para m=2

### Método

$\mu_1$ : media de R para m=1

$\mu_2$ : media de R para m=2

Diferencia:  $\mu_1 - \mu_2$

No se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

### Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
R para m=1	3	6.7719	0.0674	0.039
R para m=2	3	13.67	1.86	1.1

### Estimación de la diferencia

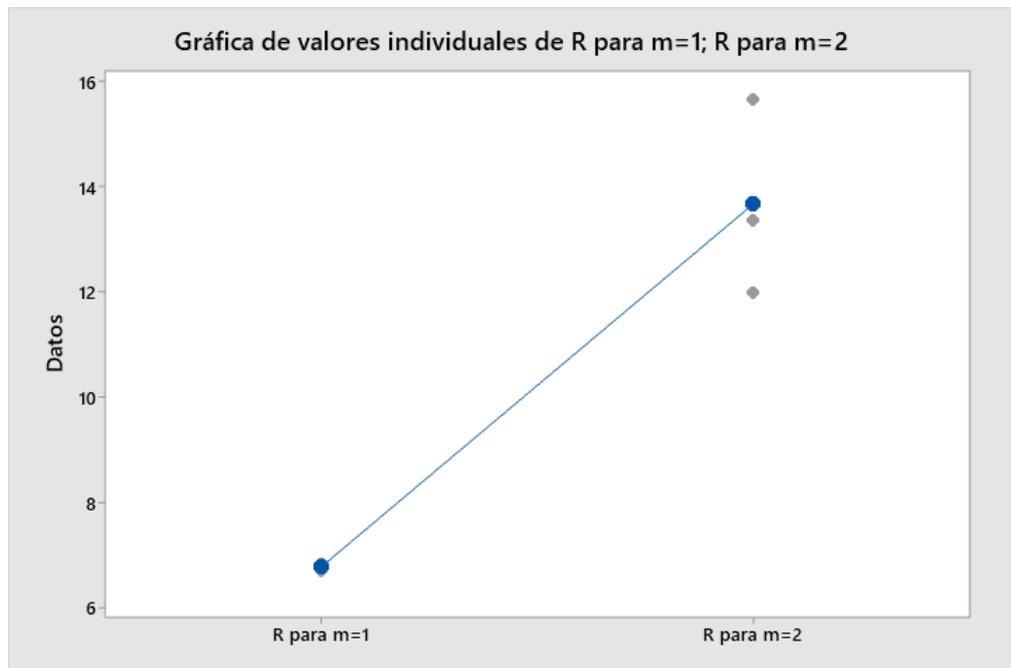
Diferencia	Límite superior de 95% para la diferencia
-6.89	-3.76

### Prueba

Hipótesis nula  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna  $H_1: \mu_1 - \mu_2 < 0$

Valor T	GL	Valor p
-6.43	2	0.012



### Prueba T e IC de dos muestras: R para m=2; R para m=3

#### Método

$\mu_1$ : media de R para m=2

$\mu_2$ : media de R para m=3

Diferencia:  $\mu_1 - \mu_2$

No se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

## Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
R para m=2	3	13.67	1.86	1.1
R para m=3	4	18.07	2.87	1.4

## Estimación de la diferencia

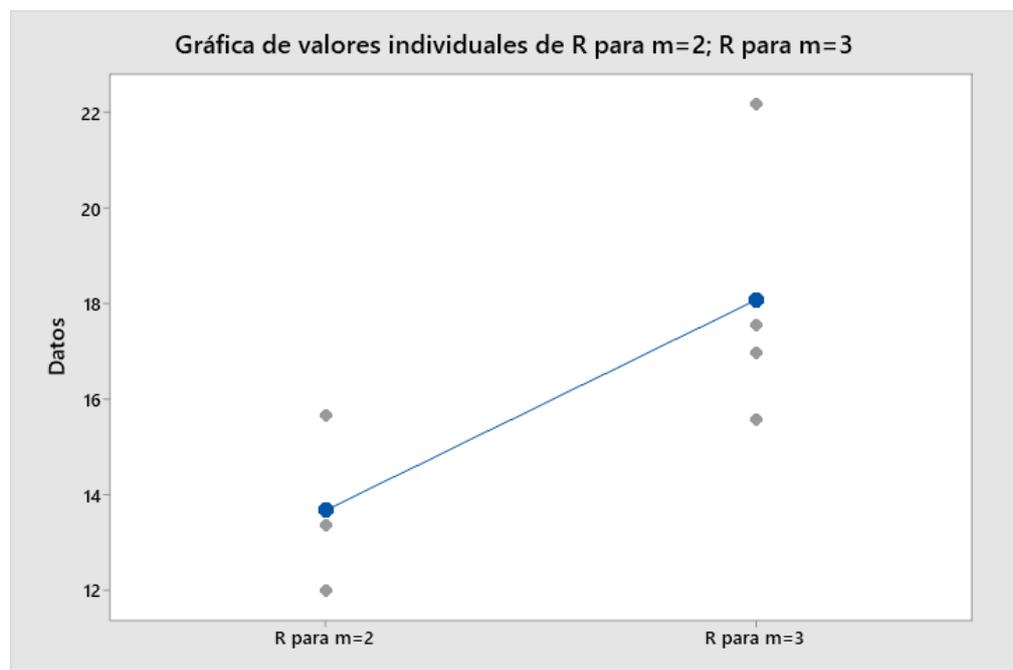
Diferencia	Límite superior de 95% para la diferencia
-4.41	-0.59

## Prueba

Hipótesis nula  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna  $H_1: \mu_1 - \mu_2 < 0$

Valor T	GL	Valor p
-2.46	4	0.035



## 6.8. Informe de control de calidad y certificación del equipo de jarras proporcionado por el fabricante

F-ST-12  
"INFORME DE CONTROL DE CALIDAD DE PRODUCTO"

**Kossodo**  
el mejor EQUIPO para su laboratorio

FECHA DE EMISIÓN: 12/01/2021      REFERENCIA: 13924

INFORMAMOS QUE EL SIGUIENTE PRODUCTO HA SIDO REVISADO POR EL ÁREA DE CONTROL DE CALIDAD DE KOSSODO SAC:

