



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**EFFECTO DE LA POLIACRILAMIDA EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN, PARA LA
REMOCIÓN DE NUTRIENTES Y BIOMASA DE MICROALGAS EN EL AGUA DEL LAGO DE
AMATITLÁN, UTILIZANDO SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE**

Jorge Antonio Gamas Lara

Asesorado por el Ing. Jorge Mario Estrada Asturias

Guatemala, agosto de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EFFECTO DE LA POLIACRILAMIDA EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN, PARA LA
REMOCIÓN DE NUTRIENTES Y BIOMASA DE MICROALGAS EN EL AGUA DEL LAGO DE
AMATITLÁN, UTILIZANDO SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JORGE ANTONIO GAMAS LARA

ASESORADO POR EL ING. JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, AGOSTO DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIA	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Gerardo Ordoñez
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Wong Davi
EXAMINADOR	Ing. Jorge Rodolfo García Carrera
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EFFECTO DE LA POLIACRILAMIDA EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN, PARA LA REMOCIÓN DE NUTRIENTES Y BIOMASA DE MICROALGAS EN EL AGUA DEL LAGO DE AMATITLÁN, UTILIZANDO SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 1 de Julio de 2020.

Jorge Antonio Gamas Lara

Guatemala 04 de Febrero de 2021

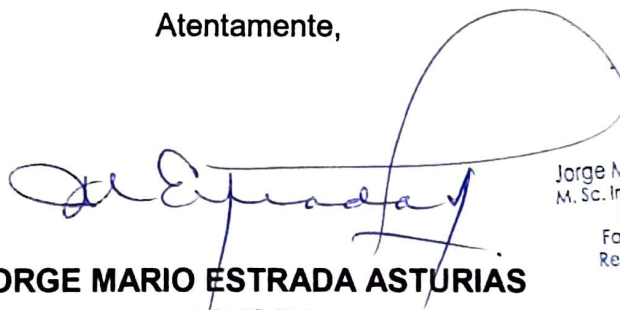
Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejilla
DIRECTOR
Escuela Ingeniería Química
Presente.

Estimado Ingeniero Williams Guillermo Álvarez Mejilla:

Le saludo cordialmente, deseándole éxitos en sus actividades. Por medio de la presente hago constar que he revisado y aprobado el Informe Final del trabajo de graduación titulado: **"Efecto de la poliacrilamida en el proceso de coagulación, para la remoción de nutrientes y biomasa de microalgas en el agua del lago de Amatitlán, utilizando sulfato de aluminio como coagulante"**, elaborado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Química, Jorge Antonio Gamas Lara, quien se identifica con el registro académico 2016-02508 y con el CUI 3133 48014 12 16.

Agradeciendo la atención a la presente, me suscribo de usted,

Atentamente,



JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS
ASESOR
INGENIERO QUÍMICO
COLEGIADO ACTIVO No. 685

Jorge Mario ESTRADA ASTURIAS
M. Sc. Ingeniero Químico Col. 685
PROFESOR TITULAR
Facultad de Ingeniería
Registro USAC 20080059



Guatemala, 04 de mayo de 2021.
Ref. EIQ.TG-IF.015.2021.

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **016-2020**, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL

Solicitado por el estudiante universitario: **Jorge Antonio Gamas Lara**.
Identificado con número de carné: **3133480141216**.
Identificado con registro académico: **201602508**.
Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Química**.
En la modalidad: **Informe Final, Seminario de Investigación**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:


EFFECTO DE LA POLIACRILAMIDA EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN, PARA LA REMOCIÓN DE NUTRIENTES Y BIOMASA DE MICROALGAS EN EL AGUA DEL LAGO DE AMATITLÁN, UTILIZANDO SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

Jorge Mario Estrada Asturias, profesional de la Ingeniería Química

Habiendo encontrado el referido trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”
ANA RUFINA HERRERA SOTO
INGENIERA QUIMICA
COL. 2151


Ana Rufina Herrera Soto
profesional de la Ingeniería Química
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación

C.c.: archivo



Guatemala, 20 de agosto de 2021.
Ref. EIQ.158.2021

Aprobación del informe final del trabajo de graduación

Ingeniera
Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Revisado el INFORME FINAL DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN (TESIS), DENOMINADO **EFFECTO DE LA POLIACRILAMIDA EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN, PARA LA REMOCIÓN DE NUTRIENTES Y BIOMASA DE MICROALGAS EN EL AGUA DEL LAGO DE AMATITLÁN, UTILIZANDO SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE** del(la) estudiante Jorge Antonio Gamas Lara, se conceptúa que el documento presentado, reúne todas las condiciones de calidad en materia administrativa y académica (rigor, pertinencia, secuencia y coherencia metodológica), por lo tanto, se procede a la autorización del mismo, para que el(la) estudiante pueda optar al título de Ingeniería Química.

“Id y Enseñad a Todos”


Ing. Williams G. Alvarez Areja, M.C., M.U.I.E.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Cc. Archivo
WGAM/wgam



Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Arquitectura y de Ingeniería



Formando Ingenieros Químicos en Guatemala desde 1939



**NO SALGAS
QUÉDATE EN
CASA**

DTG. 368-2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **EFFECTO DE LA POLIACRILAMIDA EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN, PARA LA REMOCIÓN DE NUTRIENTES Y BIOMASA DE MICROALGAS EN EL AGUA DEL LAGO DE AMATITLÁN, UTILIZANDO SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE**, presentado por el estudiante universitario: **Jorge Antonio Gamas Lara**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, agosto de 2021

AACE/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por el don de la vida, su amor, sus infinitas bendiciones, llenarme de sabiduría y acompañarme en todo momento.
Mis padres	Jorge Luis Gamas Velásquez y Claudia Yesenia Lara Girón. Por creer en mí siempre, por su amor, ejemplo, compañía, esfuerzo y apoyarme en todo momento.
Mi Hermana	Kateryn Gamas. Por su apoyo, cariño, compañía y confianza a lo largo de la vida.
Mis tíos	Carlos y Eduardo Gamas. Por su cariño, atención, apoyo y cuidados, han sido como un segundo padre para mí.
Mis abuelos	Consuelo Girón, Elizabeth Velásquez y Jorge Gamas, por siempre brindarme de su apoyo, amor y comprensión.
Mis tías	Por ser una fuente de felicidad en mi vida, por su cariño y siempre apoyarme.
Mi familia	En general, por su apoyo y cariño incondicional a lo largo de mi vida.

Mis amigos

De la universidad, del colegio y de toda la vida, por estar conmigo en los momentos importantes de mi vida. Por compartir risas, alegrías, tristezas, experiencias, viajes y miles de momentos felices. Por siempre apoyarme y ser la familia que pude escoger.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la institución que me dio la oportunidad de una educación superior, por brindarme los estudios y conocimientos necesarios para convertirme en un profesional exitoso.
Facultad de Ingeniería	Por ser el centro de enseñanza que me brindo el conocimiento y las herramientas necesarias para poder formarme como ingeniero y poder afrontar los retos que se presenten.
Mis amigos	Anabela del Cid, Andy Solares y Lucía Baiza, por su apoyo, motivación, cariño, paciencia y compañía en los momentos de alegrías y tristezas durante la carrera, sin ustedes este trayecto hubiera sido muy difícil.
Ing. Jorge Mario Estrada Asturias	Por su paciencia, consejos, tiempo y apoyo. Por compartir sus conocimientos, motivaciones y experiencias, para poder llevar a cabo este trabajo de investigación.
Laboratorio de Agua del Instituto de Fomento Municipal	Por permitirme utilizar sus instalaciones y equipos y brindarme apoyo para poder realizar la fase experimental de este trabajo de investigación a pesar las difíciles circunstancias.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS.....	XV
HIPÓTESIS	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. MARCO CONCEPTUAL.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación	8
1.3. Determinación del problema.....	9
1.3.1. Definición	9
1.3.2. Delimitación	9
2. MARCO TEÓRICO.....	11
2.1. Coagulación.....	11
2.1.1. Teoría de coagulación	11
2.1.2. Etapas de coagulación	14
2.1.3. Tipos de coagulación.....	14
2.1.4. Coagulante	15
2.1.4.1. Coagulantes más utilizados	15
2.1.5. Coagulantes metálicos	16
2.1.5.1. Sulfato de Aluminio.....	16
2.1.6. Factores que afectan el proceso de coagulación....	17

	2.1.6.1.	Dosificación de coagulante.....	17
2.2.		Floculación	18
	2.2.1.	Teoría de Floculación.....	18
	2.2.2.	Tipos de floculación.....	20
	2.2.3.	Mecanismos de acción de la Floculación	21
	2.2.4.	Floculante.....	21
		2.2.4.1. Floculantes Minerales	22
		2.2.4.2. Floculantes Orgánicos Naturales	22
		2.2.4.3. Floculantes Orgánicos Sintéticos	22
		2.2.4.3.1. Poliacrilamida.....	23
	2.2.5.	Parámetros que afectan la Floculación	23
2.3.		Prueba de Jarras (Jar Test)	24
2.4.		Color y Turbiedad en el agua	25
	2.4.1.	Turbiedad	25
	2.4.2.	Color.....	26
2.5.		Nutrientes en el agua	26
	2.5.1.	Nitrógeno total	27
	2.5.2.	Fósforo total	27
2.6.		Microalgas.....	28
	2.6.1.	Eutrofización.....	29
3.		DISEÑO METODOLÓGICO.....	31
	3.1.	Localización	31
	3.2.	Variables	31
		3.2.1. Variables dependientes	31
		3.2.2. Variables Independientes	31
	3.3.	Delimitación del campo de estudio.....	32
	3.4.	Obtención y número de las muestras.....	32
	3.5.	Recursos humanos disponibles	32

3.6.	Recursos materiales disponibles	32
3.6.1.	Equipo	33
3.6.2.	Cristalería	35
3.6.3.	Reactivos	36
3.7.	Técnicas cuantitativas de la investigación	37
3.7.1.	Prueba de jarras	38
3.7.2.	Determinación de Color en agua	40
3.7.3.	Determinación de turbiedad.....	40
3.7.4.	Determinación de Nitrógeno total	41
3.7.5.	Determinación de Fósforo total.....	42
3.7.6.	Determinación de densidad óptica.....	43
3.7.7.	Determinación de porcentajes de remoción	44
3.8.	Recolección y ordenamiento de la información	44
3.9.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	47
3.10.	Análisis estadístico	47
3.10.1.	Media aritmética	47
3.10.2.	Varianza de la muestra.....	48
3.10.3.	Análisis de varianza.....	48
3.10.4.	Prueba de Tukey.	49
3.11.	Plan de análisis de datos.....	49
3.11.1.	Programas para el análisis de datos.....	49
4.	RESULTADOS	51
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	65
	CONCLUSIONES	73

RECOMENDACIONES 75
BIBLIOGRAFÍA..... 77
APÉNDICE 83

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Desestabilización de Partículas coloidales.....	12
2.	Equipo de prueba de jarras “Phipps & Bird, INC. Richmond, VA. 23228” de 6 jarras utilizado.....	33
3.	Termo-reactor Hach DRB 200 utilizado.....	34
4.	Espectrofotómetro Hach DR 3900 utilizado.....	34
5.	Turbidímetro Hach “2100P Turbidimeter” utilizado.....	35
6.	Set de reactivos “Lovibond” para fósforo total utilizado.....	36
7.	Set de reactivos 1 y 2 “Lovibond” para nitrógeno total utilizado.....	37
8.	Descripción del experimento para determinar dosis óptima de sulfato de aluminio.....	45
9.	Descripción del experimento para determinar dosis óptima de poliacrilamida.....	46
10.	Porcentaje de remoción de color en función de la dosis de coagulante $Al_2(SO_4)_3$	52
11.	Porcentaje de remoción de Turbiedad en función de la dosis de coagulante $Al_2(SO_4)_3$	53
12.	Porcentaje de remoción de nitrógeno total en función de la dosis de coagulante $Al_2(SO_4)_3$	54
13.	Porcentaje de remoción de fósforo total en función de la dosis de coagulante $Al_2(SO_4)_3$	55
14.	Porcentaje de remoción de densidad óptica en función de la dosis de coagulante $Al_2(SO_4)_3$	56

15.	Porcentaje de remoción de color en función de la dosis de floculante poliacrilamida.....	58
16.	Porcentaje de remoción de turbiedad en función de la dosis de floculante poliacrilamida.....	59
17.	Porcentajes de remoción de nitrógeno total en función de la dosis de floculante poliacrilamida.....	60
18.	Porcentaje de remoción de fósforo total en función de la dosis de floculante poliacrilamida.....	61
19.	Porcentajes de remoción de densidad óptica en función de la dosis de floculante poliacrilamida.....	62

TABLAS

I.	Caracterización de agua cruda en época seca y lluviosa.	51
II.	Porcentajes de remoción para agua tratada con coagulante $Al_2(SO_4)_3$, época lluviosa.	51
III.	Porcentajes de remoción para agua tratada con coagulante $Al_2(SO_4)_3$, época seca.....	52
IV.	Dosis óptima de coagulante $Al_2(SO_4)_3$ en época lluviosa y seca.	56
V.	Porcentajes de remoción para agua tratada con coagulante $Al_2(SO_4)_3$ y floculante poliacrilamida, época lluviosa.....	57
VI.	Porcentajes de remoción para agua tratada con coagulante $Al_2(SO_4)_3$ y floculante poliacrilamida, época seca.....	57
VII.	Dosis óptima de floculante poliacrilamida, para la época seca y la época lluviosa.	62
VIII.	Comparación de porcentajes de remoción de tratamiento con coagulante $Al_2(SO_4)_3$ y el tratamiento agregando floculante poliacrilamida, en época lluviosa y seca.	63

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
abs	Absorbancia
D.O.	Densidad óptica
F	Estadístico F de Fisher
P	Fósforo
g	gramo
L	Litro
mg	Miligramo
mL	Mililitro
mg/L	Miligramo por litro
N	Nitrógeno
pH	Potencial de hidrogeno
ppm	Partes por millón
Al₂(SO₄)₃	Sulfato de aluminio
NTU	Unidades nefelometrías de turbiedad
PtCo	Unidades platino-cobalto
rpm	revoluciones por minuto

GLOSARIO

Absorbancia	Medida de la cantidad de intensidad de luz absorbida por una muestra.
Aguas Residuales	Efluentes de agua que presenta diversos contaminantes, provenientes de actividades humanas domésticas, industriales o comunitarias.
Coagulación	Proceso de desestabilización partículas coloidales suspendidas y dispersas en el agua, al neutralizar sus cargas, provocando la formación de flóculos.
Coagulante	Compuesto químico que posee la capacidad de desestabilizar la materia coloidal suspendida en el agua, a través de la alteración de la capa iónica cargada eléctricamente que rodea las partículas.
Coloide	Sistema fisicoquímico formado por dos fases, una fase que se encuentra continua y otra que se encuentra dispersa.
Color	Parámetro organoléptico indicativo de la calidad del agua, el cual depende de la presencia materia orgánica natural, sustancias disueltas y partículas en suspensión en el agua.

Densidad Óptica	Magnitud física que mide el grado de luz incidente que es absorbida por un elemento, tomando en cuenta una longitud de onda dada.
Época Lluviosa	Época del año en la cual se produce la mayor parte las precipitaciones de un año en una región determinada, en Guatemala se da en los meses de mayo a octubre.
Época Seca	Época del año en la cual se incrementa la presión atmosférica y las precipitaciones son escasas, en Guatemala se da en los meses de noviembre a abril.
Equipo de Jarras	Equipo que permite agitar de forma simultánea, diferentes muestras contenidas en una serie de jarras, a una velocidad controlada.
Floculación	Proceso físico en el que se aumenta la cohesión de partículas coloidales y se favorece el aumento de peso y volumen de los flóculos formados.
Floculante	Polímero o polielectrólito de peso molecular elevado, que favorece la unión y sedimentación de los flóculos formados en la coagulación.
Flóculos	Masa formada por la aglomeración de partículas coloidales suspendidas en al agua, por lo general su formación es inducida.

Poliacrilamida	Polielectrolito de cadena larga y flexible, de formula $(C_3H_5NO)_n$, soluble en agua, que mejora la velocidad de formación de flóculos.
Sulfato de Aluminio	Sal de aluminio de formula $Al_2(SO_4)_3$, de color blanco, es el coagulante más utilizado en el tratamiento de aguas residuales, como clarificador.
Turbidímetro	Instrumento utilizado para medir la cantidad de partículas coloidales suspendidas en una muestra de agua, con la unidad nefelométrica de turbidez (NTU), utilizando un haz de luz.
Turbiedad	Medida del grado de transparencia que pierde el agua o cualquier líquido incoloro.

RESUMEN

Esta investigación evaluó el efecto que puede provocar un floculante orgánico, como la poliacrilamida, en la remoción de nutrientes y biomasa de microalgas (representada por la densidad óptica) en agua del lago de Amatitlán a escala laboratorio. Utilizando sulfato de aluminio, un coagulante inorgánico, para llevar a cabo el proceso de coagulación.

Para ello, se tomaron seis diferentes muestras de agua cruda del lago de Amatitlán. Tres muestras se tomaron en 3 semanas distintas en época lluviosa (mes de agosto) y las otras tres, se tomaron en 3 semanas distintas de la época seca (mes de enero y febrero). Cada muestra de agua cruda se caracterizó por medio de los parámetros: color, turbiedad, nitrógeno total, fósforo total y biomasa de microalgas representada por la densidad óptica. Luego, con cada muestra de agua se llevaron a cabo dos pruebas de jarras diferentes. En la primera prueba de jarras solamente se utilizó sulfato de aluminio como coagulante. En esta primera prueba se trabajó con 4 dosis diferentes de coagulante: 60 mg/L, 80 mg/L, 100 mg/L y 120 mg/L. Al terminar la prueba se analizó la muestra de cada una de las jarras, midiendo los parámetros de color, turbiedad, nitrógeno total, fósforo total y biomasa de micro algas, para determinar la remoción de estos parámetros e identificar la dosis óptima de sulfato de aluminio.

En la segunda variante, se combinó un tratamiento con sulfato de aluminio y poliacrilamida, esta última sustancia se utilizó con el fin de que actuara como un floculante. En esta prueba de jarras se trabajó con una dosis fija de coagulante (la óptima de la primera prueba) combinada con 4 dosis diferentes

de floculante: 10 mg/L, 15 mg/L, 20 mg/L y 25 mg/L. Al igual que con la primera prueba se analizó la muestra de cada una de las jarras, midiendo los parámetros de color, turbiedad, nitrógeno total, fósforo total y biomasa de microalgas representada por la densidad óptica, para poder determinar si la poliacrilamida mejora la remoción de estos parámetros y luego poder determinar la dosis óptima de poliacrilamida.

Posteriormente, se determinaron los porcentajes de remoción de los parámetros analizados (Color, turbiedad, nitrógeno total, fósforo total y biomasa de microalgas) para cada una de las pruebas de jarras realizadas con las 6 muestras de agua. Con base en los porcentajes de remoción se determinó que la dosis óptima de sulfato de aluminio, tanto para la época lluviosa como la época seca, fue de 100 mg/L.

En base en un análisis estadístico, utilizando un nivel de significancia de 0,05, se determinó que, para las variables de color, turbiedad, nitrógeno total y densidad óptica, la poliacrilamida no tuvo un efecto significativo en la remoción de estos parámetros en ambas épocas. Respecto al fósforo total, se determinó que la poliacrilamida tiene un efecto significativo en la remoción de ese parámetro, en ambas épocas. Se determinó que la dosis óptima de poliacrilamida en la remoción de fósforo, para ambas épocas, fue 20 mg/L, al trabajar junto con una dosis 100 mg/L de sulfato de aluminio.

OBJETIVOS

General

Determinar el efecto que tiene la aplicación de poliacrilamida como ayudante en el proceso de coagulación para la remoción de nutrientes y biomasa de microalgas en el agua del lago de Amatitlán a escala laboratorio, utilizando sulfato de aluminio como floculante.

Específicos

1. Caracterizar la calidad del agua cruda del lago de Amatitlán por medio de los parámetros: color, turbiedad, nitrógeno total, fósforo total y biomasa de microalgas.
2. Determinar la dosis óptima del coagulante inorgánico sulfato de aluminio, por medio de la prueba de jarras, para la remoción de turbiedad, nitrógeno total, fósforo total y biomasa de microalgas en el agua del lago de Amatitlán.
3. Determinar la dosis óptima de poliacrilamida que optimice el proceso de coagulación con el sulfato de aluminio.
4. Evaluar el efecto de la poliacrilamida en el proceso de coagulación para la remoción de color, turbiedad, nitrógeno total, fósforo total y biomasa de microalgas, en comparación a utilizar solo sulfato de aluminio.

HIPÓTESIS

Hipótesis de trabajo

El uso de poliacrilamida aumenta la eficiencia del coagulante inorgánico sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) en la remoción de nutrientes y biomasa de microalgas en el proceso de tratamiento de agua proveniente del lago de Amatitlán.

Hipótesis Estadísticas

Objetivo	Hipótesis nula (H0)	Hipótesis alternativa (H1)
2	No existe diferencia significativa entre los porcentajes de remoción al variar la cantidad de sulfato de aluminio en el tratamiento del agua.	Existe diferencia significativa entre los porcentajes de remoción al variar la cantidad de sulfato de aluminio en el tratamiento del agua.
	No existe diferencia significativa entre los porcentajes de remoción al variar la época en que se trabaja.	Existe diferencia significativa entre los porcentajes de remoción al variar la época en que se trabaja.
	No existe diferencia significativa entre los porcentajes de remoción al variar la cantidad de sulfato de aluminio en el tratamiento del agua junto a la época en que se trabaja.	Existe diferencia significativa entre los porcentajes de remoción al variar la cantidad de sulfato de aluminio en el tratamiento del agua junto a la época en que se trabaja.
3	No existe diferencia significativa entre los porcentajes de remoción al variar la cantidad de poliacrilamida en el tratamiento del agua.	Existe diferencia significativa entre los porcentajes de remoción al variar la cantidad de poliacrilamida en el tratamiento del agua.
	No existe diferencia significativa entre los porcentajes de remoción al variar la época en que se trabaja.	Existe diferencia significativa entre los porcentajes de remoción al variar la época en que se trabaja.
	No existe diferencia significativa entre los porcentajes de remoción al variar la cantidad de poliacrilamida en el tratamiento del agua junto a la época en que se trabaja.	Existe diferencia significativa entre los porcentajes de remoción al variar la cantidad de sulfato de aluminio en el tratamiento del agua junto a la época en que se trabaja.

INTRODUCCIÓN

Uno de los mayores problemas que se enfrentan en la actualidad es la contaminación de cuerpos de agua con efluentes de aguas residuales y domésticas. La contaminación de lagos y ríos puede llevar a la pérdida de estos recursos hídricos, debido a la presencia de contaminante y sustancias que alteran el equilibrio de estos cuerpos de agua. Existen varios ejemplos de la pérdida de estos recursos hídricos, uno de estos se puede encontrar en Guatemala en el lago de Amatitlán. Este lago es uno de los cuerpos de agua más grandes de Guatemala, que a su vez representa un recurso hídrico que se ha perdido. A través del tiempo ha aumentado la presencia de contaminantes, provenientes de las aguas residuales de uso industrial y doméstico que llegan al lago, los contaminantes presentes afectan el funcionamiento natural del lago y dan como resultado la eutrofización del lago.

Debido esta problemática, han surgido diferentes métodos y procesos para poder tratar las aguas residuales domésticas e industriales y de ese modo retirar los diferentes contaminantes que se encuentran en estas. Uno de estos procesos es de la coagulación-floculación, el cual tiene como fin la clarificación del agua reduciendo el color y la turbidez en ella. Sin embargo, se han realizado diferentes estudios relacionados a las aplicaciones que pueden tener los coagulantes y floculantes aparte de la remoción del color y la turbiedad, existe evidencia que estos también son efectivos en la remoción de nitrógeno, fósforo, sólidos suspendidos, metales pesados, biomasa de algas, biomasa de microalgas, entre otros. Por ejemplo, en la investigación "*Removal test of phosphate and algae from eutrophic landscape water by coagulation*" elaborada por Lin-jiang Yuan, Wei Zhang y Hai-xia Kong en el año 2009, se evidencia la

posibilidad de remover algas y fósforo por medio del proceso de coagulación - floculación. De igual manera, existe evidencia de la posibilidad de remover nitrógeno, fósforo y turbiedad del agua en el estudio "*Mejora de la calidad del agua de un lago urbano utilizando un proceso de coagulación-floculación*" elaborada por Ana Tomasini-Ortiz, Antonio Ramírez-González, Mercedes Ramírez-Camperos y Lina Cardoso-Vigueros en el año 2020.

El propósito de este estudio de investigación fue determinar el efecto que se puede obtener en el proceso de coagulación, si se agrega un floculante orgánico. Se evaluó la eficacia de utilizar un coagulante inorgánico y un floculante orgánico combinados para remover color, turbiedad, nitrógeno total, fósforo total y biomasa de microalgas. La evaluación se realizó utilizando solamente agua del lago de Amatitlán, pues debido a que este cuerpo de agua atraviesa un problema de eutrofización, las concentraciones de nutrientes en el serán altas.

1. MARCO CONCEPTUAL

1.1. Antecedentes

Actualmente la contaminación en las aguas residuales industriales y de uso doméstico es un tema de gran importancia. Es por ello que han surgido diferentes investigaciones, con el fin mejorar el proceso del tratamiento de las aguas residuales. Durante los últimos años uno de los temas, del cual han surgido diferentes estudios, ha sido el uso y la aplicación de los coagulantes y floculantes en el tratamiento de aguas residuales para la remoción de diferentes contaminantes, así como las condiciones necesarias para el funcionamiento óptimo de estos, entre otros.

En la Universidad de Santander ubicada Bucaramanga, Colombia en el año 2018, Mario Alfonso Ferreira Rivera realizó un trabajo de grado para conferirse el título de Ingeniero Químico, titulado: “Evaluación de un agente floculante basado en poliglicerol funcionalizado para la recuperación de biomasa en Microalgas *Chlorella Vulgaris* UTEX 1803”, donde se evaluaron los efectos de las variables de pH y concentración de floculante en la recuperación de biomasa de microalgas utilizando como parámetro el porcentaje de remoción en cultivos previamente preparados. La investigación se realizó empleando diferentes rangos de pH y concentraciones. Se llegó a determinar que el floculante tuvo un mayor efecto en rangos de pH bajo y concentraciones altas.

En el año 2019 Stephania García Velásquez presentó el trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Ambiental en la Universidad Autónoma de Occidente de Cali, Colombia. El trabajo se titula: “Optimización a escala

laboratorio del sistema de tratamiento de agua residual de una industria papelería”, en el cual se identificaron las diferentes etapas de producción y los aportes de cada una de ellas a la producción de las aguas residuales. Luego se identificaron las unidades que componen la planta de tratamiento de aguas residuales. Por último, se optimizó el tratamiento primario utilizando el método de jarras para poder determinar la dosis óptima de policloruro de aluminio (coagulante) y poliacrilamida (floculante). Se concluyó que para una mejor remoción las dosis óptimas de los compuestos son 40 mg/L y 1500 mg/L respectivamente

Luis Fernando Gonzáles Serrano presentó en la Universidad de San Carlos en el año 2011, el trabajo de graduación para Ingeniero Químico relacionado a la temática de coagulantes, dicho trabajo se titula: “Evaluación a nivel Laboratorio de la eficiencia de dos coagulantes para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la producción de aceites y grasas comestibles”. El fin de este trabajo de investigación fue evaluar la capacidad del cloruro de aluminio y el cloruro férrico como reductores de la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda biológica de oxígeno (DBO), variando la concentración de coagulante, tiempo de contacto y velocidad de agitación. Luego de realizar las pruebas respectivas, se llegó a determinar que el sulfato de aluminio fue el coagulante con mejores resultados respecto a la reducción de DQO y DBO en las aguas estudiadas, el sulfato de aluminio tuvo un porcentaje de remoción del 28,95 % mayor al del cloruro férrico.

En el año 2016 Lizet Marlene Saavedra Sánchez presentó el trabajo de graduación, titulado: “Remoción de Fósforo en aguas residuales por el método de floculación y sedimentación utilizando cal artesanal y alumbre kollpa” en la Universidad Privada San Carlos Puno en Perú. El objetivo de este trabajo era determinar la capacidad de ambos compuestos para remover el fósforo total en

aguas residuales homogenizadas, para ello se utilizó el método de floculación y sedimentación ascendente. Luego de realizar las diferentes pruebas y mediciones, se concluyó que no existe diferencia significativa en el porcentaje de remoción de fósforo total al usar los dos compuestos, ya que con la cal activada se obtuvo un porcentaje de remoción de 74,69 % y con el alumbre aldino 72,49 %, lo mismo sucedió con los parámetros de turbiedad, sólidos en suspensión totales y la demanda química de oxígeno.

Jaime Culebro Camacho elaboró en 2015 el trabajo de investigación para master en sostenibilidad de la UPC en Barcelona, España relacionada con el uso de coagulantes para la cosecha de microalgas. El trabajo titulado “Cosechado de microalgas cultivadas en lagunas de alta carga para el tratamiento de aguas residuales: efecto del almidón sobre la floculación y la producción de biogás”. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de un coagulante orgánico de bajo costo, en la separación de biomasa de algas y luego en la producción de biogás. Se realizaron diferentes pruebas para determinar la dosis óptima del almidón de papa, la cual fue de 10 mg/L y 25 mg/L logrando un porcentaje de remoción hasta del 96 %. Posteriormente se evaluaron las dosis óptimas del almidón para determinar en el efecto en la producción de biogás, donde se llegó a la conclusión que la dosis de 10 mg/L aumenta la producción en un 7,7 % y con la dosis de 25 mg/L la producción aumentó un 14,7 %, en comparación sin usar almidón.

La investigación denominada “*Polyacrylamide preparations for protection of water quality threatened by agricultural runoff contaminants*” fue publicada por James A. Entry, R.E. Sojka, Maribeth Watwood, Craig Ross en el año 2002. En dicha investigación se aborda la problemática de la contaminación de aguas subterráneas y superficiales como resultado de la actividad agrícola, el fin de la investigación fue evaluar si la poliacrilamida aniónica reduciría los niveles de

sedimentos, nutrientes y pesticidas en las escorrentías de las aguas contaminadas y así poder determinar si la poliacrilamida se puede usar como protección para la calidad del agua. Se llegó a determinar que las aguas tratadas con poliacrilamida aniónica efectivamente presentan una reducción en los niveles de sedimentos, nutrientes y pesticidas que las aguas presentaban previo al tratamiento. También se encontró que este polímero es soluble en agua y previene la erosión. El tratamiento con el polímero también filtró grandes cantidades de amoníaco, fosfato y fósforo total en las aguas residuales de ganado, tomando esto en cuenta se puede decir que la poliacrilamida tiene potencial para poder ser usado como protector de la calidad del agua y es eficiente para reducir los contaminantes mencionados así como microorganismos de los efluentes de la producción animal.

Gilberto Iñiguez y Rosaura Higaura en el año 2010 publicaron en la Revista Internacional de Contaminación Ambiental, la investigación que se titula: “Estudio para la rehabilitación de una planta de tratamiento de vinazas tequileras mediante un floculante polimérico de poliacrilamida (PAM)”. Para poder llevar a cabo la investigación se realizó un tratamiento primario por coagulación/floculación a vinazas tequileras para la rehabilitación de una planta de tratamiento, utilizando poliacrilamida catiónica como floculante. Las vinazas son las aguas residuales producto de la destilación del tequila; tienen un alto contenido de materia orgánica, demanda química de oxígeno (DQO) alta, sólidos totales y pH bajo. Se realizaron pruebas con diferentes concentraciones de poliacrilamida. Se llegó a determinar que, a una mayor dosis de coagulante, mayor es la remoción de contaminantes presentes en las aguas residuales. De igual manera se concluyó que para optimizar y hacer más eficiente el tratamiento con poliacrilamida se debe homogenizar lo más posible las vinazas antes del tratamiento. Así mismo se determinó que poliacrilamida es más

económica que utilizar hidróxido de sodio, por lo que este polímero es una buena alternativa para el tratamiento de estas aguas residuales.

En el año 2012 se publicó la investigación titulada: "*Study of polyacrylamide grafted starch based algal flocculation towards applications in algal biomass harvesting*", la cual fue elaborada por Chiranjib Banerjee, Pratibha Gupta, Sumit Mishra, Gautam Sen, Pratyosh Shukla y Rajib Bandopadhyay. Dado que las microalgas pueden ser una fuente de lípidos y proteína, el objetivo de esta investigación fue cosechar biomasa de microalgas de agua dulce utilizando polímeros, en este caso fue la poliacrilamida combinado con un injerto de almidón. Se estudió la eficiencia del proceso de floculación, así como el efecto del pH, porcentaje de injerto y potencial Z. Se llegó a determinar que, a un mayor porcentaje de injerto en el polímero, mayor es la viscosidad de este y en consecuencia se tiene una mayor eficacia en el proceso de floculación.

La investigación titulada: "*Application of polyacrilamide flocculants for wáter treatmen*" fue publicada en el año 2002 por Valery F. Kurenkov, Hans-Georg Hartan y Fedor I. Lobanov. El fin de esta investigación fue evaluar el de tratamiento de aguas naturales y residuales utilizando poliacrilamida y sus derivados aniónicos y catiónicos, en presencia y ausencia de coagulantes minerales. De igual manera buscó establecer la forma más eficiente para el tratamiento del agua. Se llegó a determinar que los flocculantes de poliacrilamida pueden utilizarse con éxito en el tratamiento de aguas naturales y residuales, ya sea en presencia o no de un coagulante mineral. Se comprobó que en estos tratamientos es posible remover sustancias coloides pesadas que se encuentren dispersas. Sin embargo, se estableció que, para poder optimizar el proceso del tratamiento, no se puede utilizarse un solo algoritmo ya que es necesario tomar en cuenta varios factores. Estos factores pueden ser las

características tanto del floculante como del coagulante a utilizar y la calidad del agua a tratar.

En el año 2020 Ana María Morales, Gustavo Ramírez-Caballero y Martha Barajas-Meneses publicaron la investigación titulada: “Prediciendo la dosis de sulfato de aluminio en el tratamiento de aguas” en la revista de Tecnología y ciencias del agua del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. El objetivo de la investigación fue poder determinar un modelo que permitiera determinar la dosis óptima de sulfato de aluminio a utilizar en el tratamiento de agua cruda, proveniente de un lago, que alimenta una planta termoeléctrica. En dicho modelo las variables de entrada fueron pH, turbiedad, color y conductividad eléctrica del agua cruda, junto a una dosis de poliacrilamida aniónica. La variable de salida sería la dosis de sulfato de aluminio. Se llegó a determinar que, para valores altos de pH, conductividad eléctrica, cantidad de poliacrilamida de hasta 1 ppm y valores bajos de color, la dosis de sulfato de aluminio se mantiene entre 35 y 39 ppm cuando la turbiedad es relativamente alta. Sin embargo, con valores aproximados de 26 ppm de turbiedad el pH, conductividad eléctrica, color y cantidad de poliacrilamida reducen la dosis de sulfato de aluminio, la cual se eleva entre 54 y 59 ppm, para estas condiciones.

R. E. Martín Fuentes, L.E. Peña Prieto y C.A. Rincón publicaron en el año 2013 el trabajo de investigación titulado: “Dosificación óptima de polímeros no iónicos de tipo poliacrilamida como ayudantes de filtración y compatibilidad con los ayudantes de coagulación aplicados en la planta de tratamiento de agua potable Francisco Wiesner (Bogotá-Colombia)” en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. En este trabajo de investigación se buscó obtener la dosis óptima de polímero no iónico de tipo poliacrilamida como ayudante de filtración, tomando en cuenta la compatibilidad con sulfato de aluminio y un polímero catiónico. Se determinó que la adición de este polímero aumenta la

reducción de la turbidez en el agua tratada con una dosis de 0,1 mg/L. También se determinó que la adición de sulfato de aluminio junto a este polímero es favorable, con dosis bajas de ambos y valores bajos de turbiedad, concluyendo que la adición del polímero, bajo ciertas condiciones de turbiedad y tiempo de contacto, es una buena alternativa para el tratamiento del agua ya que podría reducir la dosis de sulfato de aluminio junto con la del polímero.

En la Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales se publicó en el año 2020 la investigación denominada “Mejora de la calidad del agua de un lago urbano utilizando un proceso de coagulación-floculación” elaborada por Ana Tomasini-Ortiz, Antonio Ramírez-González, Mercedes Ramírez-Camperos y Lina Cardoso-Vigueros. El fin de la investigación fue determinar qué efecto ha tenido la instalación de una planta piloto de coagulación-floculación en la calidad del agua de un lago urbano con problemas de eutrofización, situado al oeste de la Ciudad de México. Se determinó que la calidad del agua mejoró, ya que se aumentó la transparencia del lago en un 52 %, logró disminuir la turbiedad del lago en un 92 %, la clorofila α en un promedio de 70 % y los nutrientes nitrógeno y fósforo en un 51 % y 50 % respectivamente. De igual manera se determinó que el aluminio proveniente del coagulante utilizado en la planta (policloruro de aluminio) no afecta el lago. Sin embargo, las condiciones de hipertrofia se mantuvieron, pero se mejoró el aspecto del lago y el mal olor.

En el año 2009 Lin-jiang Yuan, Wei Zhang y Hai-xia Kong publicaron la investigación titulada: “*Removal test of phosphate and algae from eutrophic landscape water by coagulation*” en Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition). El objetivo de esta investigación era poder determinar si el sulfato de aluminio y el cloruro férrico eran capaces de poder remover algas y fosfatos del agua de un paisaje con problemas de eutrofización. Se llegó a determinar que efectivamente ambos coagulantes

podieron reducir los fosfatos y algas presentes en el agua. De igual manera, se establecieron que las condiciones óptimas de operación como el tiempo de reacción y pH que fueron los mismos para ambos coagulantes (15 minutos y pH 8). Por último, se establecieron las dosis óptimas de ambos coagulantes siendo 50 mg/L para el cloruro férrico y 30 mg/L para el sulfato de aluminio.

1.2. Justificación

En Guatemala se puede encontrar un gran ejemplo de la pérdida de un recurso hídrico debido a la contaminación industrial y doméstica del agua: el lago de Amatitlán. El lago de Amatitlán es un gran cuerpo de agua que, debido a la presencia de diferentes contaminantes, se ha perdido como resultado de la eutrofización que estos provocan.

Una de las metodologías implementadas para tratar aguas residuales es el uso de procesos coagulación-floculación, que puede resultar en la remoción de color, turbiedad, micro algas, fósforo, nitrógeno, metales pesados y otros contaminantes presentes en el agua. Por lo general, solamente se utiliza un coagulante para llevar a cabo el proceso, pero agregar un floculante podría mejorar la remoción de los contaminantes que estén presentes en el agua a tratar.

El fin de esta investigación es evaluar el efecto de la poliacrilamida en el proceso de coagulación, para la remoción de color, turbiedad, micro algas, nitrógeno total, fósforo total y biomasa de microalgas, al combinarla con sulfato de aluminio sobre el agua del lago de Amatitlán. Ya que, debido a los problemas de eutrofización, el agua del lago posee altos niveles de nutrientes y microalgas.

1.3. Determinación del problema

Dada la aplicación del proceso de coagulación-floculación en la remoción de contaminantes y los problemas presentes en el agua del lago de Amatitlán se plantea la definición y delimitación del problema para este estudio de investigación.

1.3.1. Definición

Los coagulantes son capaces de remover varios contaminantes que algún tipo de agua pueda presentar, pero puede que con la adición de floculantes se mejore el proceso, aumentando la remoción de contaminantes. De manera que se buscó determinar si al realizar un tratamiento con sulfato de aluminio (coagulante) y poliacrilamida (floculante) se mejora la remoción de color, turbiedad, nitrógeno total, fósforo total y biomasa de microalgas (representada por la densidad óptica) en agua del lago de Amatitlán.

1.3.2. Delimitación

El estudio se limita a evaluar el efecto que pueda tener un floculante orgánico en el tratamiento de aguas si se agrega como ayudante en el proceso de coagulación, para remover color, turbiedad, nitrógeno total, fósforo total y biomasa de microalgas en el agua del lago de Amatitlán.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Coagulación

En la actualidad, el proceso de coagulación es uno de los más utilizados en los diferentes tratamientos de aguas debido a su gran aplicación y efectividad. La gran aplicación y efectividad de este proceso se puede entender mejor al evaluar la teoría de su funcionamiento, el proceso, así como otros factores.

2.1.1. Teoría de coagulación

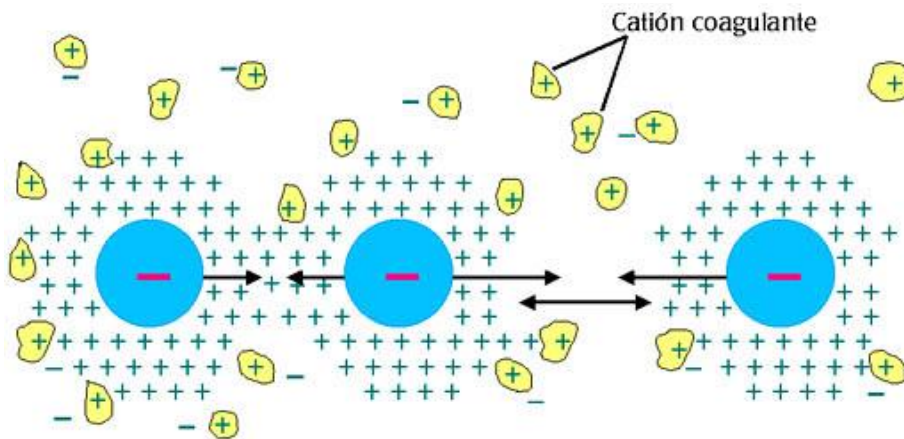
En su mayoría las partículas coloidales que conforman la turbiedad y el color por lo general están cargadas negativamente, sin embargo, en el agua también existen cargas positivas, se puede decir entonces que el agua y las soluciones que provocan turbiedad y color son neutras eléctricamente. “Las cargas eléctricas de las partículas en el agua generan fuerzas de repulsión que mantienen separadas y suspendidas las partículas coloidales debido a que estas fuerzas de repulsión superan las fuerzas de atracción de Van der Waals”¹, evitando que estas se aglomeren y por lo tanto no se precipitan.