**1.- DATOS DEL PRODUCTO**

DESCRIPCIÓN: FLOCULADOR DE JARRAS JLT6 (6 POSIC.) CIMICROPROC.      CÓDIGO: F105A0109

MARCA: VELP      N° SERIE: 555575

MODELO: JLT6      HISTORIAL: VE04036

**2.- RESULTADOS DE LA REVISIÓN**

	CONFORME	NO CONFORME	NO APLICA
<b>1. INSPECCIÓN FÍSICA</b>			
1,1 INTEGRIDAD	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1,2 INTEGRIDAD DE ACCESORIOS, DOCUMENTOS Y EMBALAJE.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1,3 ACCESORIOS Y DOCUMENTOS COMPLETOS DE ACUERDO AL MANUAL DE USUA	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>2. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO</b>			
2,1 ENCENDIDO	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2,2 "TEST DE INICIO"	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2,3 PRUEBAS DE OPERACIÓN Y PROGRAMACIÓN SEGÚN EL MANUAL DE USUARIO	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2,4 REVISIÓN DE CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2,5 PRUEBAS DE VERIFICACIÓN:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

PARÁMETRO	RESULTADO
RPM	CONFORME
-----	-----
-----	-----
-----	-----

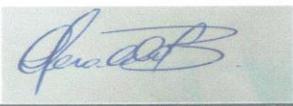
**3.- OBSERVACIONES**

NINGUNO-----

**4.- CONCLUSIONES**

SEGÚN LOS RESULTADOS DE LA REVISIÓN, SE DECLARA AL PRODUCTO:

CONFORME       NO CONFORME



NOMBRE: DOUGLAS GERALDO

## 6.9. Certificado de análisis y calidad del cloruro férrico



### CLORURO FÉRRICO Solución al 40% CERTIFICADO DE CALIDAD

#### 1. Producto Identificación

NOMBRE COMERCIAL: Cloruro Férrico Líquido Solución al 40 %  
SINONIMOS : Tricloruro de Hierro, Cloruro de Hierro (III) en solución  
FORMULA :  $\text{FeCl}_3$   
PESO MOLECULAR : 162.20 g/mol  
CAS : 7705 - 08 - 0  
APLICACIONES : Coagulante líquido inorgánico, tratamiento de agua potable y agua de aporte industrial.  
DATOS FISICOS : Líquido marrón

#### 2. Composición, Ingredientes

ESPECIFICACIONES TECNICAS		
Componentes	Cantidad	Resultados
Cloruro Férrico (como $\text{FeCl}_3$ )	39.00 - 42.00	40%
Cloruro Ferroso (como $\text{FeCl}_2$ )	Máx. 0.5	0.16%
Acidez Libre (como HCl)	Máx. 0.5	0.09%
Insolubles	Máx. 0.5	0.13%
Densidad (g/ml)	1.40-1.44	1.426

#### 3. Presentación

En frascos plásticos de 100 ml, 250 ml 500ml, 1000 ml  
En galoneras de 4L /En bidones de 40 Kg / Cilindros de 55 Galones

#### 4. Caducidad, Lote

LOTE : LT1121020  
FABRICACION: 12/10/2020  
VENCE : 12/10/2025

JUAN FERNÁNDEZ TRUJILLO  
Ing. Químico  
C.I.P 31839

OREGON CHEM GROUP S.A.C RUC: 20604539383  
JR. PEDRO ALCOCER 150 - INT. 2 - SURQUILLO - LIMA

## 6.10. Certificado de análisis y calidad del sulfato de aluminio

Aluminum Sulfate, 18-Hydrate, Crystal  
BAKER ANALYZED® A.C.S. Reagent



Material No.: 0564-05  
Batch No.: 0000155817  
Manufactured Date: 2016/09/02  
Retest Date: 2023/09/01

### Certificate of Analysis

Meets ACS Reagent Chemical Requirements,

Test	Specification	Result
ACS - Assay ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) (by EDTA titrn)	98.0 - 102.0 %	99.5
ACS - Insoluble Matter	$\leq 0.005 \%$	$< 0.001$
ACS - Calcium (Ca)	$\leq 0.01 \%$	$< 0.01$
ACS - Chloride (Cl)	$\leq 0.005 \%$	$< 0.005$
ACS - Heavy Metals (as Pb)	$\leq 0.001 \%$	$< 0.001$
ACS - Iron (Fe)	$\leq 0.002 \%$	$< 0.002$
ACS - Magnesium (Mg)	$\leq 0.002 \%$	$< 0.002$
ACS - Potassium (K)	$\leq 0.005 \%$	$< 0.005$
ACS - Sodium (Na)	$\leq 0.02 \%$	0.01

For Laboratory, Research or Manufacturing Use

Country of Origin: MX  
Packaging Site: Paris Mfg Ctr & DC



Phillipsburg, NJ 9001:2008, 14001:2004, FSSC 22000  
Paris, KY 9001:2008  
Mexico City, Mexico 9001:2008  
Deventer, The Netherlands 9001:2008, 14001:2004, 13485:2003  
Gliwice, Poland 9001:2008, 13485:2012  
Selangor, Malaysia 9001:2008  
Dehradun, India, 9001:2008, 14001:2004, 13485:2003  
Mumbai, India, 9001:2008  
Panoli, India 9001:2008

*James Ethier*

Jamie Ethier  
Vice President Global Quality

For questions on this Certificate of Analysis please contact Technical Services at 855.282.6867 or +1.610.573.2600  
Avantor™ Performance Materials Inc.

3477 Corporate Parkway, Suite #200, Center Valley, PA 18034, U.S.A. Phone: 610.573.2600 . Fax: 610.573.2610



CERTIFICADO DEL AGUA PARA LABORATORIO

Nro. Lote: <b>080121</b>	Fecha de Producción: <b>08-ENE-21</b>	Fecha de Vencimiento: <b>ENE-2022</b>
--------------------------	---------------------------------------	---------------------------------------

PRODUCTO: AGUA TRATADA MICROFILTRADO POR OSMOSIS INVERSA Y DESIONIZADORES PASADO POR EL UV

RESULTADOS: ANÁLISIS QUÍMICOS MEDIDOS EN PLANTA

ANÁLISIS	RESULTADO	RANGO REQUERIDO
Conductividad, realizado por un equipo medidor de conductividad	0.6	< 1 $\mu$ S/cm
PH; realizado por un equipo medidor de pH	7.45	5.5 – 7.5
Dureza Total; realizado por una solución titulación EDTA	0.8	< 1 mg/L

PARAMETROS MEDIDOS EN SETIEMBRE 2020 POR UN LABORATORIO EXTERNO

LABORATORIO : AGQ PERU SAC

N° de Referencia : A-20/091324 ANALISIS FISICO QUIMICO

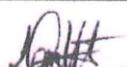
N° de Referencia : A-20/091323 ANALISIS MICROBIOLÓGICO

ANEXO: PARAMETROS FÍSICO QUÍMICOS

Cloruros	mg/L	0.20	Nitratos	mg/L NO3	< 0.50
Aluminio Total	mg/L	< 0.002	Litio Total	mg/L	< 0.0001
Antimonio Total	mg/L	< 0.00002	Magnesio Total	mg/L	< 0.068
Arsenico Total	mg/L	< 0.00004	Manganeso Total	mg/L	< 0.00013
Bario Total	mg/L	< 0.0003	Mercurio Total	mg/L	< 0.00007
Berilio Total	mg/L	< 0.00001	Molibdeno Total	mg/L	< 0.00003
Bismuto Total	mg/L	< 0.00001	Niquel Total	mg/L	< 0.0009
Boro Total	mg/L	< 0.021	Plata Total	mg/L	< 0.00006
Calcio Total	mg/L	< 0.08	Plomo Total	mg/L	< 0.00006
Cerio Total	mg/L	< 0.00001	Potasio Total	mg/L	< 0.08
Cobalto Total	mg/L	< 0.00003	Sodio Total	mg/L	< 0.11
Cobre Total	mg/L	< 0.0003	Talio Total	mg/L	< 0.00001
Cromo Total	mg/L	< 0.0001	Titanio Total	mg/L	< 0.0006
Estaño Total	mg/L	< 0.0001	Torio Total	mg/L	< 0.00001
Estroncio Total	mg/L	< 0.00011	Uranio Total	mg/L	< 0.00001
Fosforo Total	mg/L	< 0.008	Vanadio Total	mg/L	< 0.006
Hierro Total	mg/L	< 0.03	Wolframio Total	mg/L	< 0.00002
Densidad	g/cc	1	Zinc Total	mg/L	< 0.002

ANEXO: PARAMETROS MICROBIOLÓGICOS MEDIDOS EN SETIEMBRE 2020

Bacterias Heterotróficas	u.f.c/ml RE	< 1
Recuento Coliformes Fecales	u.f.c/100 ml	< 1
Recuento Coliformes Totales	u.f.c/100 ml	< 1

  
Damaris Villanueva Morillo  
Ingeniera Química  
Reg. CIP N° 194563

OREGON CHEM GROUP S.A.C RUC: 20604539383  
JR. PEDRO ALCOCER 150 – INT. 2 – SURQUILLO - LIMA

## 6.11. Ficha técnica del pH-metro

Pen type, with electrode, ATC

# pH METER

Model : PH-222

### FEATURES

* Pen type digital pH meter, all in one, pH electrode is included, easy for general purpose application.
* Build in temperature sensor, ATC ( auto temperature compensation ).
* pH 4, pH 7 standard solution are standard accessories.
* Easy to change the pH electrode.
* Temperature measurement, °C, °F.
* IP67, water proof and protection.
* Auto calibration for pH 4, pH 7 or pH 10 or other value.
* High input impedance.
* LCD with two displays and bar graph indicator.
* Data hold function for freezing the desired value.
* Auto power off.
* Records max. and min. value with recall.
* 100 point data logger with recall.
* Microcomputer circuit, intelligent function, high accuracy.
* Compact size, light weight.
* Power supply by DC 1.5 V battery ( UM4/AAA ) x 4 PCs,
* Available for wide applications, such as aquarium, beverage, fish hatcheries, food processing, photography, laboratory, quality control, school & colleges, swimming pools, water conditions.

Sampling Time	Approx. 0.8 second.
pH Temp. Compensation	ATC ( Automatic temperature compensation ), build thermister Temp. sensor.
Memory Recall	Maximum & Minimum value.
pH Calibration	pH 7, pH 4 or pH 10, 3 points calibration ensure the best linearity and accuracy.  * Other calibration point that near the pH 7, pH 4, and pH 10 are available.
Data Logger	Max. can save 100 point data with recall. Manual, push the data logger button once will save data one time.
Circuit	Custom one-chip of microprocessor LSI circuit.
Operating Temperature	0 to 60 °C ( 32 to 140 °F ).
Operating Humidity	Less than 80% RH.
Power Supply	DC 1.5V battery ( UM-4/AAA ) x 4 PCs.
Power Consumption	Approx. 4.8 mA.
Dimension	186 x 40 x 32 mm ( 7.3 x 1.6 x 1.3 inch ). * Meter with pH electrode.
Weight	131 g/0.36 LB (included electrode).
Power off	Auto power shut off to save battery life.
Standard Accessories ( included )	Instruction Manual..... 1 PC pH electrode, PE-12..... 1 PC pH 7.00 buffer solution, PH-07A..... 1 PC pH 4.00 buffer solution, PH-04A..... 1 PC  * PE-12, PH-07A, PH-04A are the consumer accessory.
Optional Accessories	pH electrode, PE-12 pH 7.00 buffer solution, PH-07A pH 4.00 buffer solution, PH-04A Hard carrying case, Model : CA-06 Soft carrying case, Model : CA-52A

### SPECIFICATIONS

Display	LCD, size : 20 mm x 28 mm. * With bar graph indicator.	
Measurement	pH	0 to 14 pH.
Range	Temp.	0 to 60 °C ( 32 to 140 °F ).
Resolution	pH	0.01 pH.
	Temp.	0.1 °C / 0.1 °F.
Accuracy	pH	± 0.02 pH * After calibration, meter without PE-12 electrode.
		± 0.2 pH * After calibration, meter with PE-12 electrode.
	Temp.	± 0.8 °C / ± 1.5 °F.
pH Input Imped:	10 <sup>12</sup> ohms.	
pH Electrode	PE-12, Included.	
Data Hold	Freeze the display reading.	

\* Appearance and specifications listed in this brochure are subject to change without notice.

1702-PH222

## 6.12. Ficha técnica del turbidímetro

### Especificaciones

Las especificaciones están sujetas a cambios sin previo aviso.