De manera que se conoce como coagulación al proceso mediante el cual las partículas coloidales, que se encuentran suspendidas y separadas en el agua, se desestabilizan químicamente. Este proceso ocurre al neutralizar las fuerzas que mantienen separados a estos coloides, y sucede gracias a la

¹ LORENZO-ACOSTA, Yaniris. *Estado del arte del tratamiento de agua por coagulación-floculación*. p. 9.

adición de coagulantes al agua más una aplicación de energía extra de mezclado. En otras palabras, se podría decir que la coagulación es el “proceso mediante el cual los componentes que se encuentran en suspensión o disueltos en agua son desestabilizados, debido a fuerzas que superan las fuerzas que los mantienen estables y alejados, provocando así su aglomeración”².

Figura 1. **Desestabilización de Partículas coloidales**



Fuente: SAAVEDRA, Lizet. *Remoción de Fósforo en aguas residuales por el método de floculación y sedimentación utilizando cal artesanal y alumbre – kollpa*. p. 25.

“Se puede decir que el proceso de coagulación surge como resultado de dos fenómenos”³.

- El primer fenómeno que se lleva a cabo es básicamente un fenómeno químico, ya que incluye las reacciones del coagulante al hacer contacto

² AGUILAR, María Isabel; SÁEZ, José; LLÓRENA, Mercedes; SOLER, Antonio; ORTUÑO, Juan Francisco. *Tratamiento Físicoquímico de Aguas Residuales, Coagulación - Floculación*. p. 35.

³ CULEBRO, Jaime. *Cosechado de microalgas cultivadas en lagunas de alta carga para el tratamiento de aguas residuales: efecto del almidón sobre la floculación y la producción de biogás*. p. 27.

con el agua y la formación de especies hidrolizadas que poseen carga positiva.

- El segundo es un fenómeno físico, ya que consiste en el transporte de las especies con carga positiva, para que tengan contacto con las partículas coloidales en el agua o demás contaminantes.

Como consecuencia del proceso de coagulación las diferentes partículas en suspensión se pueden remover, por ejemplo, los sólidos en suspensión y partículas que provocan el color y la turbiedad. Sin embargo, también es posible reducir la concentración de materia orgánica y microorganismos que puedan existir, como se evidencia en la investigación: “Estudio para la rehabilitación de una planta de tratamiento de vinazas tequileras mediante un floculante polimérico de poliacrilamida (PAM)”. En la cual se evidencia que es posible reducir la materia orgánica y la demanda química de oxígeno (DQO) en las aguas residuales de una vinaza tequilera. El proceso de coagulación es un método universal, de los más usados en el tratamiento de aguas residuales debido a la amplia aplicación y eficacia que posee. De llevarse a cabo de la manera correcta el proceso es capaz de eliminar una gran cantidad de sustancias, las cuales pueden poseer diferentes naturalezas y pesos de materia, a un costo menor si se compara con otros métodos. Sin embargo, “la coagulación es el tratamiento más eficaz pero también es el que representa un gasto elevado cuando no está bien realizado”⁴. Por lo que para que el proceso de coagulación pueda ser beneficioso y representar un costo bajo, es necesario llevarlo a cabo de la manera correcta, analizando todos los parámetros que puedan influir en este.

Una de las consecuencias, de llevar a cabo de mala manera el proceso de coagulación es que se puede dar una degradación rápida de la calidad del agua

⁴ ANDÍA, Yolanda. *Tratamiento de Agua: Coagulación Y Floculación*. p. 9.

y esto representa más gastos de operación que no se tendrían en cuenta. Se ha llegado a la conclusión que para que el funcionamiento del proceso de coagulación sea efectivo y dé buenos resultados, es necesario tener una dosis de coagulante bien ajustada.

2.1.2. Etapas de coagulación

El proceso coagulación consta de cinco etapas, las cuales son:

- Primero; hidrólisis de los coagulantes y la desestabilización de las partículas que se encuentran en suspensión en el agua.
- Segundo: formación y precipitación de componentes que químicos que luego se polimerizan.
- Tercero: adsorción de las cadenas poliméricas en la superficie de los coloides formados.
- Cuarto: Adsorción entre los coloides.
- Quinto: Por último, la acción de barrido.

2.1.3. Tipos de coagulación

“Existen dos tipos diferentes de coagulación: la que se lleva a cabo por barrido y la que se lleva a cabo por adsorción”⁵:

- La coagulación por barrido sucede cuando el agua presenta una baja turbiedad y la cantidad de partículas coloides suspendidas es poca. Cuando sucede esto las partículas suspendidas y separadas son

⁵ SAAVEDRA, Lizet. *Remoción de Fósforo en aguas residuales por el método de floculación y sedimentación utilizando cal artesanal y alumbre – kollpa*. p. 27.

entrampadas debido a la sobresaturación de precipitado de algún coagulante.

- La coagulación por adsorción se da cuando el agua posee una alta concentración de partículas coloidales suspendidas (alta turbiedad), cuando se adiciona un coagulante al agua turbia los productos solubles del coagulante son adsorbidos por las partículas suspendidas y estas se comienzan a aglomerar para luego poder precipitarse.

2.1.4. Coagulante

Un coagulante es un componente químico que cuando es agregado al agua tiene la capacidad de producir una reacción química con los compuestos químicos que se encuentren en el agua. La reacción química de más importancia sucede con la alcalinidad del agua, ya que esta forma un precipitado de gran volumen y muy adsorbente, que por lo general está formado por un hidróxido metálico aportado por el coagulante agregado al agua.

2.1.4.1. Coagulantes más utilizados

Dentro de los principales coagulantes utilizados, para la estabilización de partículas en el agua, están sales de aluminio y de hierro; al agregarse al agua estas sales generan reacciones complejas con la alcalinidad del agua produciendo así hidróxidos de aluminio o de hierro, los cuales son insolubles y forman precipitado. Dentro de las principales sales utilizadas como coagulantes se pueden mencionar las siguientes:

- Sulfato de aluminio
- Aluminato de sodio
- Cloruro férrico

- Cloruro de aluminio
- Sulfato ferroso
- Sulfato férrico

2.1.5. Coagulantes metálicos

Los coagulantes metálicos son de los más comunes y más utilizados para la clarificación de agua. Estos tipos de sales presentan como ventaja que pueden actuar como coagulante y floculante a la vez, lo cual representa menos costos y complejidad durante el proceso de clarificación. Al actuar como coagulantes y floculantes implica que la coagulación y la floculación se llevan a cabo en la misma etapa y por defecto en el mismo instante. Sin embargo, en algunos casos la acción floculante se dificulta debido a la naturaleza o concentración de los sólidos suspendidos en el agua. Otra factora que se debe de considerar, es el rango de pH en el que su utilizan estas sales, ya que de tener el rango incorrecto no se lleva a cabo un buen proceso de clarificación.

2.1.5.1. Sulfato de Aluminio

El sulfato de aluminio es una sal de aluminio cuya fórmula química es $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$, es el coagulante más utilizado en el tratamiento de agua como clarificador, su peso molecular es aproximadamente 600, es 100 % libre de hierro. “La aplicación del sulfato de aluminio debe de ser en solución para así favorecer su dispersión y se debe de agregar en una zona de flujo turbulento o donde la mezcla sea rápida”⁶.

⁶ ALDANA, Luis. *Comparación de la eficiencia del sulfato de aluminio y el sulfato ferroso en la remoción de sólidos en suspensión en aguas residuales de tipo ordinario*. p. 17.

2.1.6. Factores que afectan el proceso de coagulación

Para poder obtener un buen resultado en el proceso de coagulación, “es necesario conocer que variables afectan este proceso, de esta manera se podrá optimizar el proceso si se trabaja en las condiciones adecuadas”⁷. Dentro de los “diferentes factores que afectan el proceso de coagulación se pueden mencionar algunos de mayor importancia”⁸:

- pH
- Temperatura del agua
- Agitación de la mezcla
- Dosis de coagulante

2.1.6.1. Dosificación de coagulante

La eficiencia del proceso de coagulación se ve influenciada de manera directa por la cantidad de coagulante que se utiliza durante el proceso de coagulación. La cantidad de coagulante a utilizar debe ser la óptima, para que el proceso se lleve a cabo de la mejor manera, ya que, de usar una cantidad menor o mayor a esta, el resultado no será el esperado. Respecto a este factor se pueden dar dos situaciones, que se utilice una poca cantidad de coagulante o que se use una gran cantidad de este.

De llegar a usar una poca cantidad de coagulante, que sea menor a la cantidad óptima, las partículas coloidales cargadas negativamente no se neutralizan totalmente, por lo que la aglomeración de estas y la formación de

⁷ ANDÍA, Yolanda. *Tratamiento de Agua: Coagulación Y Floculación*. p.16.

⁸ VIELMAN, Rony. *Determinación del pH óptimo de coagulación, mediante los coagulantes sulfato de aluminio y sulfato ferroso de las aguas residuales de una industria de alimentos*. p. 92.

flóculos es muy escasa y por lo tanto el porcentaje turbidez y color removidos no será alto. Ahora bien, si sucede lo contrario, es decir que se use una gran cantidad de coagulante que sea mayor que la cantidad óptima, se produce una inversión de la carga de la partícula, lo cual conduce a la formación de una gran cantidad de microflóculos. Estos microflóculos tienen un tamaño muy pequeño y poseen una velocidad de sedimentación demasiado baja por lo que, “al igual que al agregar poca cantidad de coagulante, los porcentajes de remoción son bajos”⁹.

Sin embargo, existe una forma de poder determinar la selección del coagulante y la cantidad óptima a utilizar, para que el proceso sea efectivo, la forma de determinarlo es mediante diferentes ensayos, que reciben el nombre de prueba de jarras o método de jarras.

2.2. Floculación

El proceso de coagulación y floculación, son dos procesos que se dan uno después del otro, primero el proceso de coagulación y luego el de floculación. Debido a la gran aplicación de estos procesos, el proceso de floculación ha sido punto de estudio, para mejorar le eficiencia y remoción de diferentes contaminantes. Sin embargo, es necesario entender la teoría y otros factores incluidos en el proceso de floculación, para poder mejorarlo.

2.2.1. Teoría de Floculación

Se puede decir que la floculación es el proceso que sigue directamente como resultado del proceso de coagulación. En el proceso de coagulación el coagulante agregado en el agua a tratar, es el que provoca la formación de

⁹ ANDÍA, Yolanda. *Tratamiento de Agua: Coagulación Y Floculación*. p.19.

flóculos al desequilibrar las moléculas coloidales. Sin embargo, es necesario que estos flóculos aumenten su volumen, su peso y lo más importante su capacidad de cohesión. Esto se logra por medio de una agitación homogénea y lenta de la masa formada por el proceso de coagulación, y “en algunos casos adicionando un floculante, aumentado así la posibilidad de que las partículas neutralizadas en la coagulación se encuentren con un flóculo y así se puedan sedimentar y formar precipitado”¹⁰. De manera que la floculación es el proceso mediante el cual los flóculos formados en el proceso de coagulación se adhieren unos con otros, en algunos casos con ayuda de un floculante, hasta llegar a formar macroflóculos con el peso y tamaño adecuado para sedimentar.

La formación de flóculos surge como consecuencia de la agrupación de las partículas coloidales neutralizadas o descargadas, en el proceso de coagulación, al ponerse en contacto unas con otras. Dicha formación de flóculos, por lo general puede ser causada por la colisión entre las partículas coloidales, ya que cuando las partículas se acercan lo suficiente a superficies sólidas, las fuerzas de Van Der Waals predominan por encima de las fuerzas de repulsión de las partículas suspendidas.

Para que favorecer este fenómeno es necesario realizar un mezclado, el cual debe de ser lento y homogéneo. Este mezclado tiene como objetivo poder permitir el contacto entre los flóculos y las partículas suspendidas neutralizadas que generan la turbiedad y el color en el agua. Es necesario que en la mezcla se pueda crear diferencias de velocidad dentro del agua, pero no demasiado grande ya que los flóculos corren el riesgo de romperse, una vez que estos se rompen, es muy raro que los flóculos vuelvan a formarse en el tamaño y fuerza

¹⁰ LORENZO-ACOSTA, Yaniris. *Estado del arte del tratamiento de agua por coagulación-floculación*. p. 12.

óptima, que se desea que estos posean para que el proceso se lleve a cabo de manera óptima.

En algunos casos, los flóculos que se han formado no son lo suficientemente grandes para poder alcanzar la velocidad de sedimentación que se desea. De manera que para poder evitar este problema es necesaria la aplicación de un floculante y que con la ayuda de este los flóculos se puedan reunir en forma de red, formando así puentes entre las superficies de las partículas, enlazando partículas individuales en aglomerados.

2.2.2. Tipos de floculación

Existen dos tipos diferentes de floculación: la floculación pericinética y la floculación ortocinética.

- La floculación pericinética es la que se da como resultado del movimiento natural de las moléculas de agua, pero a la vez “esta inducida por la energía térmica, este movimiento también recibe el nombre de movimiento browniano”¹¹.
- La floculación ortocinética “se basa en las colisiones de las partículas debido al movimiento del agua, este movimiento es inducido por una fuerza exterior, de origen mecánico o hidráulico”¹², que es ajena a la masa de agua. Después de que se lleva a cabo el proceso de coagulación en el agua, es de suma importancia que la aglomeración de microflóculos se produzca, para que esto se pueda llevar a cabo primero ocurre la floculación pericinética y luego la floculación ortocinética.

¹¹ SAAVEDRA, Lizet. *Remoción de Fósforo en aguas residuales por el método de floculación y sedimentación utilizando cal artesanal y alumbre – kollpa*. p. 34.

¹² GÓMEZ, Néstor. *Remoción de materia orgánica por coagulación - floculación*. p. 59.

2.2.3. Mecanismos de acción de la Floculación

Las partículas suspendidas en el agua luego de ser desestabilizadas por el proceso de coagulación, se comienzan a aglomerar y el proceso de floculación empieza, este proceso de floculación la pueden realizar diferentes floculantes y se puede llevar a cabo de diferentes maneras. Estas diferentes maneras reciben el nombre mecanismos, se conoce que el proceso de floculación se puede realizar por cuatro mecanismos diferentes. Estos cuatro mecanismos son los siguientes:

- Neutralización de carga
- Mecanismo de parche electrostático
- Bridging (Punteo)
- Floculación por barrido

2.2.4. Floculante

Un floculante es un polielectrólito o polímero que posee un peso molecular muy elevado, “por lo general poseen moléculas orgánicas, que son solubles en agua y que están formadas en bloques los cuales reciben el nombre monómeros, los cuales a su vez están repetidos en cadenas largas”¹³. Los floculantes también son conocidos por el nombre de ayudantes del proceso de coagulación, ya que estos permiten mejorar la eficiencia del proceso, ayudando a que partículas desestabilizadas en el proceso de coagulación se unan, para así favorecer la sedimentación de estos al aumentar el volumen y peso de las partículas debido a esta unión.

¹³ AGUILAR, María Isabel; SÁEZ, José; LLÓRENA, Mercedes; SOLER, Antonio; ORTUÑO, Juan Francisco. *Tratamiento Físicoquímico de Aguas Residuales, Coagulación - Floculación*. p. 135.

Existen tres tipos diferentes de floculantes dependiendo de la naturaleza que estos posean. Según su naturaleza los floculantes pueden ser: minerales, orgánicos naturales y orgánicos sintéticos.

2.2.4.1. Floculantes Minerales

Dentro de estos se encuentra la sílice activada, que fue el primer floculante utilizado. Estos floculantes deben de ser preparados antes de usarlos, poseen la capacidad de precipitar metales pesados, de igual manera también son capaces de remover olores del agua.

2.2.4.2. Floculantes Orgánicos Naturales

Estos floculantes son polímeros o electrolitos que son extraídos de diferentes sustancias vegetales o animales. Los polímeros tienen la característica de poseer ácidos muriáticos o ácidos gluónicos.

2.2.4.3. Floculantes Orgánicos Sintéticos

Este tipo de floculantes son de los más utilizados en la actualidad, estos se definen como macromoléculas de cadenas largas. Se obtienen de la asociación de monómeros sintéticos, de masa molecular alta. Estos floculantes a su vez se clasifican según la ionicidad de los polímeros, los cuales pueden ser:

- Catiónicos
- Aniónicos
- Neutros

2.2.4.3.1. Poliacrilamida

La poliacrilamida es una especie de polielectrólito, con fórmula $(C_3H_5NO)_n$, es soluble en agua pero es insoluble en solventes orgánicos como el etanol y acetona. La cadena molecular que lo conforma es larga y flexible, la distribución iónica es uniforme. “Las velocidades de separación en el proceso de floculación y la velocidad de formación de flóculos son altas, es utilizada para mejorar la velocidad de formación de flóculos”¹⁴.

2.2.5. Parámetros que afectan la Floculación

Al igual que en la coagulación, en el proceso de floculación también interfieren varias variables, las cuales pueden afectar la eficiencia de este proceso. Dentro de estos factores se pueden mencionar los siguientes:

- Gradiente de velocidad, que es la energía necesaria para poder producir la mezcla.
- Floculación ortocinética, esta se da según el grado de agitación que se proporciona puede ser mecánica o hidráulica.
- Número de colisiones entre los microflóculos.
- Tiempo de retención, este es el tiempo que permanece el agua en el tratamiento de floculación.
- Densidad del floc.
- Tamaño del floc.

¹⁴ GARCIA, Stephania. *Optimización a escala laboratorio del sistema de tratamiento de agua residual de una industria papelera*. p. 50.

2.3. Prueba de Jarras (*Jar Test*)

La prueba de jarras o método de jarras es la técnica de laboratorio más utilizada en el tratamiento de aguas. “El objetivo de esta técnica es simular los procesos de coagulación, floculación y sedimentación a nivel laboratorio”¹⁵. Lo cual permite poder hacer experimentos, con el fin optimizar y mejorar del proceso de coagulación floculación, sin tener que manipular una planta de tratamiento directamente.

Actualmente existen una gran variedad de equipos para poder realizar la prueba de jarras, sin embargo, todos estos equipos operan bajo el mismo principio. Todos los equipos utilizan una serie de jarras al mismo tiempo, las cuales son agitadas y se puede variar la velocidad de agitación. Por lo general estos equipos constan entre 3 y 6 puntos de agitación, los cuales permiten agitar simultáneamente y a una velocidad determinada el líquido contenido en las diferentes jarras.

En esta prueba intervienen una gran cantidad de factores hidráulicos y químicos, estos factores son los que generalmente son el objeto de estudio o la razón por la cual se realiza la prueba de jarras. Dentro de los cuales se encuentran:

- pH
- Temperatura
- Concentración de coagulante o floculante
- Cantidad de coagulante o floculante
- Grado de agitación

¹⁵ LORENZO-ACOSTA, Yaniris. *Estado del arte del tratamiento de agua por coagulación-floculación*. p. 15.

- Secuencia de aplicación de sustancias químicas
- Tiempo de sedimentación

Lo que sucede al evaluar alguna de estas variables en la prueba de jarras, es que se varía el rango o valor de estas en cada una de las jarras que posea el equipo, para determinar cuál es el efecto que estas puedan tener el proceso de coagulación-floculación y definir bajo qué condiciones el proceso es más efectivo.

2.4. Color y Turbiedad en el agua

Dos de los parámetros más importantes para poder evaluar la calidad del agua son el color y la turbiedad.

2.4.1. Turbiedad

La turbiedad es una medida del grado de transparencia que pierde el agua o cualquier líquido incoloro. La principal causa de la turbiedad en el agua son las partículas en suspensión provenientes de diferentes sustancias como la arcilla, minerales, sedimentos, materia orgánica, materia inorgánica, plancton, bacterias y otros microorganismos. “Las partículas de estas sustancias, que provocan la turbiedad, pueden ser coloides suspendidos o materia insoluble de gran tamaño”¹⁶. De las sustancias mencionadas, los que se conocen como los componentes más comunes que forman la turbiedad, son las arcillas. Las arcillas se forman de material terroso, gránulos finos que se vuelve plástico al mezclarse con alguna cantidad de agua.

¹⁶ BARRENCHEA, Ada. *Tratamiento de Agua para consumo humano. Capítulo 4: Coagulación*. p. 162.

2.4.2. Color

Se estima que el color orgánico en el agua es de naturaleza coloidal, sin embargo, en varias investigaciones se sugiere que el color se encuentra en solución. Por lo general el tamaño de las partículas que causan el color en el agua, pueden variar entre 3,5 y 10 μm , según este rango se puede decir que el color se encuentra entre los límites para ser considerado como dispersión coloidal y una solución. “La causa principal del color orgánico natural en el agua se le puede acreditar a diferentes especies, dependiendo la naturaleza del suelo, tales como los ácidos fúlvicos, himatomelánicos y húmicos”¹⁷. Sin embargo, el color que existe en el agua no se deriva únicamente de la descomposición de sustancias naturales, también es resultado de hidróxidos metálicos, como el hierro, pero también por compuestos orgánicos presentes en desechos domésticos o industriales.

2.5. Nutrientes en el agua

Al hablar de los nutrientes en el agua, por lo general se hace referencia al nitrógeno y el fósforo que se encuentran presentes en el agua. El nitrógeno es un componente de suma importancia para la formación de proteínas, las cuales son la base estructural de los seres vivos. Ahora bien, el fósforo desempeña uno de los papeles más importantes en el metabolismo biológico, pero “por lo general actúa como un limitante en la productividad biológica”¹⁸.

El origen del nitrógeno en el agua en los cuerpos de agua puede darse de diferentes lugares, como por ejemplo la precipitación sobre una superficie, la

¹⁷ BARRENCHEA, Ada. *Tratamiento de Agua para consumo humano. Capítulo 4: Coagulación*. p. 163.

¹⁸ AZURDIA, Andrea. *Estimación de la productividad primaria y biomasa en el lago de Amatitlán en la época seca y lluviosa*. p. 51.

fijación de nitrógeno elemental en el agua y sedimentos. También se debe a los aportes que se dan por los drenajes subterráneos y superficiales. En el agua dulce el nitrógeno se presenta en diferentes formas. Por otro lado, la mayor parte del fósforo en los cuerpos de agua, por lo general tiene un origen biológico, de todo el fósforo que proviene de origen orgánico casi el 70 % es parte del material orgánico particulado y el resto se encuentra en forma de fósforo disuelto o coloidal.

2.5.1. Nitrógeno total

El nitrógeno se puede encontrar en el agua como; nitrógeno inorgánico disuelto en forma nitratos, amonios entre otros. También se encuentra como nitrógeno orgánico disuelto y como nitrógeno orgánico particulado. La sumatoria de todas estas formas de nitrógeno en el agua da como resultado el término conocido como nitrógeno total. “La determinación de nitrógeno total en el agua es de suma importancia, ya que este no toma en cuenta solo el nitrógeno inorgánico presente sino también el nitrógeno orgánico”¹⁹. El nitrógeno orgánico representa una reserva que permite la conversión a formas más simples de la cadena trófica, lo cual tiene una relación directa con la eutrofización.

2.5.2. Fósforo total

Al igual que el nitrógeno, el fósforo en el agua también se encuentra en diferentes formas, algunas de estas formas son fósforo inorgánico disuelto o fósforo de orto fosfatos, fósforo orgánico disuelto, fósforo orgánico e inorgánico particulado. Al mencionar el fósforo particulado, se hace referencia el fósforo que está presente en los organismos vivos presente como ácidos nucleicos,

¹⁹ AZURDIA, Andrea. Estimación de la productividad primaria y biomasa en el lago de Amatitlán en la época seca y lluviosa. p.136.

fosfato de nucleótidos, ésteres de bajo peso molecular fósforo adsorbido a materia orgánica particulada muerta o a agregaciones macroorgánicas, fósforo adsorbido en complejos inorgánicos como arcillas, carbonatos e hidróxido férrico. La sumatoria de todas estas formas de fósforo presentes en el agua, se le conoce como fósforo total.

2.6. Microalgas

El término de microalgas hace referencia e incluye a todos los organismos unicelulares, que tienen la capacidad de llevar a cabo la fotosíntesis. Bajo esta definición se pueden agrupar las cianobacterias, las cuales también se conocen como algas verdeazuleadas, también se pueden agrupar las algas eucariotas, estas son las algas verdes, rojas y doradas. Por lo general las microalgas son organismos fotoautótrofos, lo que significa que estas obtienen energía de la luz que proviene del Sol y se desarrolla a partir de materia orgánica. Sin embargo “algunas especies tienen la capacidad de crecer usando materia orgánica como fuente para obtener energía o carbono”²⁰.

La composición de las microalgas en relación al contenido de lípidos, carbohidratos y proteínas puede variar según la especie que se analice, pero por lo general las cianobacterias contienen hasta un 20 % de lípidos, mientras que las algas procariotas pueden tener un contenido de lípidos entre el 20 % y 50 %. El tamaño de estas microalgas eucariotas puede variar entre 0,5 μm hasta 30 μm , pero las cianobacterias pueden llegar a medir 200 μm . En el mundo existen miles de especies de plantas verdes y se estima que hay millones diferentes de especies de microalgas. En ocasiones para poder determinar la cantidad de biomasa de microalgas presentes en una muestra de

²⁰ RUIZ, Ana. *Puesta en marcha de un cultivo de microalgas para la eliminación de nutrientes de un agua residual urbana previamente tratada anaeróbicamente*. p. 9.

agua, se utiliza la densidad óptica de la muestra como una medida indirecta de este parámetro. En la investigación: “*Evaluación de un agente floculante basado en poliglicerol funcionalizado para la recuperación de biomasa en Microalgas Chlorella Vulgaris UTEX 1803*” elaborada por Mario Ferreira en el 2019, se emplea la densidad óptica como parámetro de control de la biomasa de microalgas en diferentes cultivos.

2.6.1. Eutrofización

La eutrofización de lagos es uno de los problemas más comunes y frecuentes que se presentan debido a la contaminación del agua. “Este fenómeno por lo general se define como un proceso de deterioro de la calidad del recurso de agua, este fenómeno surge como consecuencia del aumento en la cantidad de nutrientes, para las plantas, presentes en el agua”²¹. Se puede decir que eutrofización es el proceso por el cual un estado trófico cambia a otro de nivel superior debido a la adición de nutrientes. Al hablar de nutrientes que favorecen a las plantas, se refiere principalmente al nitrógeno y fósforo que está presente en el agua, estos nutrientes favorecen la formación de microalgas, lo cual conlleva a la formación de algas y esto último conduce a “la formación de marea de algas que es uno de los efectos más visibles de la eutrofización”²².

²¹ LEDESMA, Claudia., BONANSEA, Matías., RODRIGUEZ, Claudia María; SÁNCHEZ, Ángel. *Determinación de indicadores de eutrofización en el embalse Río Tercero*. p. 420.

²² ONGLEY, Edwin David. *Lucha Contra la Contaminación Agrícola de Los Recursos Hídricos*. p. 59.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Localización

La recolección de las muestras de agua se realizó en el lago de Amatitlán y la parte experimental de la investigación se realizó en el Laboratorio de Agua del Instituto de Fomento Municipal.

3.2. Variables

Se determinaron cuáles fueron las variables de interés involucradas en la fase experimental de la investigación

3.2.1. Variables dependientes

- Color
- Turbiedad
- Nitrógeno total
- Fósforo total
- Biomasa de microalgas (medido como densidad óptica)

3.2.2. Variables Independientes

- Dosis de sulfato de aluminio
- Dosis de poliacrilamida

3.3. Delimitación del campo de estudio

La investigación es de carácter fisicoquímico, la cual consistió en evaluar el efecto de un floculante orgánico (poliacrilamida) en el proceso de coagulación, para la remoción de color, turbiedad, fósforo total, nitrógeno total y biomasa de micro algas en agua tomada del lago de Amatitlán, utilizando un coagulante inorgánico (sulfato de aluminio).

3.4. Obtención y número de las muestras

Para poder llevar a cabo la fase experimental de la investigación y poder cumplir con los objetivos planteados, fue necesario tomar muestras de agua cruda del lago de Amatitlán en dos épocas diferentes, la época seca y la lluviosa. Debido a limitaciones económicas y de los recursos se tomaron 6 muestras de agua cruda, 3 muestras de la época lluviosa (agosto) y 3 muestras de la época seca (enero y febrero).

3.5. Recursos humanos disponibles

Investigador: Br. Jorge Antonio Gamas Lara
Asesor: Ing. Qco. Jorge Mario Estrada Asturias

3.6. Recursos materiales disponibles

Descripción de los recursos materiales utilizados, para poder llevar a cabo la fase experimental de la investigación, divididos en diferentes grupos: cristalería, equipo y reactivos.

3.6.1. Equipo

- Equipo de prueba de jarras “Phipps & Bird, INC. Richmond, VA. 23228” de 6 jarras.
- Termo-reactor Hach DRB 200.
- Agitador magnético.
- Espectrofotómetro Hach DR 3900.
- Turbidímetro Hach “2100P Turbidimeter”.
- Balanza analítica.

Figura 2. **Equipo de prueba de jarras “Phipps & Bird, INC. Richmond, VA. 23228” de 6 jarras utilizado**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de agua, Instituto de Fomento Municipal.

Figura 3. **Termo-reactor Hach DRB 200 utilizado**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de agua, Instituto de Fomento Municipal.

Figura 4. **Espectrofotómetro Hach DR 3900 utilizado**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de agua, Instituto de Fomento Municipal.

Figura 5. Turbidímetro Hach “2100P Turbidimeter” utilizado



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de agua, Instituto de Fomento Municipal.

3.6.2. Cristalería

- 1 beaker plástico de 3000 mL.
- 8 beakers de 1000 mL.
- 2 beakers de 150 mL.
- 1 balón aforado de 100 mL.
- 17 beakers plásticos de 100 mL.
- 13 jeringas de 12 mL.
- 4 jeringas de 3 mL.
- 3 pipetas serológicas de 10 mL.

- 8 pipetas volumétricas de 5 mL.
- 9 pipetas volumétricas de 2 mL.
- Pisetas.

3.6.3. Reactivos

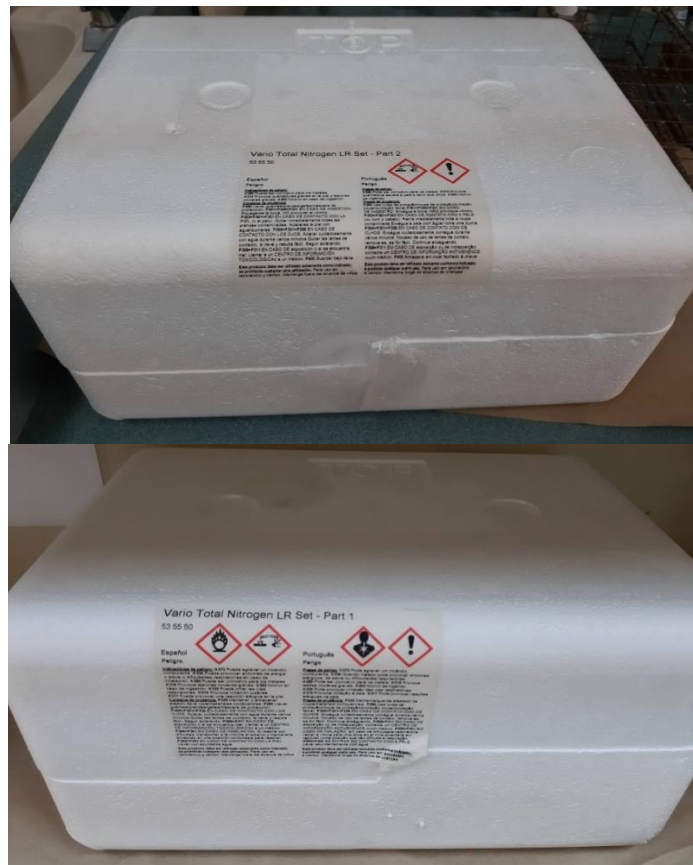
- Sulfato de Aluminio.
- Poliacrilamida.
- Hidróxido de sodio.
- Set de diales y reactivos para fósforo total “Lovibond”.
- Set de diales y reactivos para nitrógeno total “Lovidond”.

Figura 6. Set de reactivos “Lovibond” para fósforo total utilizado



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de agua, Instituto de Fomento Municipal.

Figura 7. **Set de reactivos 1 y 2 “Lovibond” para nitrógeno total utilizado**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de agua, Instituto de Fomento Municipal

3.7. Técnicas cuantitativas de la investigación

Para poder llevar a cabo la parte experimental de este estudio de investigación se utilizaron diferentes técnicas cuantitativas. Dentro de las cuales se pueden destacar: prueba de jarras, determinación de turbiedad, color, densidad óptica, nitrógeno total y fósforo total.

3.7.1. Prueba de jarras

Para poder estimar la dosis óptima de coagulante y floculante, que mejoran el proceso de coagulación-floculación. Se llevó a cabo la prueba de jarras, con el fin de simular los procesos de coagulación, floculación y sedimentación a nivel laboratorio. Por cada muestra de agua se realizaron dos pruebas de jarras, el procedimiento para la primera prueba de jarra fue el siguiente:

- Preparar una solución de 1 g de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ en 100 mL de agua destilada.
- Tomar 4 beakers de 1L y llenarlos con la muestra de agua.
- Colocar los beakers en el equipo de prueba de jarras y ajustar las aspás.
- Tomar 4 beakers de 100 mL y con ayuda de una pipeta serológica agregar 6 mL, 8 mL, 10 mL y 120 mL de solución de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ en cada uno de ellos.
- Colocar el contenido de cada beaker en jeringas.
- Encender el equipo de prueba de jarras y colocar una velocidad mayor a 120 rpm en las aspás.
- Agregar el contenido de las jeringas a cada uno de los beakers de 1 L respectivamente, al mismo tiempo.
- Dejar que se dé una mezcla rápida a más de 120 rpm por 1 minuto.
- Luego bajar la velocidad a 40 rpm por 5 minutos
- Terminados los 5 minutos apagar el equipo y esperar 15 minutos para que se lleve a cabo la sedimentación.
- Al pasar los 15 minutos tomar muestras de agua de las jarras con ayuda de una jeringa y colocarlas en beakers de 100 mL.

El procedimiento de la segunda prueba de jarras fue el siguiente:

- Preparar una solución de 1 g de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ en 100 mL de agua destilada.
- Preparar una solución de 1 mL de poliacrilamida en 100 mL de agua destilada con ayuda de un balón aforado.
- Tomar 4 beakers de 1L y llenarlos con la muestra de agua.
- Colocar los beakers en el equipo de prueba de jarras y ajustar las aspas.
- Tomar 4 beakers de 100 mL y con ayuda de una pipeta serológica agregar 10 mL de solución de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ en cada uno de ellos.
- Tomar otros 4 beakers de 100 mL y con ayuda de una pipeta serológica agregar 1 mL, 1,5 mL, 2 mL y 2,5 mL de solución de poliacrilamida, en cada uno de ellos.
- Colocar el contenido de los beaker en jeringas, utilizando jeringas de 3 mL para las cantidades de poliacrilamida.
- Encender el equipo de prueba de jarras y colocar una velocidad mayor a 120 rpm en las aspas.
- Agregar el contenido de las 4 jeringas con solución de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ en cada uno de los beakers de 1 L, al mismo tiempo.
- Rápidamente agregar el contenido de las 4 jeringas con solución de poliacrilamida en cada uno de los beakers respectivamente, al mismo tiempo.
- Dejar que se dé una mezcla rápida a más de 120 rpm por 1 minuto.
- Luego bajar la velocidad a 40 rpm por 5 minutos.
- Terminados los 5 minutos apagar el equipo y esperar 15 minutos para que se lleve a cabo la sedimentación.
- Al pasar los 15 minutos tomar muestras de agua de las jarras con ayuda de una jeringa y colocarlas en beakers de 100 mL.

3.7.2. Determinación de Color en agua

- Llenar una celda con 10 mL de agua desionizada (el blanco).
- Ingresar el número de programa en el espectrofotómetro para medir el color aparente.
- Girar el cuadrante de longitud de onda del espectrofotómetro, hasta que se muestre 455 nm.
- Ubicar el blanco (la primera celda) en el soporte de la celda del espectrofotómetro. Cerrar el escudo para la luz.
- Presionar “CERO” en el espectrofotómetro para fijar el cero, que será la referencia.
- Llenar otra celda con 10 mL de la muestra de agua a medir
- Ubicar la muestra de agua (la segunda celda) en el soporte de la celda del espectrofotómetro. Cerrar el escudo para luz.
- Presionar “READ” en el espectrofotómetro, para poder visualizar el resultado en unidades de platino-cobalto.

3.7.3. Determinación de turbiedad

- Colectar una muestra del agua a medir.
- Llenar una celda con la muestra de agua a medir, hasta la línea que tenga marcada.
- Tapar herméticamente la celda.
- Limpiar la celda con una toalla, para remover manchas de agua o de dedos.
- Encender el turbidímetro y dejar que se caliente según instrucciones de manufactura.
- Suavemente poner la celda de cabeza de 2 a tres veces.
- Asignar el apropiado rango y la señal de medida del turbidímetro.

- Colocar la celda con la muestra en el compartimiento de celda del instrumento.
- Tomar a medida del resultado en NTU.

3.7.4. Determinación de Nitrógeno total

- Encender el termoreactor y precalentar a 105 °C, colocar el escudo de plástico delante del rector.
- Tomar e identificar los viales “A” con el número de muestra respectivamente y el blanco.
- Usando un embudo agregar los contenidos de bolsas de reactivo “Total Nitrogen Persulfate” en los viales, incluido el blanco.
- Agregar 2 mL de muestra en cada uno de los tubos y 2 mL de agua desionizada en el blanco.
- Tapar herméticamente los viales y agitar por 30 segundos.
- Colocar los viales en por 30 minutos a 105 °C en el termoreactor.
- Luego de pasar los 30 minutos, remover los viales del termoreactor y colocarlos en un soporte para tubos de ensayo. Dejar que estos se enfríen a temperatura ambiente.
- Remover la tapa de los viales “A” y con un embudo agregar el contenido de un sobre de “Regent A” (Reactivo A).
- Tapar los viales y agitar por 30 segundos.
- Luego dejar que se lleve a cabo la reacción por 3 minutos.
- Luego de que termine el tiempo, remover las tapas de los diles y con un embudo agregar el contenido de un sobre de “Regent B” (Reactivo B).
- Tapar los tubos y agitar por 30 segundos para disolver.
- Esperar 2 minutos para que la reacción se lleve a cabo.
- Luego de que termine el tiempo de espera, remover la tapa de los viales “A”, extraer 2 mL de la muestra digerida y agregarlos a los Viales “B”.

- Tapara los viales y ponerlos de cabeza 10 veces para disolver, la reacción es exotérmica.
- Esperar 5 minutos para que la reacción en los diales se lleve a cabo y dejar enfriar a temperatura ambiente.
- Ingresar el número de programa almacenado en el espectrofotómetro para nitrógeno total con longitud de onda 410 nm.
- Luego de que termine el tiempo de espera, colocar el vial preparado que contiene el agua desionizada (el blanco).
- Presionar “CERO” en el espectrofotómetro.
- Retirar el vial del espectrofotómetro, limpiar con una toalla el vial que contiene la muestra a analizar.
- Presionar “READ” en el espectrofotómetro, para poder visualizar el resultado en ppm.

3.7.5. Determinación de Fósforo total

- Encender el termoreactor y calentar a 150 °C. Colocar el escudo de plástico delante del rector.
- Tomar e identificar los viales con el número de muestra respectivamente y el blanco.
- Agregar 5 mL de muestra en los viales y 5 mL de agua destilada para el vial que será el blanco.
- Con ayuda de un embudo, agregar el contenido de un sobre de persulfato de potasio a cada uno de los viales.
- Tapar herméticamente los viales y agitar por 30 segundos.
- Calentar los viales durante 30 minutos a 150 °C en el termoreactor.
- Luego de terminado el tiempo retirar los viales del termoreactor cuidadosamente. Colocarlos en un soporte para tubos de ensayo y dejar enfriar a temperatura ambiente.

- Remover la tapa de los viales y agregar 2 mL de hidróxido de sodio 1,0 N a cada uno de los viales.
- Tapar herméticamente los viales y agitar por 30 segundos.
- Remover la tapa de los viales y usando un embudo, agregar el contenido de un sobre de reactivo “PhosVer3” en cada uno de los viales.
- Tapar herméticamente los viales y agitar por 30 segundos.
- Esperar 2 minutos para que la reacción se lleve a cabo.
- Ingresar el número de programa almacenado en el espectrofotómetro para fósforo total con longitud de onda 890 nm
- Luego de terminar el tiempo de espera, limpiar el exterior del vial con agua desionizada (el blanco) con una toalla y colocarlo en el espectrofotómetro.
- Presionar “CERO” en el espectrofotómetro.
- Remover el vial, limpiar el exterior del vial, que contiene la muestra, con una toalla.
- Color el vial con la muestra preparada en el espectrofotómetro.
- Presionar “READ” en el espectrofotómetro, para poder visualizar el resultado en ppm.