Especificación	Detalles
Método de medición	Nefelométrico
Normativa	Cumple con el método 180.1 de la EPA ASTM D7315 - Métodos de prueba estándar para obtener la turbidez por encima de 1 unidad de turbidez (UT) en modo estático ASTM D6665 - Métodos de prueba estándar para obtener la turbidez por debajo de 5 NTU en modo estático
Fuente de luz	Lámpara de filamento de tungsteno
Modos de medición	NTU, NEP (Nephelo), EBC, Abs (absorbancia), %T (% transmitancia), CU (unidades de color) y dos unidades definidas por el usuario

Especificación	Detalles
Rango	NTU (proporción activada, rango manual): 0-0,999; 0-9,99; 0-99,9; 0-10.000 NTU (proporción activada, rango automático): 0-10.000 decimal automático NTU (proporción desactivada): 0-40 Nephelo (proporción activada, rango manual): 0-9,99; 0-99,9; 0-67,000 Nephelo (proporción activada, rango automático): 0-67.000 decimal automático Nephelo (proporción desactivada): 0-268 EBC (proporción activada, rango manual): 0-0,999; 0-9,99; 0-99,9; 0-2450 EBC (proporción activada, rango automático): 0-2450 decimal automático EBC (proporción desactivada): 0-9,8 Absorbancia (rango manual): 0-0,999; 0-2,00 Absorbancia (rango automático): 0-2,00 Transmitancia (%): 1,0-100 Unidades de color (a 455 nm): 0-500

Especificación	Detalles
Precisión <sup>1, 2, 3, 4</sup>	Proporción activada: $\pm 2\%$ de la lectura más 0,01 NTU desde 0-1000 NTU, $\pm 5\%$ de la lectura desde 1000-4000 NTU, $\pm 10\%$ de la lectura desde 4000-10,000 NTU Proporción desactivada: $\pm 2\%$ de la lectura más 0,01 NTU desde 0-40 NTU Absorbancia: $\pm 0,005$ Abs desde 0-1 Abs a 455 nm Transmitancia: 0,12% T desde 10-100% T a 455 nm Color: $\pm 2$ CU desde 0-30 (calibrado a 15 CU), $\pm 5$ CU desde 0-500 CU (calibrado a 500 CU)
Resolución	Turbidez: 0,001 NTU/EBC Nephelo: 0,01 Absorbancia: 0,001 Abs Transmitancia: 0,1% T Color: 1 CU
Repetibilidad	$\pm 1\%$ de la lectura o 0,01 NTU, lo que sea mayor (en condiciones de referencia)
Tiempo de respuesta	Promedio de señal desactivado: 6,8 segundos Promedio de señal activado: 14 segundos (cuando se emplean 10 mediciones para calcular la media)
Tiempo de estabilización	Proporción activada: 30 minutos tras arranque Proporción desactivada: 60 minutos tras arranque

Especificación	Detalles
Modos de medición	Rango manual o automático; promedio de señal activado y ajustable o desactivado; proporción activada o desactivada
Requisitos de energía	Corriente alterna de 115-230 voltios; 50/60 Hz (selección automática) 28 W máximo
Categoría del nivel de contaminación/instalación	2; II
Clase de protección	1
Condiciones de funcionamiento	Temperatura: 0 a 40 °C (32 a 104 °F) Humedad relativa: 0-90% a 25 °C, 0-75% a 40 °C, sin condensación Altitud: 2000 m (6560 pies) máximo Sólo para uso en interiores
Condiciones de almacenamiento	-40 a 60 °C (-40 a 140 °F), sólo el instrumento
Impresora	Integrada (térmica, 58 mm, hasta 28 columnas)
Interfaz	Interfaz en serie RS232C a través de un conector D-sub DB9 para la salida de datos a un ordenador o impresora y para la entrada de datos (comando). Sin establecimiento de comunicación.
Purga de aire	Nitrógeno seco o aire de calidad para uso en instrumentos 0,1 pcm a 69 kPa (10 psig); 138 kPa (20 psig) máximo Conexión de espiga para tubos de 1/8 de pulgada

<sup>1</sup> Especificaciones de turbidez identificadas utilizando el ensamblado del filtro USEPA, estándar de formazina de elaboración reciente y cubetas de muestras coincidentes de 25 mm.

<sup>2</sup> Utilice una celda de flujo si es necesario para obtener las especificaciones de medición de color.

<sup>3</sup> La radiación electromagnética intermitente de 3 voltios/metro o superior puede provocar leves desvíos de precisión.

<sup>4</sup> Condiciones de referencia: 23  $\pm$  2 °C, 50%  $\pm$  10% HR sin condensación, 115/230 VCA, 50/60 Hz

Especificación	Detalles
Cubetas de muestras	Cubetas redondas de 95 x 25 mm (3.74 x 1 pulg.) Vidrio de borosilicato con capuchones roscados forrados de goma <i>Nota: Pueden usarse cubetas de muestras más pequeñas (de menos de 25 mm) empleando un adaptador.</i>
Requisitos de la muestra:	Cubeta de muestras de 25 mm: 20 ml mínimo 0 a 95 °C (32 a 203 °F) <i>Nota: Consulte Use un adaptador de cubetas en la página 44 para conocer el tamaño mínimo de muestra cuando no use una cubeta de medición de 25 mm.</i>
Carcasa	Plástico de policarbonato de alto impacto
Dimensiones	30,5 x 40 x 15,6 cm (12,0 x 15,7 x 6,1 pulg.)
Peso	3,8 kg (8,5 lb)
Certificación	CE, cETLus

### Información general

En ningún caso el fabricante será responsable de ningún daño directo, indirecto, especial, accidental o resultante de un defecto u omisión en este manual. El fabricante se reserva el derecho a modificar este manual y los productos que describen en cualquier momento, sin aviso ni obligación. Las ediciones revisadas se encuentran en la página web del fabricante.

### Información de seguridad

AVISO
El fabricante no es responsable de los daños provocados por un mal uso o aplicación incorrecta del producto. Entre estos daños se incluyen, sin limitación, los daños directos y accidentales. El usuario sólo es responsable de identificar los riesgos críticos de aplicación y de instalar adecuadamente los mecanismos para proteger los procesos en caso de que el equipo no funcione correctamente.

Lea todo el manual antes de desembalar, instalar o trabajar con este equipo. Ponga atención a todas las advertencias y avisos de peligro. El no hacerlo puede provocar heridas graves al usuario o daños al equipo. Asegúrese de que la protección proporcionada por el equipo no está dañada. No utilice ni instale este equipo de manera distinta a lo especificado en este manual.

### Uso de la información sobre riesgos

<b>▲ PELIGRO</b>
Indica una situación potencial o de riesgo inminente que, de no evitarse, provocará la muerte o lesiones graves.
<b>▲ ADVERTENCIA</b>
Indica una situación potencial o inminentemente peligrosa que, de no evitarse, podría provocar la muerte o lesiones graves.
<b>▲ PRECAUCIÓN</b>
Indica una situación potencialmente peligrosa que podría provocar una lesión menor o moderada.
<b>AVISO</b>
Indica una situación que, si no se evita, puede provocar daños en el instrumento. Información que requiere especial énfasis.

## 6.13. Ficha técnica del equipo de jarras

### Easy to use and Reliable

Digital Flocculators in 4 and 6 positions with timer and illuminated back panel to allow standard conditions to be met during Jar Testing in water treatment plants.

- Digitally selectable speed from 10 to 300 rpm
- Microprocessor controlled operating timer for unattended operation
- Stirring rods adjustable in height without tools
- Intuitive and bright digital display to precisely set stirring speed and timer
- Identical speed and time for all positions for comparable results
- Strong resistance to chemical and mechanical corrosion



#### INSTRUMENT - CODE

JLT 4	100-240 V / 50-60 Hz	F105A0108
JLT 6	100-240 V / 50-60 Hz	F105A0109

#### TECHNICAL DATA

	JLT 4	JLT 6
CONSTRUCTION MATERIAL	Epoxy painted metal structure	Epoxy painted metal structure
NUMBER OF SAMPLES	4 positions	6 positions
BACK PANEL	Disconnectable illuminated	Disconnectable illuminated
STAINLESS STEEL STIRRING RODS	Adjustable in height by a selflocking chuck	Adjustable in height by a selflocking chuck
MONOSELECTOR	Same speed for each rod	Same speed for each rod
ELECTRONIC SPEED CONTROL	From 10 to 300 rpm	From 10 to 300 rpm
SPEED SETTING INTERVAL	1 rpm	1 rpm
MICROPROCESSOR CONTROLLED TIMER	0÷999 min or 0 ÷99 hours (or continuous)	0÷999 min or 0 ÷99 hours (or continuous)
POWER	11 W	19 W
DIMENSIONS (WXHXD)	645x347x260 mm (25.4x13.7x10.2 in)	935x347x260 mm (36.8x13.7x10.2 in)
WEIGHT	13 kg (28.6 lb)	17 kg (37.4 lb)



We reserve the right to make technical alterations  
We do not assume liability for errors in printing, typing or transmission



**DESIGNED AND MANUFACTURED IN ITALY**

<b>ITALY - HQ</b> Via Stazione 16 20805 Usmate (MB) Italy Tel. +39 039 628811 velpitala@veip.com <b>INDIA</b> velpindia@veip.com	<b>USA</b> 150 Keyland Court, Bohemia NY 11716 - U.S. Tel. +1 631 573 6002 velpusa@veip.com	<b>CHINA</b> Wintong Rd Building 28, Lane 1333 Shanghai city - China Tel. +86 18017557328 velpchina@veip.com
--	---	--

## 6.14. Banco de datos recolectados en las etapas de muestro y laboratorio

I. IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA							
Temporada:	Sequía	<input type="checkbox"/>	Lluvia	<input checked="" type="checkbox"/>			
Muestra N°:	<input type="text" value="01"/>						
Fecha:	<input type="text" value="09/03/21"/>						
Turbiedad:	<input type="text" value="44.0"/>	NTU					
pH:	<input type="text" value="7.25"/>						
Temperatura:	<input type="text" value="12.7"/>	°C					
II. ENSAYO DE FLOCULACIÓN							
Ensayo N°	<input type="text" value="01-03"/>						
Gradiente MR:	<input type="text" value="300"/>	/min					
Tiempo MR:	<input type="text" value="30"/>	s					
Conc. Sol. Madre :	<input type="text" value="1"/>	%					
Tiempo sedimentación:	<input type="text" value="20"/>	min					
Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
C.F	6.00	10	30	43.1	0	43.1	1.000
					5	41.8	0.970
					10	26.0	0.603
					15	27.4	0.636
					20	17.5	0.406
					30	10.1	0.234
					40	8.95	0.208
Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
S.A	6.00	10	30	36.4	0	36.4	1.000
					5	35.3	0.970
					10	21.7	0.596
					15	10.7	0.294
					20	7.08	0.195
					30	6.24	0.171
					40	5.45	0.150
Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
S.A	6.00	5	100	35.2	0	35.2	1.000
					5	16.8	0.477
					10	14.2	0.403
					15	10.6	0.301
					20	5.8	0.165
					30	5.7	0.162
					40	5.6	0.159

**I. IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA**

**Temporada:** Sequía  Lluvia   
**Muestra N°:**   
**Fecha:**   
**Turbiedad:**  NTU  
**pH:**   
**Temperatura:**  °C

**II. ENSAYO DE FLOCULACIÓN**

**Ensayo N°**   
**Gradiente MR:**  /min  
**Tiempo MR:**  s  
**Conc. Sol. Madre :**  %  
**Tiempo sedimentación:**  min

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
C.F	8.00	10	60	93.6	0	93.6	1.000
					5	43.2	0.462
					10	9.96	0.106
					15	5.12	0.055
					20	5.85	0.063
					30	1.16	0.012
					40	1.25	0.013

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
C.F	8.00	30	60	120.0	0	120.0	1.000
					5	95.5	0.796
					10	93.2	0.777
					15	90.2	0.752
					20	79.0	0.658
					30	69.9	0.583
					40	61.5	0.513

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
S.A	6.00	5	60	80.3	0	80.3	1.000
					5	73.2	0.912
					10	70.5	0.878
					15	72.3	0.9000
					20	65.8	0.819
					30	61.2	0.762
					40	58.1	0.724