3.7.6. Determinación de densidad óptica

Basado en el método de “*Standar Methods for the Examination of Water and Wastewater*”:

- En el espectrofotómetro ingresar el programa, para poder medir absorbancia.
- Girar el cuadrante de longitud de onda del espectrofotómetro, hasta que se muestre 750 nm.
- Tomar una celda y llenarla con 10 mL agua desionizada (El blanco).

- Colocar la celda en el espectrofotómetro.
- Presionar “CERO” en el espectrofotómetro para fijar el valor cero que será la referencia.
- Retirar la celda con agua desionizada.
- Tomar una nueva celda y llenarla con 10 mL la muestra a analizar.
- Colocar la celda con la muestra en el espectrofotómetro
- Presionar “READ” y observar el resultado de la medición de la absorbancia.

3.7.7. Determinación de porcentajes de remoción

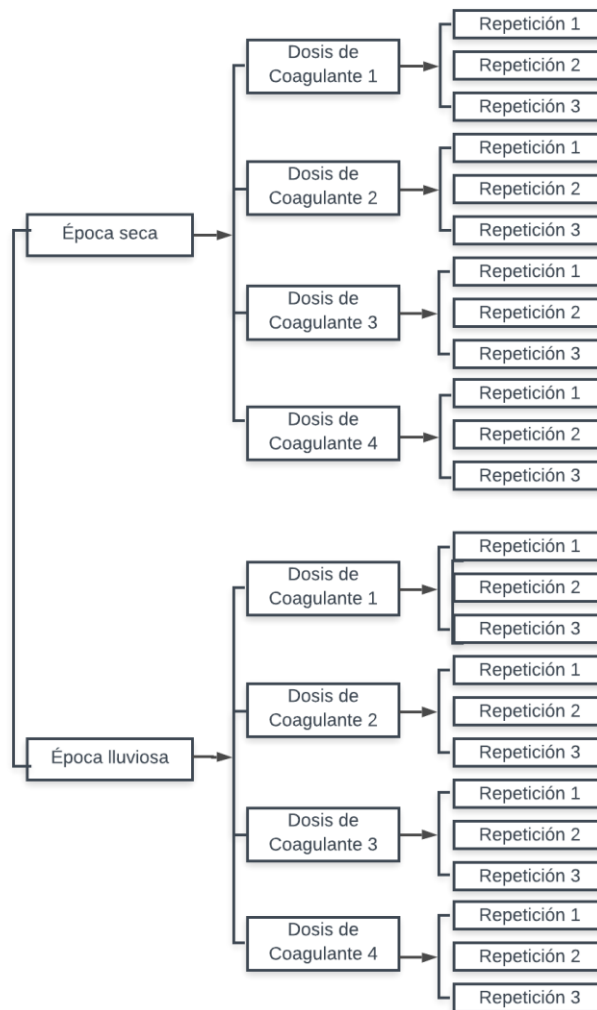
Para poder determinar los porcentajes de remoción de los parámetros a analizar se utilizará la siguiente ecuación:

$$\%Remoción = \left(\frac{Valor_{agua\ cruda} - Valor_{final}}{Valor_{agua\ cruda}} \right) * 100$$

3.8. Recolección y ordenamiento de la información

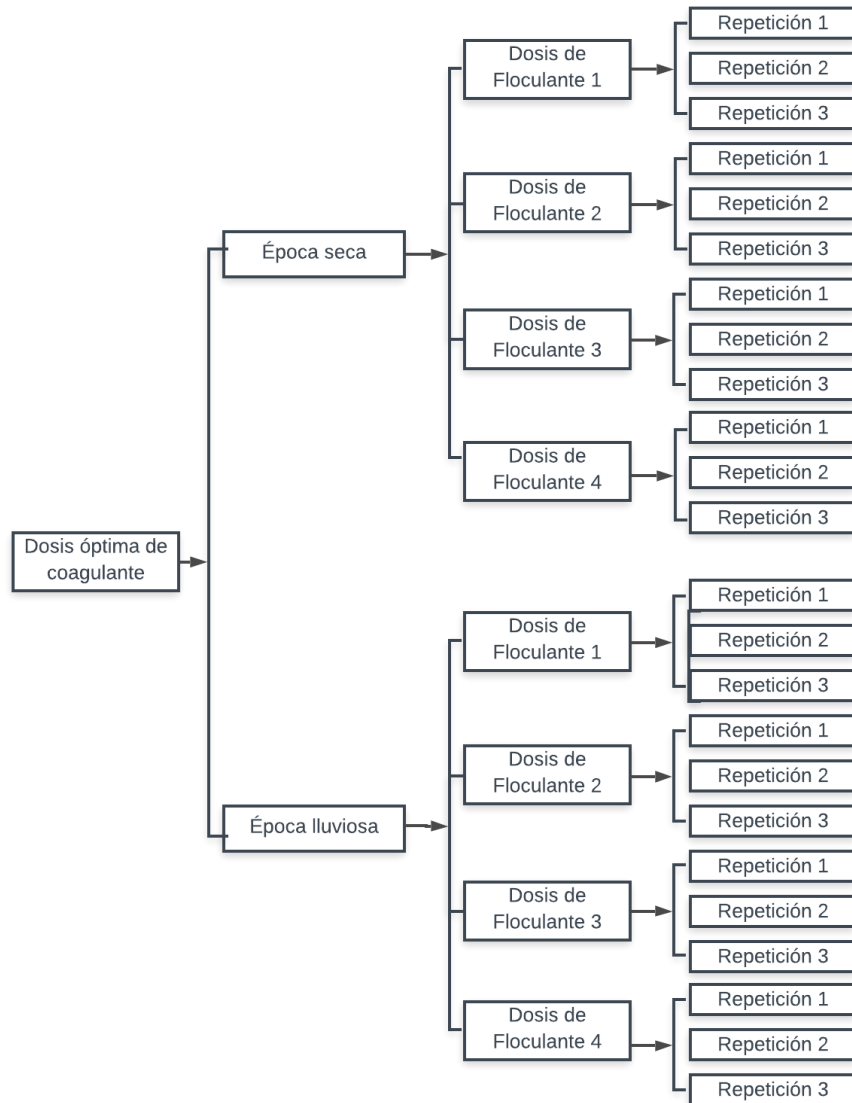
A continuación, se ilustra la descripción de los experimentos, para determinar la dosis optima de sulfato de aluminio y de poliacrilamida.

Figura 8. Descripción del experimento para determinar dosis óptima de sulfato de aluminio



Fuente: elaboración propia, empleando Lucidchart.

Figura 9. Descripción del experimento para determinar dosis óptima de poliacrilamida



Fuente: elaboración propia, empleando Lucidchart.

3.9. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.

Luego de recolectar y ordenar los datos obtenidos en las diferentes pruebas de jarras, realizadas en el Laboratorio de Agua del Instituto de Fomento Municipal, se realizó el procesamiento y tabulación de la información. En donde, se utilizó Microsoft Excel, para procesar los datos y posteriormente se utilizó Infostat para realizar el análisis estadístico.

3.10. Análisis estadístico

En el análisis estadístico se utilizaron medidas de tendencia central, medidas de dispersión, análisis de varianza y prueba de medias, para poder evaluar la variabilidad, confiabilidad de los datos obtenidos, así como las hipótesis planteadas.

3.10.1. Media aritmética

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

En donde:

\bar{x} = media aritmética de la muestra

x_1, x_2, \dots, x_n = Valores de la muestra

n = Tamaño de la muestra

3.10.2. Varianza de la muestra

$$s^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}$$

En donde:

s^2 = varianza de la muestra

\bar{x} =media aritmética

x_i =valor de la muestra

n =Tamaño de la muestra

3.10.3. Análisis de varianza

Para poder realizar el análisis de varianza, se utilizó el análisis ANOVA de 2 factores. Este análisis se llevó a cabo para poder validar las hipótesis planteadas respecto a la relación que existe entre los porcentajes de remoción y la cantidad de coagulante y floculante utilizada en el tratamiento del agua. También las hipótesis planteadas respecto a la influencia de la época en la que se trabajó (seca y lluviosa) en los porcentajes de remoción.

Se utilizó el parámetro de la F de Fisher, en el cual se analiza el valor de F obtenido y el valor crítico de F para poder concluir cuál de las hipótesis planteadas se acepta y cual se rechaza²³, los criterios para poder determinar son los siguientes:

- Si $F > F$ crítica: Se aceptan la hipótesis alterna (h_1) y se rechaza la hipótesis nula (h_0).

²³ WALPOLE, Ronald; MYERS, Ronald; MYERS, Sharon. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. p. 509.

- Si $F \leq F$ crítica: Se rechazan la hipótesis alterna (h_1) y se acepta la hipótesis nula (h_0).

3.10.4. Prueba de Tukey.

Luego de realizar el análisis de varianza, se llevó a cabo la prueba de Tukey con el fin de poder comparar los porcentajes de remoción y así determinar si la poliacrilamida produce un efecto positivo en la remoción de los diferentes parámetros.

3.11. Plan de análisis de datos

Los resultados obtenidos de las pruebas de jarras y mediciones posteriores se analizaron de manera matemática, estadística y gráfica, para poder determinar, primero, la dosis óptima de sulfato de aluminio y de poliacrilamida que hagan más eficiente el proceso de coagulación, y segundo, determinar si la poliacrilamida tiene un aporte significativo en el proceso de coagulación.

3.11.1. Programas para el análisis de datos

Se utilizó el programa Microsoft Excel para poder llevar a cabo las operaciones matemáticas necesarias, obtener diferentes gráficos de los resultados. El programa Infostat se utilizó para poder realizar el análisis estadístico (ANVA de dos factores y prueba de Tukey).

4. RESULTADOS

Tabla I. **Caracterización de agua cruda en época seca y lluviosa**

	Fecha	Color (PtCo)	Turbiedad (NTU)	N total (ppm)	P total (ppm)	D.O. (abs)
Época Lluviosa	05/08/2020	217	41,2	1,7	1,32	0,099
	11/08/2020	166	29,7	0,7	1,53	0,069
	18/08/2020	154	29,0	0,6	1,62	0,068
Época Seca	20/01/2021	102	10,3	3,2	1,43	0,078
	27/01/2021	211	38,7	1,9	1,94	0,140
	03/02/2021	97	10,8	3,6	1,75	0,058

Fuente: elaboración propia.

Tabla II. **Porcentajes de remoción para agua tratada con coagulante $Al_2(SO_4)_3$, época lluviosa**

Jarra	Dosis coagulante (mg/L)	Color (%)	Turbiedad (%)	N total (%)	P total (%)	D.O. (%)
1	60	50,96	54,50	88,24	30,27	54,44
2	80	67,52	69,81	90,20	40,35	70,56
3	100	79,86	84,60	100	49,84	86,17
4	120	90,20	92,28	100	72,72	94,09

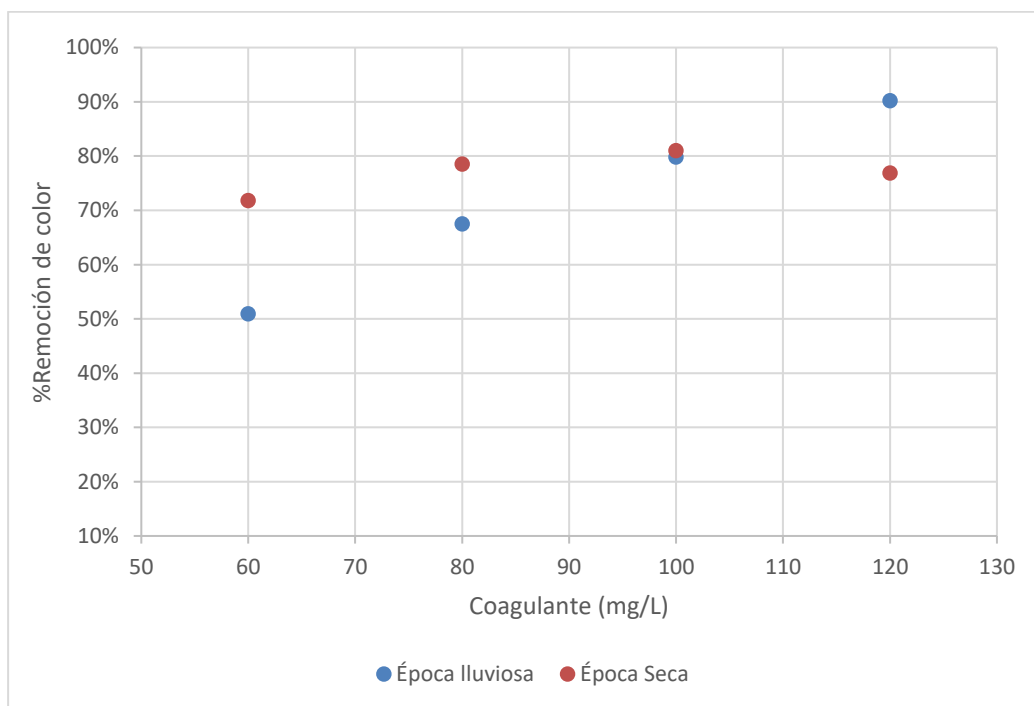
Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 26.

Tabla III. **Porcentajes de remoción para agua tratada con coagulante $Al_2(SO_4)_3$, época seca**

Jarra	Dosis coagulante (mg/L)	Color (%)	Turbiedad (%)	N total (%)	P total (%)	D.O. (%)
1	60	71,85	71,12	59,75	27,82	72,01
2	80	78,57	76,95	66,86	40,21	78,63
3	100	81,03	83,54	81,35	55,48	81,59
4	120	76,92	84,40	73,48	47,07	77,22

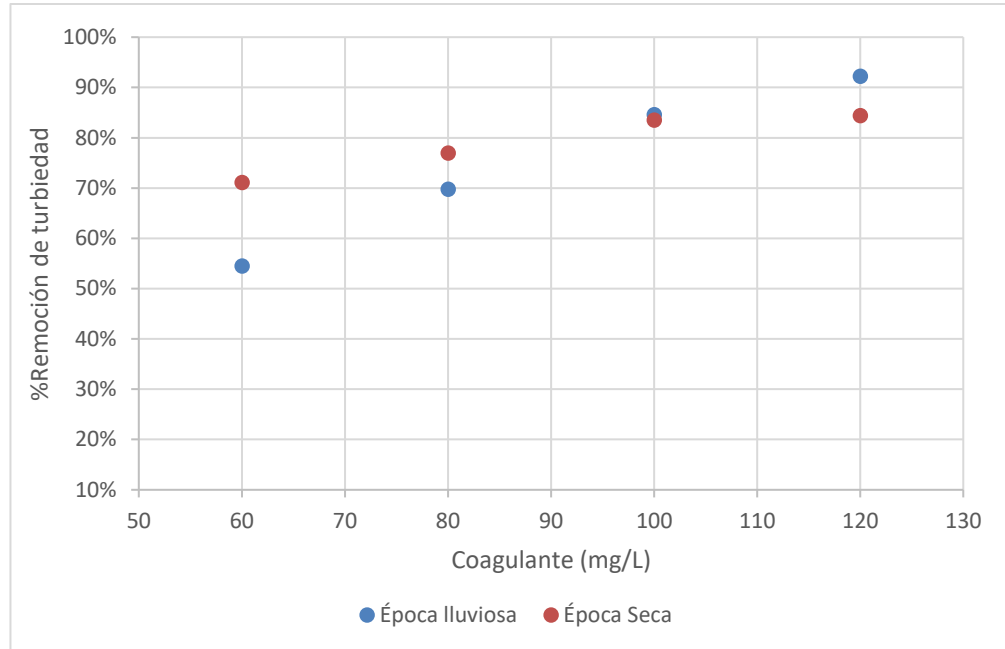
Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 27.

Figura 10. **Porcentaje de remoción de color en función de la dosis de coagulante $Al_2(SO_4)_3$**



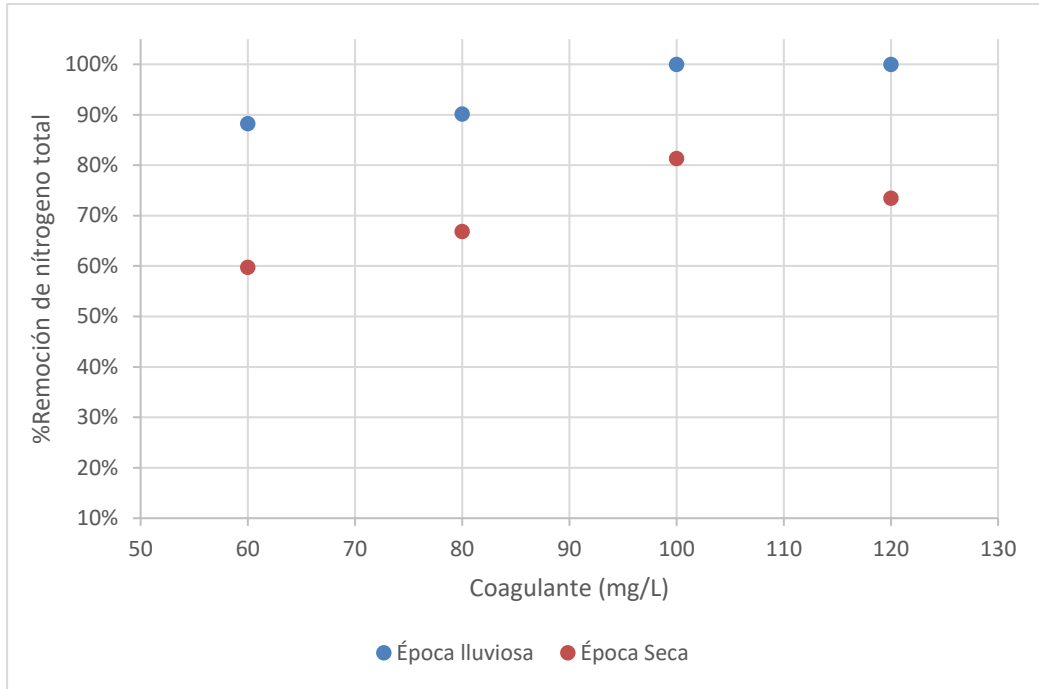
Fuente: elaboración propia, con base en tablas VIII y IX.

Figura 11. **Porcentaje de remoción de Turbiedad en función de la dosis de coagulante $Al_2(SO_4)_3$**



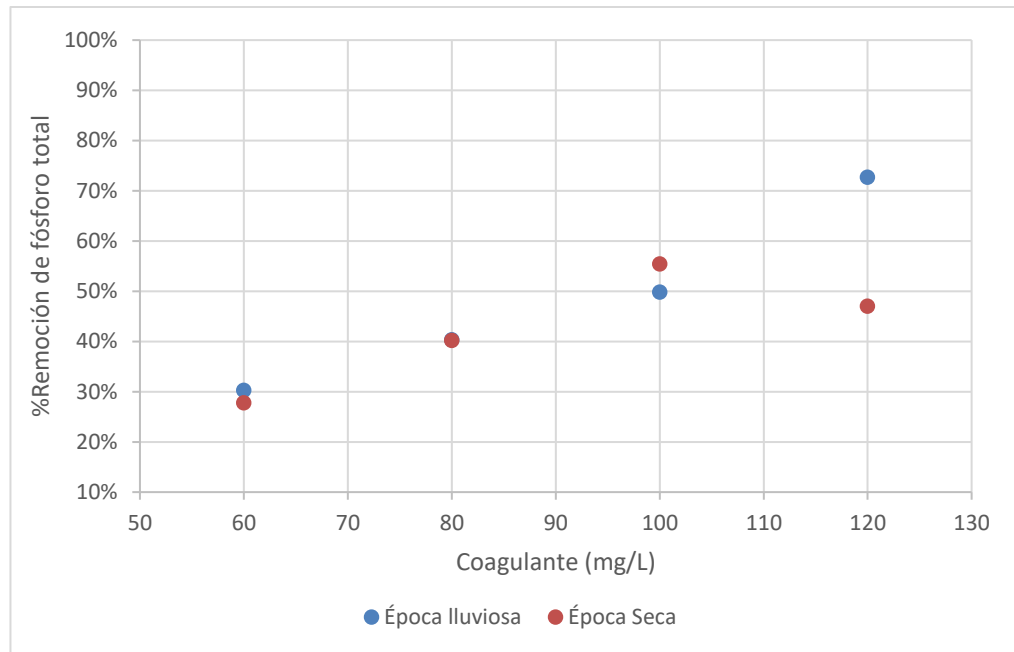
Fuente: elaboración propia, con base en tablas VIII y IX.