**I. IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA**

**Temporada:** Sequía  Lluvia   
**Muestra N°:**   
**Fecha:**   
**Turbiedad:**  NTU  
**pH:**   
**Temperatura:**  °C

**II. ENSAYO DE FLOCULACIÓN**

**Ensayo N°**   
**Gradiente MR:**  /min  
**Tiempo MR:**  s  
**Conc. Sol. Madre :**  %  
**Tiempo sedimentación:**  min

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
S.A	8.00	5	30	25.3	0	25.3	1.000
					5	21.7	0.858
					10	16.0	0.632
					15	9.04	0.357
					20	8.08	0.319
					30	3.00	0.119
					40	2.61	0.103

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
C.F	8.00	5	30	20.5	0	20.5	1.000
					5	5.37	0.262
					10	3.24	0.158
					15	1.93	0.094
					20	0.49	0.024
					30	0.62	0.030
					40	0.55	0.027

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
C.F	8.00	5	60	23.8	0	23.8	1.000
					5	8.83	0.371
					10	1.34	0.056
					15	1.14	0.048
					20	1.09	0.046
					30	0.936	0.039
					40	0.895	0.038

**I. IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA**

**Temporada:** Sequía  Lluvia   
**Muestra N°:**   
**Fecha:**   
**Turbiedad:**  NTU  
**pH:**   
**Temperatura:**  °C

**II. ENSAYO DE FLOCULACIÓN**

**Ensayo N°**   
**Gradiente MR:**  /min  
**Tiempo MR:**  s  
**Conc. Sol. Madre :**  %  
**Tiempo sedimentación:**  min

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
S.A	8.00	10	60	35.9	0	35.9	1.000
					5	35.4	0.986
					10	26.9	0.749
					15	12.5	0.348
					20	8.59	0.239
					30	4.33	0.121
					40	3.75	0.104

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
S.A	8.00	5	60	30.4	0	30.4	1.000
					5	14.1	0.464
					10	4.69	0.154
					15	4.76	0.157
					20	2.64	0.087
					30	2.80	0.092
					40	2.72	0.089

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
S.A	6.00	10	60	33.2	0	33.2	1.000
					5	29.4	0.886
					10	20.6	0.620
					15	10.6	0.319
					20	8.38	0.252
					30	5.50	0.166
					40	5.01	0.151

I. IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA

Temporada: Sequía  Lluvia

Muestra N°: 05

Fecha: 23/03/21

Turbiedad: 19.97 NTU

pH: 7.89

Temperatura: 12.3 °C

II. ENSAYO DE FLOCULACIÓN

Ensayo N° 13-15

Gradiente MR: 300 /min

Tiempo MR: 30 s

Conc. Sol. Madre : 1 %

Tiempo sedimentación: 20 min

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
C.F	6.00	10	60	15.7	0	15.7	1.000
					5	15.1	0.962
					10	14.2	0.904
					15	15.6	0.994
					20	14.2	0.904
					30	14.2	0.904
					40	13.9	0.885

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
S.A	8.00	30	100	12.1	0	12.1	1.000
					5	10.0	0.826
					10	9.95	0.822
					15	9.78	0.808
					20	9.90	0.818
					30	10.3	0.851
					40	10.3	0.851

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
C.F	8.00	5	100	9.72	0	9.72	1.000
					5	1.60	0.165
					10	1.24	0.128
					15	1.16	0.119
					20	0.419	0.043
					30	1.01	0.104
					40	0.518	0.053

**I. IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA**

**Temporada:**      Sequía                       Lluvia   
**Muestra N°:**        
**Fecha:**              
**Turbiedad:**       NTU  
**pH:**                  
**Temperatura:**     °C

**II. ENSAYO DE FLOCULACIÓN**

**Ensayo N°**              
**Gradiente MR:**     /min  
**Tiempo MR:**         s  
**Conc. Sol. Madre :**  %  
**Tiempo sedimentación:**  min

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
C.F	8.00	10	30	23.0	0	23.0	1.000
					5	19.9	0.865
					10	4.15	0.180
					15	2.25	0.098
					20	1.01	0.044
					30	0.865	0.038
					40	0.815	0.035

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
S.A	6.00	10	100	21.0	0	21.0	1.000
					5	16.1	0.767
					10	10.9	0.519
					15	6.43	0.306
					20	5.84	0.278
					30	7.32	0.349
					40	6.25	0.298

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
S.A	8.00	30	30	20.3	0	20.3	1.000
					5	20.2	0.995
					10	20.2	0.995
					15	19.9	0.980
					20	17.2	0.847
					30	18.7	0.921
					40	17.6	0.867

**I. IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA**

**Temporada:** Sequía  Lluvia   
**Muestra N°:**   
**Fecha:**   
**Turbiedad:**  NTU  
**pH:**   
**Temperatura:**  °C

**II. ENSAYO DE FLOCULACIÓN**

**Ensayo N°**   
**Gradiente MR:**  /min  
**Tiempo MR:**  s  
**Conc. Sol. Madre :**  %  
**Tiempo sedimentación:**  min

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
C.F	8.00	10	30	23.0	0	23.0	1.000
					5	19.9	0.865
					10	4.15	0.180
					15	2.25	0.098
					20	1.01	0.044
					30	0.865	0.038
					40	0.815	0.035

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
S.A	6.00	10	100	21.0	0	21.0	1.000
					5	16.1	0.767
					10	10.9	0.519
					15	6.43	0.306
					20	5.84	0.278
					30	7.32	0.349
					40	6.25	0.298

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
S.A	8.00	30	30	20.3	0	20.3	1.000
					5	20.2	0.995
					10	20.2	0.995
					15	19.9	0.980
					20	17.2	0.847
					30	18.7	0.921
					40	17.6	0.867









**I. IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA**

**Temporada:** Sequía  Lluvia   
**Muestra N°:**   
**Fecha:**   
**Turbiedad:**  NTU  
**pH:**   
**Temperatura:**  °C

**II. ENSAYO DE FLOCULACIÓN**

**Ensayo N°**   
**Gradiente MR:**  /min  
**Tiempo MR:**  s  
**Conc. Sol. Madre :**  %  
**Tiempo sedimentación:**  min

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
C.F	6.00	5	60	10.8	0	10.8	1.000
					5	9.47	0.877
					10	8.98	0.831
					15	7.19	0.666
					20	1.06	0.098
					30	0.916	0.085
					40	0.825	0.076