Figura 12. **Porcentaje de remoción de nitrógeno total en función de la dosis de coagulante $Al_2(SO_4)_3$**



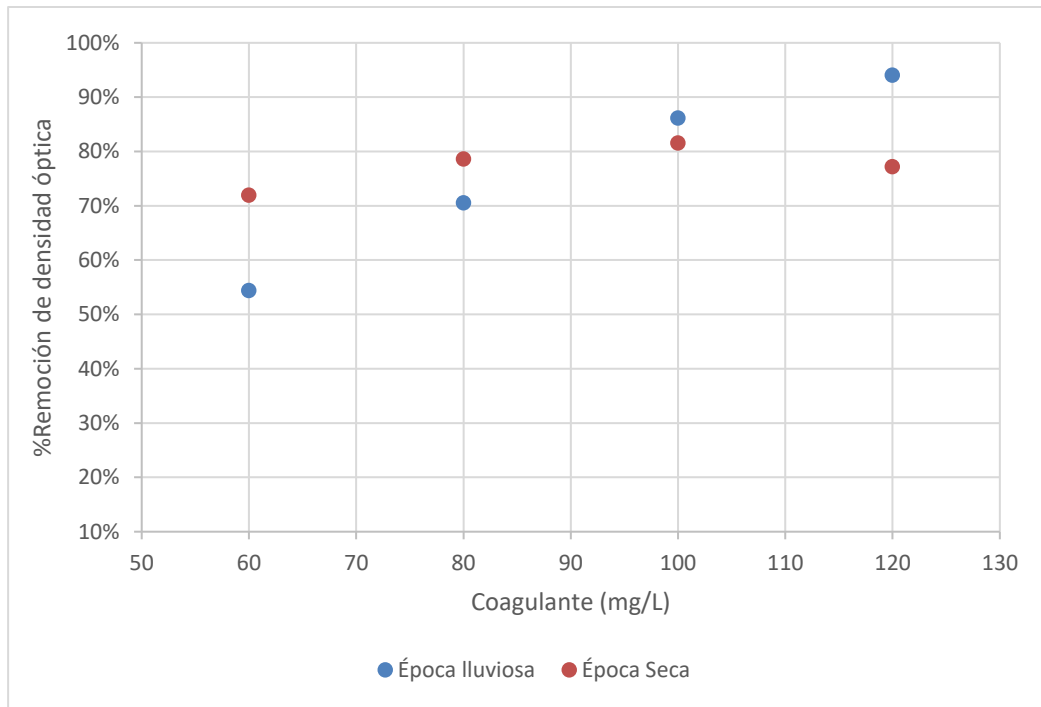
Fuente: elaboración propia, con base en tablas VIII y IX.

Figura 13. **Porcentaje de remoción de fósforo total en función de la dosis de coagulante $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$**



Fuente: elaboración propia, con base en tablas VIII y IX.

Figura 14. **Porcentaje de remoción de densidad óptica en función de la dosis de coagulante $Al_2(SO_4)_3$**



Fuente: elaboración propia, con base en tablas VIII y IX.

Tabla IV. **Dosis óptima de coagulante $Al_2(SO_4)_3$ en época lluviosa y seca**

	Dosis coagulante (mg/L)	Color (%)	Turbiedad (%)	N total (%)	P total (%)	D.O. (%)
Época Lluviosa	100	79,86	84,60	100	49,84	86,17
Época Seca	100	81,03	83,54	81,35	55,48	81,59

Fuente: elaboración propia, con base en tablas VIII y IX.

Tabla V. **Porcentajes de remoción para agua tratada con coagulante $Al_2(SO_4)_3$ y floculante poliacrilamida, época lluviosa**

Porcentajes de Remoción época lluviosa							
Jarra	Dosis coagulante (mg/L)	Dosis floculante (mg/L)	Color (%)	Turbiedad (%)	N total (%)	P total (%)	D.O. (%)
Tratamiento coagulante	100	0	79,86	84,60	100	49,84	86,17
1	100	10	84,07	87,95	100	40,37	84,56
2	100	15	84,93	88,79	100	55,17	86,38
3	100	20	87,32	90,05	100	64,35	88,18
4	100	25	88,97	90,88	98,04	64,74	89,34

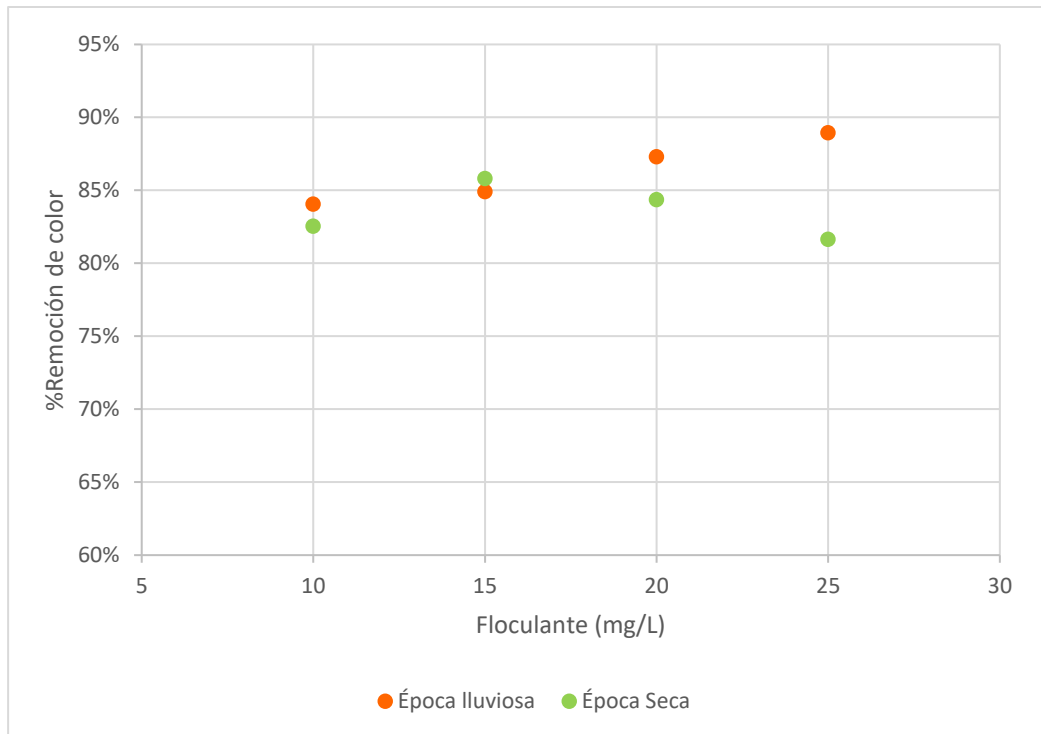
Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 28.

Tabla VI. **Porcentajes de remoción para agua tratada con coagulante $Al_2(SO_4)_3$ y floculante poliacrilamida, época seca**

Porcentajes de Remoción época lluviosa							
Jarra	Dosis coagulante (mg/L)	Dosis floculante (mg/L)	Color (%)	Turbiedad (%)	N total (%)	P total (%)	D.O. (%)
Tratamiento coagulante	100	0	81,03	83,54	81,35	55,48	81,59
1	100	10	82,56	82,17	77,53	46,93	82,25
2	100	15	85,82	84,77	72,09	57,71	85,35
3	100	20	84,36	85,34	82,87	74,20	85,03
4	100	25	81,66	82,43	80,85	69,26	83,11

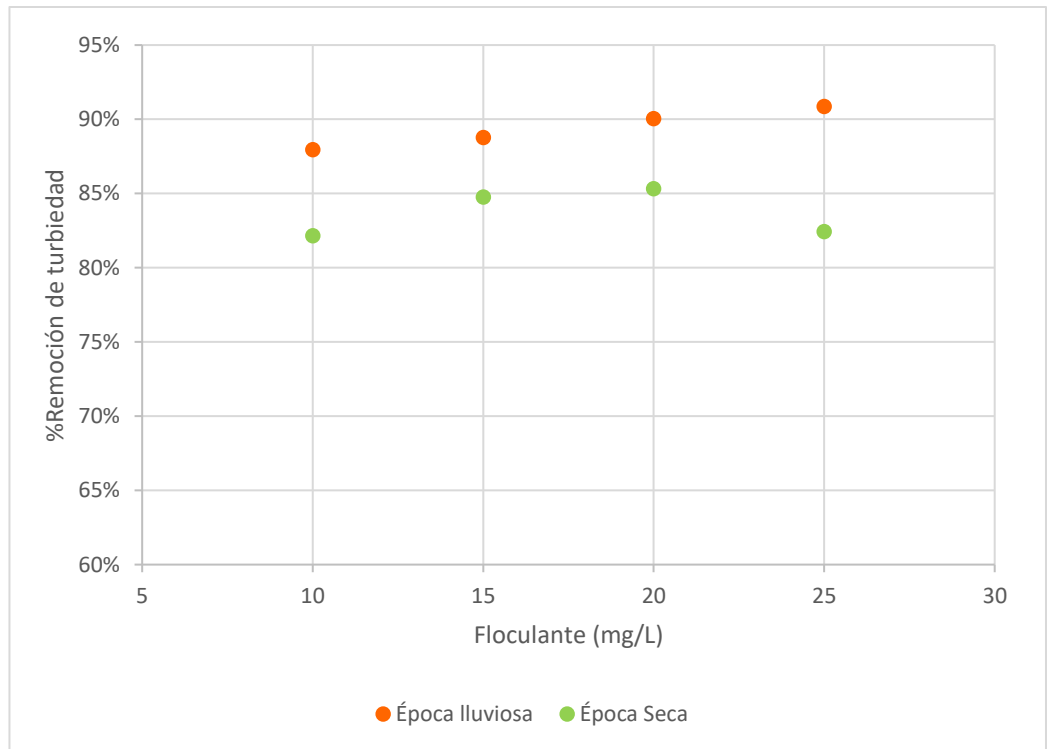
Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 29.

Figura 15. **Porcentaje de remoción de color en función de la dosis de floculante poliacrilamida**



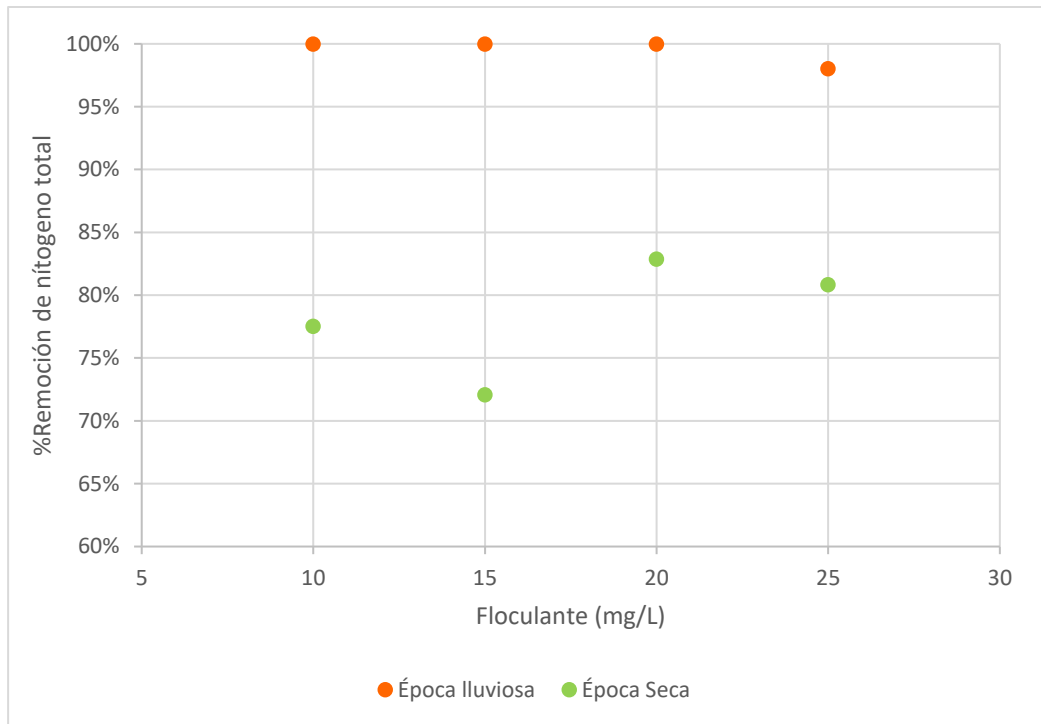
Fuente: elaboración propia, con base en tablas XI y XII.

Figura 16. **Porcentaje de remoción de turbiedad en función de la dosis de floculante poliacrilamida**



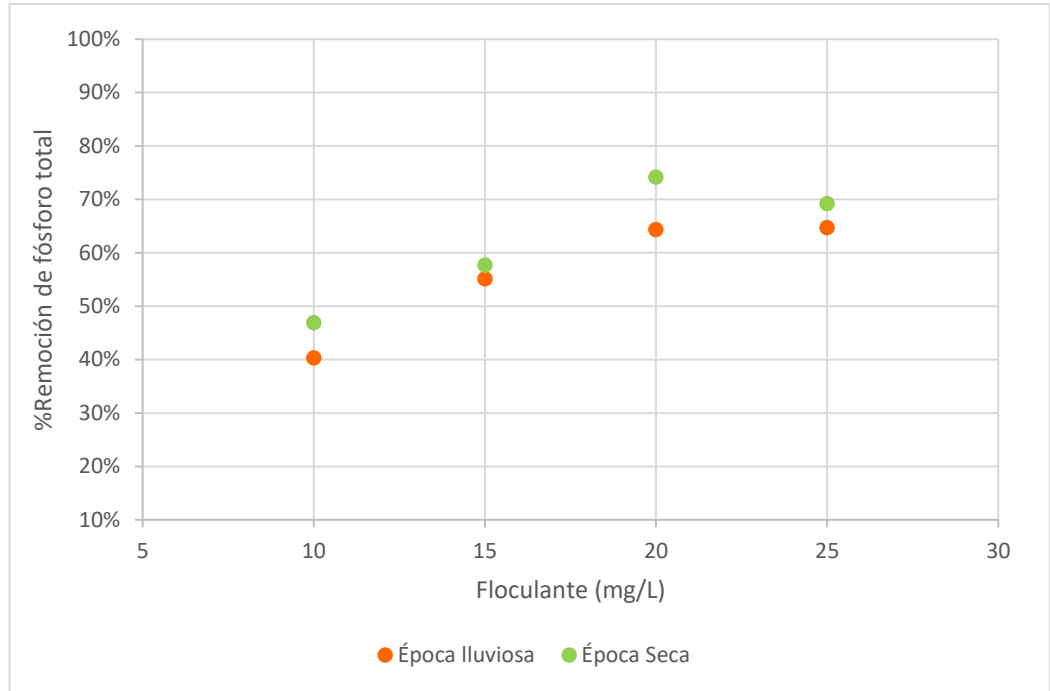
Fuente: elaboración propia, con basen a tablas XI y XII.

Figura 17. **Porcentajes de remoción de nitrógeno total en función de la dosis de floculante poliacrilamida**



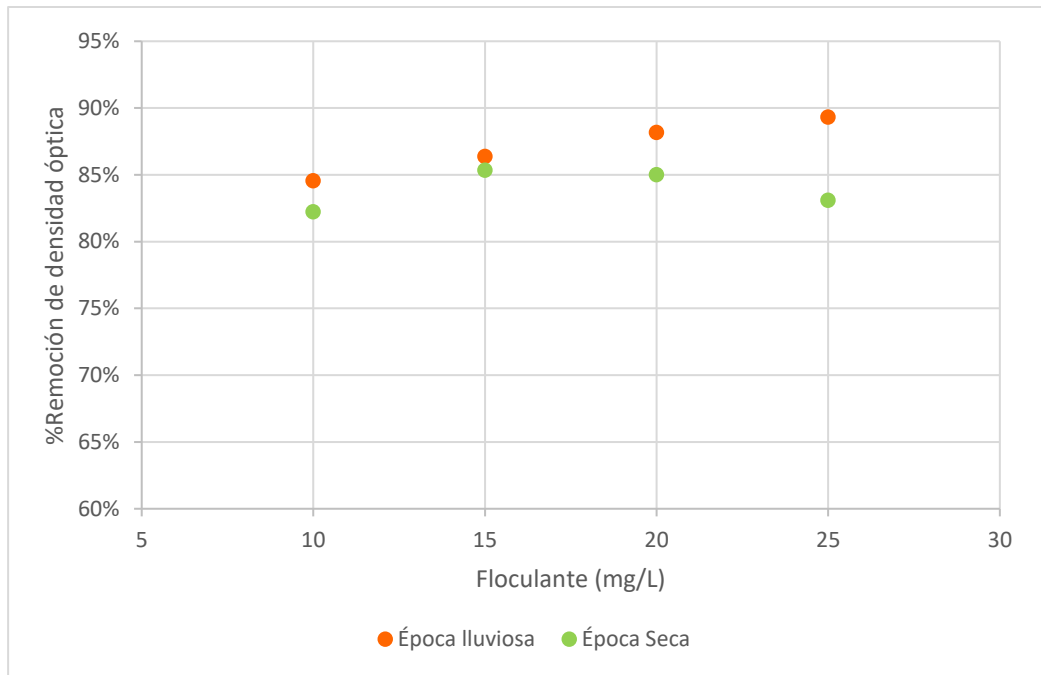
Fuente: elaboración propia, con base en tablas XI y XII.

Figura 18. **Porcentaje de remoción de fósforo total en función de la dosis de floculante poliacrilamida**



Fuente: elaboración propia, con base en tablas XI y XII.

Figura 19. **Porcentajes de remoción de densidad óptica en función de la dosis de floculante poliacrilamida**



Fuente: elaboración propia, con base en tablas XI y XII.

Tabla VII. **Dosis óptima de floculante poliacrilamida, para la época seca y la época lluviosa**

	Dosis coagulante (mg/L)	Dosis floculante (mg/L)	Color (%)	Turbiedad (%)	N total (%)	P total (%)	D.O. (%)
Época Lluviosa	100	20	87,32	90,05	100	64,35	88,18
Época Seca	100	20	84,36	85,34	82,87	74,20	85,03

Fuente: elaboración propia, con base en tablas X y XI.

Tabla VIII. **Comparación de porcentajes de remoción de tratamiento con coagulante $Al_2(SO_4)_3$ y el tratamiento agregando floculante poliacrilamida, en época lluviosa y seca**

	Dosis coagulante (mg/L)	Dosis floculante (mg/L)	Color (%)	Turbiedad (%)	N total (%)	P total (%)	D.O. (%)
Época Lluviosa	100	0	79,86	84,60	100	49,84	86,17
	100	20	87,32	90,05	100	64,35	88,18
Época Seca	100	0	81,03	83,54	81,35	55,48	81,59
	100	20	84,36	85,34	82,87	74,20	85,03

Fuente: elaboración propia, con base en tablas VIII, IX, X y XI.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Para que el proceso de coagulación-floculación se lleve a cabo, es necesario utilizar un coagulante y en algunos casos también un floculante para mejorar el proceso. La prueba de jarras consiste en poder simular los procesos de coagulación, floculación y sedimentación a nivel laboratorio, con el fin de poder encontrar las condiciones óptimas de trabajo, que mejoren el proceso de coagulación-floculación. En este caso, se utilizó para poder determinar la dosis óptima de coagulante sulfato de aluminio, determinar si la adición del floculante poliacrilamida mejora la remoción de color, turbiedad, nitrógeno total, fósforo total y biomasa de microalgas, que se encuentran en el agua del lago de Amatitlán y por último determinar la dosis optima de poliacrilamida

En la tabla I, se muestra la caracterización del agua cruda, recolectada en el lago de Amatitlán, durante la época lluviosa (agosto) y seca (enero y febrero). El agua se caracterizó respecto a los parámetros de interés: color, turbiedad, nitrógeno total, fósforo total y biomasa de microalgas representada por la densidad óptica.

Los parámetros en cuestión fueron medidos antes de aplicar el tratamiento y se volvieron a medir después de que el coagulante fuera aplicado, para poder calcular los porcentajes de remoción mostrados en las tablas II y III. En la tabla II se muestran los valores obtenidos en el agua de la época lluviosa, en donde se puede observar que el parámetro con mejor porcentaje de remoción es el nitrógeno total, el cual se removió en un 100 % utilizando una dosis de 100 mg/L y 120 mg/L. El fósforo total, fue el parámetro que se redujo en menor proporción en comparación a los otros. La época seca se muestra en la tabla III,

en este caso la turbiedad fue el parámetro que más se redujo, según los porcentajes de remoción. El color, nitrógeno total y densidad óptica, se redujeron en porcentajes similares. Sin embargo, al igual que en la época lluviosa, el fósforo total fue el parámetro que presentó menores porcentajes de remoción.

En la figura 10, se ilustran los porcentajes de remoción del color obtenidos con las diferentes dosis de sulfato de aluminio en la época seca y época lluviosa. De igual manera, en la figura 11 se muestran los porcentajes de remoción de la turbiedad, al variar las dosis de sulfato de aluminio en ambas. Se puede apreciar que, para ambos parámetros, en ambas épocas, la dosis de 60 mg/L fue la que produjo un menor porcentaje de remoción. También se aprecia, que al aumentar las dosis a 80 mg/L y 100 mg/L los porcentajes de remoción del color y la turbiedad también aumentan, en ambas épocas. Estadísticamente, por medio de un análisis de varianza de dos factores, con un nivel de significancia de 0,05. Se concluyó que los porcentajes de remoción del color y la turbiedad si varían significativamente al variar la dosis de sulfato de aluminio. Así mismo, se concluyó que la época en que se trabaje no tiene un efecto significativo en los porcentajes de remoción de estos 2 parámetros. Sin embargo, los porcentajes de remoción de ambos parámetros si varían significativamente al variar la dosis de sulfato de aluminio y la época en que se trabaje simultáneamente.

Los porcentajes de remoción para el nitrógeno total en función de la dosis de coagulante utilizada, se muestran en la figura 12. Al igual que en los parámetros anteriores, los menores porcentajes de remoción se obtuvieron al utilizar dosis de 60 mg/L en ambas épocas y de igual manera se observa que al aumentar la dosis de coagulante, el porcentaje de remoción también aumenta, incluso en la época lluviosa se puede observar que el porcentaje de remoción

alcanza un 100 % en la dosis de 100 mg/L. Sin embargo, luego de realizar un análisis de varianza de dos factores, con nivel de significancia de 0,05, se llegó a determinar que los porcentajes de remoción del nitrógeno no varían significativamente, al variar la dosis de sulfato de aluminio. Pero se determinó que los porcentajes de remoción sí varían, significativamente según la época en la que se trabaje, en la figura 12 se puede observar que los porcentajes de remoción en la época lluviosa fueron mayores a los de la época seca. Que en la época lluviosa se haya alcanzado 100 % de remoción se puede deber a la poca cantidad inicial presente de nitrógeno en el agua, se puede observar en la tabla I, al haber muy poca cantidad de este puede ser que al momento de agregar el coagulante todas las partículas cargadas de nitrógeno se desestabilizaran y posteriormente se aglomeraran con facilidad junto con el resto de los contaminantes. En el estudio "*Dissolved organic nitrogen removal during water treatment by aluminum sulfate and cationic polymer coagulation*" existe evidencia de que al llevar a cabo un tratamiento con sulfato de aluminio y un polímero catiónico, es posible reducir casi al 100 % el nitrógeno orgánico presente en el agua.

Los porcentajes de remoción del fósforo total al variar la dosis de sulfato de aluminio se observan en la figura 13 y los porcentajes de remoción de la biomasa de microalgas, representada por la densidad óptica, se observan en la figura 14. En ambas gráficas, la tendencia de los porcentajes de remoción es similar a los parámetros analizados anteriormente. En donde, en ambas épocas, el menor porcentaje de remoción de ambos parámetros se presenta en la primera dosis (60 mg/L) y a medida que la dosis de sulfato de aluminio se aumenta, los porcentajes de remoción del fósforo total y la densidad óptica son mayores, con diferencia en la dosis de 120 mg/L en la época seca. Al analizar los datos estadísticamente, por medio de un análisis de varianza de dos factores, utilizando un nivel de significancia de 0,05, se llegó a la conclusión que

lo porcentaje de remoción del fósforo y la densidad óptica (medida de la biomasa de microalgas) si varían significativamente respecto de la dosis de sulfato de aluminio utilizada en el tratamiento. Pero, al igual que en el color y la turbiedad, los porcentajes de remoción de estos dos parámetros no varían significativamente según la época en que se trabaje. Por otro lado, también se llegó a la conclusión de que los porcentajes de remoción de estos dos parámetros si varían significativamente al variar la dosis de sulfato de aluminio y la época en que se trabaje simultáneamente.

Es posible observar que en todas las gráficas mencionadas anteriormente los menores porcentajes de remoción de cada parámetro se obtuvieron con la dosis de 60 mg/L, esto se debe a que “al utilizar una cantidad de coagulante muy baja o menor a la necesaria las partículas coloidales cargadas que se encuentran dispersas, no se neutralizan en su totalidad, provocando que su aglomeración sea escasa y la formación de flóculos sea poca”²⁴. Resultando en una baja remoción de los parámetros de interés. Por otro lado, cuando se utiliza una cantidad de coagulante muy grande o mayor a la necesaria, se da una inversión de cargas en las partículas, esto conlleva a la formación de microflóculos. Estos “microflóculos no poseen una buena velocidad de sedimentación y tampoco tienen el tamaño suficiente grande para poder sedimentarse”²⁵, por lo que provocan que el porcentaje de remoción sea bajo. Esto último, se pudo observar en la mayoría de los porcentajes de remoción de la dosis de 120 mg/L, de manera que es necesario determinar cuál es la dosis óptima que tenga los mejores porcentajes de remoción.

Para ambas épocas se escogió las dosis de 100 mg/L como la dosis óptima del proceso, ya que en la época seca la mayoría de los parámetros al

²⁴ ANDÍA, Yolanda. *Tratamiento de Agua: Coagulación Y Floculación*. p.19.

²⁵ LORENZO-ACOSTA, Yaniris. *Estado del arte del tratamiento de agua por coagulación-floculación*. p. 10,

utilizar esta dosis se obtuvo un máximo en los porcentajes de remoción de los mismos. Ahora bien, el nitrógeno es una de las sustancias consideradas como nutrientes en el agua y de principal control para los problemas de eutrofización en los lagos, en la época lluviosa al aplicar la dosis de 100 mg/L se obtuvo un porcentaje de remoción del 100 %, aunque en la dosis de 120 mg/L este porcentaje no disminuye, en los otros parámetros en la dosis de 100 mg/L se obtuvieron porcentajes de remoción cercanos a 80 % o mayores, exceptuando el fósforo. De manera que sí al aplicar una dosis de 100 mg/L en el nitrógeno se remueve el 100 % y en los demás parámetros se logra una alta remoción, no es necesario aplicar una mayor cantidad, ya que a escala laboratorio puede que esta cantidad extra sea mínima, pero en cantidades mayores de agua la cantidad de coagulante a utilizar sería mucho mayor. Por ello, para la época lluviosa se obtuvo que la dosis óptima de sulfato de aluminio es 100 mg/L.

Según la investigación titulada “Optimización a escala laboratorio del sistema de tratamiento de agua residual de una industria papelera”, se evidencia de que el proceso de coagulación-floculación puede ser optimizado agregando poliacrilamida como coagulante. Esta investigación tuvo como objetivo evaluar si utilizar poliacrilamida durante el proceso de coagulación-floculación, podía mejorar la remoción de turbiedad de color, turbiedad, nitrógeno total, fósforo total y biomasa de microalgas (medida por la densidad óptica) en el agua del lago de Amatitlán. Para ello se llevó a cabo una prueba de jarras, utilizando una dosis de 100 mg/L de sulfato de aluminio, combinado con diferentes dosis de poliacrilamida. Los diferentes porcentajes de remoción obtenidos en esta prueba de jarras se muestran en las tablas V y VI. En la tabla V se muestran los porcentajes en la época lluviosa, donde se puede observar que el nitrógeno es el que presenta mayores porcentajes de remoción, siendo 100 % en la mayoría de la dosis. A excepción del fósforo, la mayoría de los parámetros presentan porcentajes de remoción cercanos o mayores a 80 %. En

la época seca (tabla VI) se puede observar que, a excepción del fósforo, todos los parámetros tuvieron porcentajes de remoción mayores a 80 %. En ambas épocas el fósforo presentó los menores porcentajes de remoción, comparado con los otros parámetros.

Los porcentajes de remoción del color, en la época seca y lluviosa, al variar la dosis de poliacrilamida, se muestran en la figura 15. Se puede observar que en las primeras dosis ambas épocas presentan porcentajes de remoción similares. A pesar de que los porcentajes de remoción son diferentes en las demás dosis aplicadas, luego de realizar un análisis de varianza de dos factores, con un nivel de significancia de 0,05, se determinó que los porcentajes de remoción del color no varían significativamente al variar la dosis de floculante poliacrilamida. De la misma manera, se determinó que la época en que se trabaje no tiene algún efecto significativo en los porcentajes de remoción del color.

En la figura 16 y 17 se observan los porcentajes de remoción de la turbiedad y el nitrógeno total en función de la dosis de poliacrilamida, en ambas épocas. Al igual que en la remoción de color, se puede apreciar que los porcentajes de remoción cambian según la dosis de poliacrilamida utilizadas, a excepción del nitrógeno en la época lluviosa. Sin embargo, luego de realizar un análisis de varianza de dos factores, utilizando un nivel de significancia de 0,05, se concluyó que los porcentajes de remoción de la turbiedad y el nitrógeno no varían significativamente al variar la dosis de poliacrilamida. Pero a diferencia del color, los porcentajes de remoción de estos parámetros si varían significativamente según la época en que se trabaje.

En la figura 18, se ilustran los porcentajes de remoción de fósforo total, en la época lluviosa y seca, al variar las dosis de floculante. Se puede observar

que en ambas épocas con la primera dosis de 10 mg/L se obtuvieron los porcentajes de remoción más bajos. A medida que se aumentó la cantidad de poliacrilamida también aumentaron los porcentajes de remoción. Con excepción de la dosis de 25 mg/L, en la cual el porcentaje de remoción disminuyó en la época seca y en la época lluviosa el valor no difiere del todo con el anterior. Al realizar un análisis de varianza de dos factores, con nivel de significancia de 0,05, se obtuvo como resultado que los valores del porcentaje de remoción de fósforo total sí varían significativamente al variar la dosis de poliacrilamida. Siendo la dosis de 20 mg/L la que presenta los porcentajes de remoción más altos.

En la última figura de la sección de resultados (figura 19) se muestran los diferentes porcentajes de remoción de la biomasa de microalgas, representada por la densidad óptica, en función de la dosis de poliacrilamida. En donde al igual que los parámetros de color, turbiedad y nitrógeno total, se realizó un análisis estadístico, en el cual se determinó que a pesar de que los porcentajes de remoción son diferentes en cada dosis de poliacrilamida, estos no varían de forma significativa al variar la dosis del floculante y tampoco varían de forma significativa al variar la época en que se trabajó.

En la tabla XII, se muestran los valores de la dosis óptima de poliacrilamida al utilizar una dosis de 100 mg/L de sulfato de aluminio. En ambas épocas se determinó que la dosis óptima de poliacrilamida es 20 mg/L. Se estableció esta dosis ya que en la remoción de fósforo se obtuvo un máximo en los porcentajes de remoción, ya que con la dosis de 25 mg/L los porcentajes disminuyeron o no cambiaron del todo. Ahora bien, como se mencionó anteriormente el nitrógeno es una de las sustancias consideradas como nutrientes en el agua y es una de las principales razones (junto al fósforo) de que, en lagos, como en este caso el lago de Amatitlán, se dé el problema de eutrofización. En la época lluviosa, para el nitrógeno en las primeras 3 dosis se

obtuvo un 100 % de remoción, pero en la dosis de 25 mg/L este disminuyó y en el fósforo en la dosis de 20 mg/L se obtuvo un porcentaje de remoción de 64,35 % pero la siguiente dosis este valor solo aumenta en un 0,19 %. Por lo que, si aplicando una dosis de 20 mg/L se obtiene un 100 % de remoción de nitrógeno, los demás parámetros tienen altos porcentajes de remoción y en el fósforo el porcentaje de remoción con 20 mg/L es aproximadamente igual a la de 25 mg/L, no es necesario aplicar una dosis más alta. De igual manera por medio de una prueba de Tukey, se pudo confirmar que efectivamente la dosis de 20 mg/L es la que presenta mejores porcentajes de remoción.

Por último, en la tabla VII se muestra la comparación de los porcentajes de remoción entre el tratamiento con la dosis óptima de sulfato de aluminio y el tratamiento agregando la dosis óptima de poliacrilamida, en la época lluviosa y seca. Como se mencionó previamente, para todos los parámetros se llevó a cabo un análisis de varianza de dos factores, para determinar si los porcentajes de remoción varían significativamente al variar la dosis de poliacrilamida. Al momento de realizar los análisis, se incluyeron los porcentajes de remoción obtenidos con el tratamiento de la dosis de 100 mg/L de sulfato de aluminio sin poliacrilamida. De manera que, para los parámetros de color, turbiedad, nitrógeno total y densidad óptica, en donde se obtuvo que los porcentajes de remoción no varían significativamente al variar la dosis de poliacrilamida. Se puede concluir que agregar poliacrilamida al proceso de coagulación-floculación, no tiene un efecto significativo en la remoción de estos parámetros. Sin embargo, para el fósforo total, en donde se obtuvo que el porcentaje de remoción sí varía significativamente al variar la dosis de poliacrilamida. Se puede concluir que agregar poliacrilamida al proceso de coagulación-floculación, sí tiene un efecto significativo en la remoción de fósforo total en comparación al utilizar solo sulfato de aluminio.

CONCLUSIONES

1. La dosis óptima de coagulante sulfato de aluminio, para el proceso de coagulación-floculación, es de 100 mg/L, tanto para la época lluviosa como la época seca en el agua del lago de Amatitlán.
2. La dosis óptima de floculante poliacrilamida, al utilizar una dosis de 100 mg/L de sulfato de aluminio, es de 20 mg/L, tanto para la época lluviosa como para la época seca en el agua del lago de Amatitlán.
3. Para la remoción de color, turbiedad, nitrógeno y densidad óptica en el agua del lago de Amatitlán, no es conveniente agregar el floculante poliacrilamida junto con el coagulante sulfato de aluminio. Ya que, aunque este presenta una mejoría en la remoción de estos parámetros, estadísticamente el aporte de la poliacrilamida no es significativo.
4. En la remoción específica de fósforo, que es uno de los nutrientes en el agua y razón de que se produzca eutrofización, estadísticamente el aporte de la poliacrilamida sí es significativo. Por lo que resulta conveniente agregar poliacrilamida junto a sulfato de aluminio, para mejorar la remoción de este parámetro en el agua del lago de Amatitlán.

RECOMENDACIONES

1. Realizar un estudio económico, con el fin de evaluar si es viable o no el uso de la poliacrilamida para la remoción de fósforo en el agua, a pesar de ser significativo el aporte del floculante en la remoción del parámetro en cuestión.
2. Encontrar las condiciones de trabajo óptimas para la poliacrilamida (pH, temperatura del agua y velocidad de agitación) y evaluar si existe o no alguna mejoría en el efecto de la poliacrilamida, al trabajar en estas condiciones.
3. Evaluar el efecto de otros floculantes en la remoción de color, turbiedad nitrógeno, fósforo y densidad óptica por medio del proceso coagulación-floculación, al utilizar sulfato de aluminio, para poder compararlo y determinar si hay una mejoría respecto a usar poliacrilamida.
4. Evaluar el efecto de la poliacrilamida en la remoción de color, turbiedad nitrógeno, fósforo y densidad óptica utilizando otros coagulantes, para poder compararlo con el efecto al utilizar sulfato de aluminio.
5. Determinar si además del fósforo y el color, la poliacrilamida tiene un efecto significativo en la disminución en la disminución de la demanda biológica de oxígeno (DBO) y en la demanda química de oxígeno (DQO).

BIBLIOGRAFÍA

1. AGUILAR, María Isabel; SÁEZ, José; LLÓRENA, Mercedes; SOLER, Antonio; ORTUÑO, Juan Francisco. *Tratamiento Físicoquímico de Aguas Residuales, Coagulación-Floculación*. España: Universidad de Murcia, Servicio de Publicaciones. 2002. 150 p.
2. ALDANA, Luis. *Comparación de la eficiencia del sulfato de aluminio y el sulfato ferroso en la remoción de sólidos en suspensión en aguas residuales de tipo ordinario*. Trabajo de graduación de Ingeniería Química, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Guatemala. 2014. 92 p.
3. ANDÍA, Yolanda. *Tratamiento de Agua: Coagulación Y Floculación. Evaluación de Plantas y Desarrollo tecnológico*. Lima, Perú: SEDEPAL. 2000. 44 p.
4. AZURDIA, Andrea. *Estimación de la productividad primaria y biomasa en el lago de Amatitlán en la época seca y lluviosa*. Trabajo de graduación Química, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Guatemala. 2016. 138 p.
5. BANERJEE, Chiranjib; GUPTA, Pratibha; MISHRA, Sumit; SEN, Gautam; SHUKLA, Pratyosh; BANDOPAGHYAY, Rajirb. *Study of polyacrylamide grafted starch based algal flocculation towards applications in algal biomass harvesting*. International Journal of Biological Macromolecules. 2012. 461 p.

6. BARRENCHEA, Ada. *Tratamiento de Agua para consumo humano. Capítulo 4: Coagulación*. Lima, Perú: 2004. 224 p.
7. CASTILLO, Jorge. *Evaluación del efecto que provoca la concentración del sulfato férrico en el sulfato de aluminio, cuando la mezcla es utilizada como coagulante para la clarificación de aguas residuales*. Trabajo de graduación Química, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Guatemala. 2015. 70 p.
8. CLESCWEL, Leonore; GREENBER, Arnold; EATON, Andrew. *Standar Methods For The Examination of Water and Wastewater*. 20a ed. Baltimore, Maryland, Estados Unidos: American Public Health Association. 1995. 2671 p.
9. CULEBRO, Jaime. *Cosechado de microalgas cultivadas en lagunas de alta carga para el tratamiento de aguas residuales: efecto del almidón sobre la floculación y la producción de biogás*. Trabajo de tesis de master en sostenibilidad. UPC Barcelona. España: 2015. 73 p.
10. ENTRY, James; SOJKA, R. E.; WATWOOD, Maribeth; ROSS, Craig. *Polyacrylamide preparations for protection of water quality threatened by agricultural runoff contaminants*. Environmental Pollution. 2002. 200 p.
11. FERREIRA, Mario. *Evaluación de un agente floculante basado en poliglicerol funcionalizado para la recuperación de biomasa en Microalgas Chlorella Vulgaris UTEX 1803*. Trabajo de graduación

de Ingeniero Químico, Universidad de Santander de Bucaramanga, Colombia. 2019. 36 p.

12. GALINGO, Giancarlo. *Determinación de la dosis óptima de sulfato de aluminio Granulado Tipo B en la planta de tratamiento de agua potable Yurajhuanca – Emapa Paso*. Trabajo de graduación de Ingeniero Ambiental. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. Cerro de Pasco, Perú. 2018. 124 p.
13. GARCIA, Stephania. *Optimización a escala laboratorio del sistema de tratamiento de agua residual de una industria papelera*. Trabajo de graduación de Ingeniero Ambiental. Universidad Autónoma de Occidente Cali, Colombia. 2019. 99 p.
14. GÓMEZ, Néstor. *Remoción de materia orgánica por coagulación - floculación*. Trabajo de graduación de Ingeniero Químico. Universidad Nacional de Colombia Manizales, Colombia. 2005. 113 p.
15. GONZÁLEZ, Luis. *Evaluación a nivel Laboratorio de la eficiencia de dos coagulantes para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la producción de aceites y grasas comestibles*. Trabajo de Graduación de Ingeniero Químico. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Guatemala. 2011. 140 p.
16. FLORES, Gustavo; LÓPEZ, Marlín; MANNSBACH, María. *Remoción de materia orgánica total en aguas residuales municipales a partir de procesos de coagulación-floculación*. Revista Internacional de Investigación y Docencia. Valledupar, Colombia. 2016. 33 - 39 p.

17. HACH COMPANY. (1997). *Water Analysis Handbook*. 3a ed. Loveland, Colorado, Estados Unidos: Hach Company. 1997. 1642 p.
18. IÑIGUEZ, Gilberto; HERNÁNDEZ, Rosaura. *Estudio para la rehabilitación de una planta de tratamiento de vinazas tequileras mediante un floculante polimérico de poliacrilamida (PAM)*. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. Jalisco, México: 2010. 299 - 311 p.
19. LEDESMA, Claudia; BONANSEA, Matías; RODRIGUEZ, Claudia María; SÁNCHEZ, Ángel. *Determinación de indicadores de eutrofización en el embalse Río Tercero, Córdoba (Argentina)*. Revista Ciência Agronômica, vol. 44, núm. 3. Ceará, Brasil: 2013. 419-425 p.
20. LEE, Wontae & WESTERHOFF, Paul. *Dissolved organic nitrogen removal during water treatment by aluminum sulfate and cationic polymer coagulation*. Water Research, vol. 40. Arizona, Estados Unidos: 2006. 3767-3774 p.
21. LORENZO-ACOSTA, Yaniris. *Estado del arte del tratamiento de agua por coagulación-floculación*. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, vol. XL, núm. 2, Ciudad de La Habana, Cuba. 17 p.
22. ONGLEY, Edwin David. *Lucha Contra la Contaminación Agrícola de Los Recursos Hídricos*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación. Burlington, Canadá: 1997. 151 p.