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
S.A.	6.00	30	100	9.50	0	9.50	1.000
					5	9.31	0.980
					10	8.86	0.933
					15	8.65	0.911
					20	6.76	0.712
					30	3.14	0.331
					40	2.95	0.311

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
C.F	6.00	10	100	13.7	0	13.7	1.000
					5	12.4	0.905
					10	10.2	0.745
					15	11.0	0.803
					20	9.31	0.680
					30	5.90	0.431
					40	5.47	0.399

**I. IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA**

**Temporada:**      Sequía                       Lluvia   
**Muestra N°:**        
**Fecha:**              
**Turbiedad:**       NTU  
**pH:**                  
**Temperatura:**    °C

**II. ENSAYO DE FLOCULACIÓN**

**Ensayo N°**              
**Gradiente MR:**     /min  
**Tiempo MR:**         s  
**Conc. Sol. Madre :**  %  
**Tiempo sedimentación:**  min

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
S.A	6.00	5	30	15.5	0	15.5	1.000
					5	12.6	0.813
					10	12.8	0.826
					15	10.9	0.703
					20	10.2	0.658
					30	8.20	0.529
					40	7.80	0.503

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
S.A	6.00	30	60	13.2	0	13.2	1.000
					5	11.9	0.902
					10	10.7	0.811
					15	7.69	0.583
					20	6.29	0.477
					30	5.12	0.388
					40	4.85	0.367

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
S.A	8.00	5	60	14.0	0	14.0	1.000
					5	10.6	0.757
					10	6.39	0.456
					15	2.89	0.206
					20	2.16	0.154
					30	2.63	0.188
					40	2.38	0.170

### I. IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA

**Temporada:** Sequía  Lluvia   
**Muestra N°:** 14  
**Fecha:** 06/05/21  
**Turbiedad:** 9.93 NTU  
**pH:** 7.42  
**Temperatura:** 13.7 °C

### II. ENSAYO DE FLOCULACIÓN

**Ensayo N°** 40-42  
**Gradiente MR:** 300 /min  
**Tiempo MR:** 30 s  
**Conc. Sol. Madre :** 1 %  
**Tiempo sedimentación:** 20 min

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
C.F	8.00	30	30	15.1	0	15.1	1.000
					5	15.1	1.000
					10	15.1	1.000
					15	15.0	0.993
					20	14.9	0.987
					30	14.9	0.987
					40	15.0	0.993

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
C.F	6.00	5	100	9.40	0	9.40	1.000
					5	7.22	0.768
					10	1.46	0.155
					15	1.46	0.155
					20	0.941	0.100
					30	1.18	0.126
					40	1.12	0.119

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
C.F	8.00	30	100	14.6	0	14.6	1.000
					5	14.6	1.000
					10	14.5	0.993
					15	14.5	0.993
					20	14.5	0.993
					30	14.5	0.993
					40	14.6	1.000

### I. IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA

**Temporada:** Sequía  Lluvia   
**Muestra N°:** 15  
**Fecha:** 10/05/21  
**Turbiedad:** 9.10 NTU  
**pH:** 7.01  
**Temperatura:** 12.2 °C

### II. ENSAYO DE FLOCULACIÓN

**Ensayo N°** 43-45  
**Gradiente MR:** 300 /min  
**Tiempo MR:** 30 s  
**Conc. Sol. Madre :** 1 %  
**Tiempo sedimentación:** 20 min

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
C.F	6.00	5	60	10.4	0	10.4	1.000
					5	9.14	0.879
					10	6.72	0.646
					15	2.35	0.264
					20	2.11	0.203
					30	0.961	0.092
					40	0.885	0.085

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
S.A	8.00	10	100	7.95	0	7.95	1.000
					5	7.74	0.974
					10	4.30	0.541
					15	3.55	0.447
					20	2.45	0.308
					30	1.87	0.235
					40	1.75	0.220

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
C.F	8.00	5	60	8.26	0	8.26	1.000
					5	1.75	0.212
					10	0.667	0.081
					15	1.09	0.132
					20	0.936	0.113
					30	0.827	0.100
					40	0.795	0.096



### I. IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA

**Temporada:**                    Sequía                     Lluvia   
**Muestra N°:**                      
**Fecha:**                              
**Turbiedad:**                     NTU  
**pH:**                                  
**Temperatura:**                 °C

### II. ENSAYO DE FLOCULACIÓN

**Ensayo N°**                          
**Gradiente MR:**                 /min  
**Tiempo MR:**                     s  
**Conc. Sol. Madre :**             %  
**Tiempo sedimentación:**     min

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
C.F	6.00	30	30	23.2	0	23.2	1.000
					5	23.2	1.000
					10	23.2	1.000
					15	23.0	0.991
					20	23.1	0.996
					30	23.0	0.991
					40	23.0	0.991

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
C.F	6.00	30	100	21.7	0	21.7	1.000
					5	21.7	1.000
					10	21.5	0.991
					15	21.5	0.991
					20	21.5	0.991
					30	21.6	0.995
					40	21.6	0.995

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
C.F	6.00	10	60	12.4	0	12.4	1.000
					5	10.9	0.879
					10	10.7	0.863
					15	10.2	0.823
					20	8.48	0.684
					30	4.48	0.361
					40	3.98	0.321

**I. IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA**

**Temporada:** Sequía  Lluvia   
**Muestra N°:** 18  
**Fecha:** 20/05/21  
**Turbiedad:** 7.69 NTU  
**pH:** 7.37  
**Temperatura:** 12.8 °C

**II. ENSAYO DE FLOCULACIÓN**

**Ensayo N°** 52-54  
**Gradiente MR:** 300 /min  
**Tiempo MR:** 30 s  
**Conc. Sol. Madre :** 1 %  
**Tiempo sedimentación:** 20 min

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
S.A	8.00	10	30	8.40	0	8.40	1.000
					5	7.34	0.874
					10	6.99	0.832
					15	5.71	0.680
					20	3.56	0.424
					30	1.12	0.133
					40	0.956	0.114

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
S.A	8.00	30	30	7.83	0	7.83	1.000
					5	7.77	0.992
					10	7.44	0.950
					15	7.00	0.894
					20	6.70	0.856
					30	4.25	0.543
					40	4.05	0.517

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
S.A	6.00	10	100	7.02	0	7.02	1.000
					5	7.01	0.999
					10	6.84	0.974
					15	6.30	0.897
					20	5.22	0.744
					30	2.11	0.301
					40	2.00	0.285

I. IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA

Temporada: Sequía  Lluvia   
 Muestra N°: 19  
 Fecha: 24/05/21  
 Turbiedad: 8.80 NTU  
 pH: 7.02  
 Temperatura: 13.6 °C

II. ENSAYO DE FLOCULACIÓN

Ensayo N°: 55-57  
 Gradiente MR: 300 /min  
 Tiempo MR: 30 s  
 Conc. Sol. Madre: 1 %  
 Tiempo sedimentación: 20 min

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
S.A	6.00	30	30	9.44	0	9.44	1.000
					5	9.11	0.965
					10	8.42	0.892
					15	8.84	0.936
					20	7.88	0.835
					30	7.58	0.803
					40	7.60	0.805

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
S.A	6.00	10	60	8.97	0	8.97	1.000
					5	7.70	0.858
					10	7.85	0.875
					15	8.25	0.920
					20	7.47	0.833
					30	5.78	0.644
					40	5.50	0.613

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
C.F	8.00	10	100	8.78	0	8.78	1.000
					5	1.24	0.141
					10	0.664	0.076
					15	0.763	0.087
					20	1.06	0.121
					30	0.367	0.042
					40	0.325	0.037

### I. IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA

**Temporada:** Sequía  Lluvia   
**Muestra N°:** 20  
**Fecha:** 26/05/21  
**Turbiedad:** 10.05 NTU  
**pH:** 7.74  
**Temperatura:** 12.2 °C

### II. ENSAYO DE FLOCULACIÓN

**Ensayo N°** 58-60  
**Gradiente MR:** 300 /min  
**Tiempo MR:** 30 s  
**Conc. Sol. Madre :** 1 %  
**Tiempo sedimentación:** 20 min

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
C.F	8.00	10	30	11.0	0	11.0	1.000
					5	6.23	0.566
					10	1.83	0.166
					15	0.851	0.077
					20	0.553	0.050
					30	0.355	0.032
					40	0.281	0.026

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
C.F	8.00	10	60	9.62	0	9.62	1.000
					5	2.04	0.212
					10	0.711	0.074
					15	0.397	0.041
					20	0.324	0.034
					30	0.300	0.031
					40	0.295	0.031

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
C.F	8.00	30	60	18.1	0	18.1	1.000
					5	18.1	1.000
					10	18.1	1.000
					15	18.0	0.994
					20	17.9	0.989
					30	18.0	0.994
					40	18.0	0.994

**I. IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA**

**Temporada:**      Sequía       Lluvia   
**Muestra N°:**        
**Fecha:**              
**Turbiedad:**       NTU  
**pH:**                  
**Temperatura:**     °C

**II. ENSAYO DE FLOCULACIÓN**

**Ensayo N°**              
**Gradiente MR:**     /min  
**Tiempo MR:**         s  
**Conc. Sol. Madre :**  %  
**Tiempo sedimentación:**  min

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-l)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
S.A	8.00	5	100	9.12	0	9.12	1.000
					5	7.13	0.782
					10	5.21	0.571
					15	1.86	0.204
					20	1.29	0.141
					30	1.52	0.167
					40	1.23	0.135

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-l)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
S.A	8.00	5	30	8.12	0	8.12	1.000
					5	7.52	0.926
					10	7.79	0.959
					15	5.38	0.663
					20	3.58	0.441
					30	1.73	0.213
					40	1.53	0.188

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-l)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
S.A	8.00	10	60	7.70	0	7.70	1.000
					5	7.02	0.912
					10	2.68	0.348
					15	1.06	0.138
					20	0.998	0.130
					30	1.63	0.212
					40	1.17	0.152

**I. IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA**

**Temporada:**                      Sequía                       Lluvia   
**Muestra N°:**                        
**Fecha:**                                
**Turbiedad:**                       NTU  
**pH:**                                      
**Temperatura:**                     °C

**II. ENSAYO DE FLOCULACIÓN**

**Ensayo N°**                              
**Gradiente MR:**                    /min  
**Tiempo MR:**                         s  
**Conc. Sol. Madre :**                 %  
**Tiempo sedimentación:**        min

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
C.F	8.00	5	30	14.9	0	14.9	1.000
					5	4.95	0.332
					10	1.70	0.114
					15	0.925	0.062
					20	0.756	0.051
					30	0.517	0.035
					40	0.395	0.027

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
C.F	6.00	10	100	15.3	0	15.3	1.000
					5	14.3	0.935
					10	15.1	0.987
					15	12.3	0.804
					20	8.00	0.523
					30	5.81	0.380
					40	5.36	0.350

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
C.F	6.00	5	30	12.4	0	12.4	1.000
					5	10.7	0.863
					10	11.0	0.887
					15	9.49	0.765
					20	3.25	0.302
					30	1.78	0.144
					40	1.55	0.125





### I. IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA

**Temporada:** Sequía  Lluvia   
**Muestra N°:** 24  
**Fecha:** 09/06/21  
**Turbiedad:** 9.10 NTU  
**pH:** 7.45  
**Temperatura:** 13.2 °C

### II. ENSAYO DE FLOCULACIÓN

**Ensayo N°** 70-72  
**Gradiente MR:** 300 /min  
**Tiempo MR:** 30 s  
**Conc. Sol. Madre :** 1 %  
**Tiempo sedimentación:** 20 min

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
S.A	6.00	5	100	8.46	0	8.46	1.000
					5	7.05	0.833
					10	6.09	0.720
					15	5.58	0.660
					20	3.44	0.407
					30	2.52	0.298
					40	2.01	0.238

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
S.A	6.00	30	100	6.91	0	6.91	1.000
					5	6.84	0.990
					10	6.65	0.962
					15	6.25	0.904
					20	5.14	0.744
					30	2.01	0.291
					40	2.25	0.326

Tipo de coagulante (S.A o C.F)	pH (-)	Dosis (mg/l)	G floculación (s-1)	NTU después de la MR (No)	T floculación (min)	NTU final (N)	Indice floculación (N/No)
C.F	8.00	5	100	7.42	0	7.42	1.000
					5	2.01	0.271
					10	1.30	0.175
					15	0.618	0.083
					20	0.686	0.092
					30	0.508	0.068
					40	0.264	0.036