23. RUIZ, Ana. *Puesta en marcha de un cultivo de microalgas para la eliminación de nutrientes de un agua residual urbana previamente tratada anaeróbicamente*. Tesis de Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España: 2011. 96 p.
24. SAAVEDRA, Lizet. *Remoción de Fósforo en aguas residuales por el método de floculación y sedimentación utilizando cal artesanal y alumbre – kollpa*. Trabajo de graduación de Ingeniera Ambiental. Universidad Privada San Carlos. Puno, Perú: 2016. 143 p.
25. SIGUI, Norman. *¿Por qué continúa la contaminación de aguas en Guatemala?* Eco-ingeniería Consultiva, Guatemala: 2017. 167 - 175 p.
26. VIELMAN, Rony. *Determinación del pH óptimo de coagulación, mediante los coagulantes sulfato de aluminio y sulfato ferroso de las aguas residuales de una industria de alimentos*. Trabajo de graduación de Ingeniero Químico. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Guatemala. 2019. 92 p.
27. WALPOLE, Ronald; MYERS, Ronald; MYERS, Sharon. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. 9a ed. México: Pearson Educación. 2012. 792 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. **Caracterización de agua cruda en época lluviosa y seca**

	Fecha	Color (PtCo)	Turbiedad (NTU)	N total (ppm)	P total (ppm)	D.O. (abs)
Época Lluviosa	05/08/2020	217	41,2	1,7	1,32	0,099
	11/08/2020	166	29,7	0,7	1,53	0,069
	18/08/2020	154	29,0	0,6	1,62	0,068
Época Seca	20/01/2021	102	10,3	3,2	1,43	0,078
	27/01/2021	211	38,7	1,9	1,94	0,140
	03/02/2021	97	10,8	3,6	1,75	0,058

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Caracterización del agua tratada con coagulante $Al_2(SO_4)_3$, repetición No. 1, época lluviosa**

Fecha: 05/08/2020						
Jarra	Dosis coagulante (mg/L)	Color (PtCo)	Turbiedad (NTU)	N total (ppm)	P total (ppm)	D.O. (abs)
Agua cruda	0	217	41,20	1,70	1,32	0,099
1	60	122	19,10	0,60	1,07	0,053
2	80	91	14,20	0,50	0,73	0,034
3	100	60	8,75	0,00	0,58	0,018
4	120	30	4,60	0,00	0,14	0,006

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Caracterización del agua tratada con coagulante**
Al₂(SO₄)₃, repetición No. 2, época lluviosa

Fecha: 11/08/2020						
Jarra	Dosis coagulante (mg/L)	Color (PtCo)	Turbiedad (NTU)	N total (ppm)	P total (ppm)	D.O. (abs)
Agua cruda	0	166	29,70	0,70	1,53	0,069
1	60	83	15,30	0,00	0,95	0,032
2	80	49	9,57	0,00	0,90	0,020
3	100	35	4,87	0,00	0,78	0,011
4	120	14	2,00	0,00	0,41	0,004

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Caracterización del agua tratada con coagulante**
Al₂(SO₄)₃, repetición No. 3, época lluviosa

Fecha: 18/08/2020						
Jarra	Dosis coagulante (mg/L)	Color (PtCo)	Turbiedad (NTU)	N total (ppm)	P total (ppm)	D.O. (abs)
Agua cruda	0	154	29,00	0,60	1,62	0,068
1	60	63	11,20	0,00	1,07	0,025
2	80	40	6,93	0,00	1,05	0,017
3	100	18	2,48	0,00	0,90	0,005
4	120	11	1,53	0,00	0,72	0,004

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Caracterización del agua tratada con coagulante**
Al₂(SO₄)₃, repetición No. 1, época seca

Fecha: 20/01/2021						
Jarra	Dosis coagulante (mg/L)	Color (PtCo)	Turbiedad (NTU)	N total (ppm)	P total (ppm)	D.O. (abs)
Agua cruda	0	102	10,30	3,20	1,43	0,078
1	60	31	3,34	1,60	1,14	0,021
2	80	21	2,94	1,60	0,98	0,014
3	100	20	1,77	1,00	0,74	0,012
4	120	33	1,98	1,40	0,87	0,022

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Caracterización del agua tratada con coagulante**
Al₂(SO₄)₃, repetición No. 2, época seca

Fecha: 27/01/2021						
Jarra	Dosis coagulante (mg/L)	Color (PtCo)	Turbiedad (NTU)	N total (ppm)	P total (ppm)	D.O. (abs)
Agua cruda	0	211	38,70	1,90	1,94	0,140
1	60	51	10,20	0,50	1,08	0,034
2	80	40	7,87	0,20	0,92	0,026
3	100	33	4,93	0,10	0,70	0,022
4	120	30	2,90	0,10	0,98	0,020

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Caracterización del agua tratada con coagulante $Al_2(SO_4)_3$, repetición No. 3, época seca**

Fecha: 03/02/2021						
Jarra	Dosis coagulante (mg/L)	Color (PtCo)	Turbiedad (NTU)	N total (ppm)	P total (ppm)	D.O. (abs)
Agua cruda	0	97	10,80	3,60	1,75	0,058
1	60	29	3,01	1,60	1,42	0,019
2	80	24	2,19	1,40	1,11	0,016
3	100	21	2,10	0,70	0,80	0,014
4	120	22	2,17	1,10	0,83	0,015

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Caracterización del agua tratada con coagulante $Al_2(SO_4)_3$ y floculante poliacrilamida, repetición No. 1, época lluviosa**

Fecha: 05/08/2020							
Jarra	Dosis coagulante (mg/L)	Dosis floculante (mg/L)	Color (PtCo)	Turbiedad (NTU)	N total (ppm)	P total (ppm)	D.O. (abs)
Agua cruda	0	0	217	41,2	1,7	1,32	0,099
Tratamiento coagulante	100	0	60	8,75	0	0,58	0,018
1	100	10	31	4,43	0,00	0,70	0,017
2	100	15	25	3,86	0,00	0,55	0,013
3	100	20	23	3,44	0,00	0,51	0,012
4	100	25	19	2,83	0,10	0,16	0,010

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Caracterización del agua tratada con coagulante $Al_2(SO_4)_3$ y floculante poliacrilamida, repetición No. 2, época lluviosa**

Fecha: 11/08/2020							
Jarra	Dosis coagulante (mg/L)	Dosis floculante (mg/L)	Color (PtCo)	Turbiedad (NTU)	N total (ppm)	P total (ppm)	D.O. (abs)
Agua cruda	0	0	166	29,70	0,70	1,53	0,069
Tratamiento coagulante	100	0	35	4,87	0	0,78	0,011
1	100	10	33	4,47	0,00	1,00	0,013
2	100	15	29	4,32	0,00	0,57	0,010
3	100	20	24	3,88	0,00	0,45	0,009
4	100	25	21	3,22	0,00	0,63	0,009

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Caracterización del agua tratada con coagulante $Al_2(SO_4)_3$ y floculante poliacrilamida, repetición No. 3, época lluviosa**

Fecha: 18/08/2020							
Jarra	Dosis coagulante (mg/L)	Dosis floculante (mg/L)	Color (PtCo)	Turbiedad (NTU)	N total (ppm)	P total (ppm)	D.O. (abs)
Agua cruda	0	0	154	29,00	0,60	1,62	0,068
Tratamiento coagulante	100	0	18	2,48	0	0,90	0,005
1	100	10	21	3,00	0,00	0,98	0,007
2	100	15	25	2,82	0,00	0,90	0,009
3	100	20	20	2,45	0,00	0,63	0,007
4	100	25	18	2,80	0,00	0,85	0,006

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. **Caracterización del agua tratada con coagulante $Al_2(SO_4)_3$ y floculante poliacrilamida, repetición No. 1, época seca**

Fecha: 20/01/2021							
Jarra	Dosis coagulante (mg/L)	Dosis floculante (mg/L)	Color (PtCo)	Turbiedad (NTU)	N total (ppm)	P total (ppm)	D.O. (abs)
Agua cruda	0	0	102	10,30	3,20	1,43	0,078
Tratamiento coagulante	100	0	20	1,77	1,00	0,74	0,012
1	100	10	13	1,98	1,10	0,78	0,009
2	100	15	11	1,86	1,80	0,63	0,007
3	100	20	17	1,91	1,20	0,55	0,011
4	100	25	10	1,66	0,80	0,60	0,007

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. **Caracterización del agua tratada con coagulante $Al_2(SO_4)_3$ y floculante poliacrilamida, repetición No. 2, época seca**

Fecha: 27/01/2021							
Jarra	Dosis coagulante (mg/L)	Dosis floculante (mg/L)	Color (PtCo)	Turbiedad (NTU)	N total (ppm)	P total (ppm)	D.O. (abs)
Agua cruda	0	0	211	38,70	1,90	1,94	0,140
Tratamiento coagulante	100	0	33	4,93	0,10	0,70	0,022
1	100	10	40	3,55	0,10	0,90	0,027
2	100	15	30	3,02	0,10	0,62	0,020
3	100	20	29	2,82	0,00	0,29	0,019
4	100	25	41	5,88	0,30	0,41	0,027

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. **Caracterización del agua tratada con coagulante $Al_2(SO_4)$ y floculante poliacrilamida, repetición No. 3, época seca**

Fecha: 03/02/2021							
Jarra	Dosis coagulante (mg/L)	Dosis floculante (mg/L)	Color (PtCo)	Turbiedad (NTU)	N total (ppm)	P total (ppm)	D.O. (abs)
Agua cruda	0	0	97	10,80	3,60	1,75	0,058
Tratamiento coagulante	100	0	21	2,10	0,70	0,80	0,014
1	100	10	20	2,71	1,00	1,02	0,013
2	100	15	17	2,14	0,80	0,89	0,012
3	100	20	16	1,96	0,50	0,42	0,010
4	100	25	25	2,31	0,60	0,51	0,013

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14. **Porcentajes de remoción para agua tratada con coagulante $Al_2(SO_4)_3$, repetición No. 1, época lluviosa**

Porcentajes de Remoción: 05/08/2020						
Jarra	Dosis coagulante (mg/L)	Color (%)	Turbiedad (%)	N total (%)	P total (%)	D.O. (%)
1	60	43,78	53,64	64,71	18,94	46,46
2	80	58,06	65,53	70,59	44,70	65,66
3	100	72,35	78,76	100	56,06	81,82
4	120	86,18	88,83	100	89,39	93,94

Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 2 y sección 3.7.7.

Apéndice 15. **Porcentajes de remoción para agua tratada con coagulante $Al_2(SO_4)_3$, repetición No. 2, época lluviosa**

Porcentajes de Remoción: 11/08/2020						
Jarra	Dosis coagulante (mg/L)	Color (%)	Turbiedad (%)	N total (%)	P total (%)	D.O. (%)
1	60	50,00	48,48	100	37,91	53,62
2	80	70,48	67,78	100	41,18	71,01
3	100	78,92	83,60	100	49,02	84,06
4	120	91,57	93,27	100	73,20	94,20

Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 3 y sección 3.7.7.

Apéndice 16. **Porcentajes de remoción para agua tratada con coagulante $Al_2(SO_4)_3$, repetición No. 3, época lluviosa**

Porcentajes de Remoción: 18/08/2020						
Jarra	Dosis coagulante (mg/L)	Color (%)	Turbiedad (%)	N total (%)	P total (%)	D.O. (%)
1	60	59,09	61,38	100	33,95	63,24
2	80	74,03	76,10	100	35,19	75,00
3	100	88,31	91,45	100	44,44	92,65
4	120	92,86	94,72	100	55,56	94,12

Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 4 y sección 3.7.7.

Apéndice 17. **Porcentajes de remoción para agua tratada con coagulante $Al_2(SO_4)_3$, repetición No. 1, época seca**

Porcentajes de Remoción: 20/01/2021						
Jarra	Dosis coagulante (mg/L)	Color (%)	Turbiedad (%)	N total (%)	P total (%)	D.O. (%)
1	60	69,61	67,57	50,00	20,28	73,08
2	80	79,41	71,46	50,00	31,47	82,05
3	100	80,39	82,82	68,75	48,25	84,62
4	120	67,65	80,78	56,25	39,16	71,79

Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 5 y sección 3.7.7.

Apéndice 18. **Porcentajes de remoción para agua tratada con coagulante $Al_2(SO_4)_3$, repetición No. 2, época seca**

Porcentajes de Remoción: 27/01/2021						
Jarra	Dosis coagulante (mg/L)	Color (%)	Turbiedad (%)	N total (%)	P total (%)	D.O. (%)
1	60	75,83	73,64	73,68	44,33	75,71
2	80	81,04	79,66	89,47	52,58	81,43
3	100	84,36	87,26	94,74	63,92	84,29
4	120	85,78	92,51	94,74	49,48	85,71

Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 6 y sección 3.7.7.

Apéndice 19. **Porcentajes de remoción para agua tratada con coagulante $Al_2(SO_4)_3$, repetición No. 3, época seca**

Porcentajes de Remoción: 03/02/2021						
Jarra	Dosis coagulante (mg/L)	Color (%)	Turbiedad (%)	N total (%)	P total (%)	D.O. (&)
1	60	70,10	72,13	55,56	18,86	67,24
2	80	75,26	79,72	61,11	36,57	72,41
3	100	78,35	80,56	80,56	54,29	75,86
4	120	77,32	79,91	69,44	52,57	74,14

Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 7 y sección 3.7.7.

Apéndice 20. **Porcentajes de remoción para agua tratada con coagulante $Al_2(SO_4)_3$ y floculante poliacrilamida, repetición No. 1, época lluviosa**

Porcentajes de Remoción: 05/08/2020							
Jarra	Dosis coagulante (mg/L)	Dosis floculante (mg/L)	Color (%)	Turbiedad (%)	N total (%)	P total (%)	D.O. (%)
Tratamiento coagulante	100	0	72,35	78,76	100	56,06	81,82
1	100	10	85,71	89,25	100	46,97	82,83
2	100	15	88,48	90,63	100	58,33	86,87
3	100	20	89,40	91,65	100	61,36	87,88
4	100	25	91,24	93,13	94,12	87,88	89,90

Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 8 y sección 3.7.7.

Apéndice 21. **Porcentajes de remoción para agua tratada con coagulante $Al_2(SO_4)_3$ y floculante poliacrilamida, repetición No. 2, época lluviosa**

Porcentajes de Remoción: 11/08/2020							
Jarra	Dosis coagulante (mg/L)	Dosis floculante (mg/L)	Color (%)	Turbiedad (%)	N total (%)	P total (%)	D.O. (%)
Tratamiento coagulante	100	0	78,92	83,60	100	49,02	84,06
1	100	10	80,12	84,95	100	34,64	81,16
2	100	15	82,53	85,45	100	62,75	85,51
3	100	20	85,54	86,94	100	70,59	86,96
4	100	25	87,35	89,16	100	58,82	86,96

Fuente: elaboración propia con base en apéndice 9 y sección 3.7.7.

Apéndice 22. **Porcentajes de remoción para agua tratada con coagulante $Al_2(SO_4)_3$ y floculante poliacrilamida, repetición No. 3, época lluviosa**

Porcentajes de Remoción: 18/08/2020							
Jarra	Dosis coagulante (mg/L)	Dosis floculante (mg/L)	Color (%)	Turbiedad (%)	N total (%)	P total (%)	D.O. (%)
Tratamiento coagulante	100	0	88,31	91,45	100	44,44	92,65
1	100	10	86,36	89,66	100	39,51	89,71
2	100	15	83,77	90,28	100	44,44	86,76
3	100	20	87,01	91,55	100	61,11	89,71
4	100	25	88,31	90,34	100	47,53	91,18

Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 10 y sección 3.7.7.

Apéndice 23. **Porcentajes de remoción para agua tratada con coagulante $Al_2(SO_4)_3$ y floculante poliacrilamida, repetición No. 1, época seca**

Porcentajes de Remoción: 20/01/2021							
Jarra	Dosis coagulante (mg/L)	Dosis floculante (mg/L)	Color (%)	Turbiedad (%)	N total (%)	P total (%)	D.O. (%)
Tratamiento coagulante	100	0	80,39	82,82	68,75	48,25	84,62
1	100	10	87,25	80,78	65,63	45,45	88,46
2	100	15	89,22	81,94	43,75	55,94	91,03
3	100	20	83,33	81,46	62,50	61,54	85,90
4	100	25	90,20	83,88	75,00	58,04	91,03

Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 11 y sección 3.7.7.

Apéndice 24. **Porcentajes de remoción para agua tratada con coagulante $Al_2(SO_4)_3$ y floculante poliacrilamida, repetición No. 2, época seca**

Porcentajes de Remoción: 27/01/2021							
Jarra	Dosis coagulante (mg/L)	Dosis floculante (mg/L)	Color (%)	Turbiedad (%)	N total (%)	P total (%)	D.O. (%)
Tratamiento coagulante	100	0	84,36	87,26	94,74	63,92	84,29
1	100	10	81,04	90,83	94,74	53,61	80,71
2	100	15	85,78	92,20	94,74	68,04	85,71
3	100	20	86,26	92,71	100	85,05	86,43
4	100	25	80,57	84,81	84,21	78,87	80,71

Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 12 y sección 3.7.7.

Apéndice 25. **Porcentajes de remoción para agua tratada con coagulante $Al_2(SO_4)_3$ y floculante poliacrilamida, repetición No. 3, época seca**

Porcentajes de Remoción: 03/02/2021							
Jarra	Dosis coagulante (mg/L)	Dosis floculante (mg/L)	Color (%)	Turbiedad (%)	N total (%)	P total (%)	D.O. (%)
Tratamiento coagulante	100	0	78,35	80,56	80,56	54,29	75,86
1	100	10	79,38	74,91	72,22	41,71	77,59
2	100	15	82,47	80,19	77,78	49,14	79,31
3	100	20	83,51	81,85	86,11	76,00	82,76
4	100	25	74,23	78,61	83,33	70,86	77,59

Fuente: elaboración propia con base en apéndice 13 y sección 3.7.7.

Apéndice 26. **Promedio de porcentajes de remoción para agua tratada con coagulante $Al_2(SO_4)_3$, época lluviosa**

Porcentajes de Remoción época lluviosa						
Jarra	Dosis coagulante (mg/L)	Color (%)	Turbiedad (%)	N total (%)	P total (%)	D.O. (%)
1	60	50,96	54,50	88,24	30,27	54,44
2	80	67,52	69,81	90,20	40,35	70,56
3	100	79,86	84,60	100	49,84	86,17
4	120	90,20	92,28	100	72,72	94,09

Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 14, 15, 16 y sección 3.10.1.

Apéndice 27. **Promedio de porcentajes de remoción para agua tratada con coagulante $Al_2(SO_4)_3$, época seca**

Porcentajes de Remoción época seca						
Jarra	Dosis coagulante (mg/L)	Color (%)	Turbiedad (%)	N total (%)	P total (%)	D.O. (%)
1	60	71,85	71,12	59,75	27,82	72,01
2	80	78,57	76,95	66,86	40,21	78,63
3	100	81,03	83,54	81,35	55,48	81,59
4	120	76,92	84,40	73,48	47,07	77,22

Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 17, 18, 19 y sección 3.10.1.

Apéndice 28. **Promedio de porcentajes de remoción para agua tratada con coagulante $Al_2(SO_4)_3$ y floculante poliacrilamida, época lluviosa**

Porcentajes de Remoción época lluviosa							
Jarra	Dosis coagulante (mg/L)	Dosis floculante (mg/L)	Color (%)	Turbiedad (%)	N total (%)	P total (%)	D.O. (%)
Tratamiento coagulante	100	0	79,86	84,60	100	49,84	86,17
1	100	10	84,07	87,95	100	40,37	84,56
2	100	15	84,93	88,79	100	55,17	86,38
3	100	20	87,32	90,05	100	64,35	88,18
4	100	25	88,97	90,88	98,04	64,74	89,34

Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 20, 21, 22 y sección 3.10.1.

Apéndice 29. **Promedio de porcentajes de remoción para agua tratada con coagulante $Al_2(SO_4)_3$ y floculante poliacrilamida, época lluviosa**

Porcentajes de Remoción época seca							
Jarra	Dosis coagulante (mg/L)	Dosis floculante (mg/L)	Color (%)	Turbiedad (%)	N total (%)	P total (%)	D.O. (%)
Tratamiento coagulante	100	0	81,03	83,54	81,35	55,48	81,59
1	100	10	82,56	82,17	77,53	46,93	82,25
2	100	15	85,82	84,77	72,09	57,71	85,35
3	100	20	84,36	85,34	82,87	74,20	85,03
4	100	25	81,66	82,43	80,85	69,26	83,11

Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 23, 24, 25 y sección 3.10.

Apéndice 30. **Análisis estadístico.**

Análisis de varianza de dos factores para remoción de color en función de la dosis de coagulante en época lluviosa y seca.

Origen de las variaciones	F	Probabilidad	A	Valor crítico para F	Gráfica
Época	3,70	0,07	0,05	4,49	
Dosis	14,60	0,00	0,05	3,24	
Interacción	8,00	0,00	0,05	3,24	

Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 14, 15 y 16 empleando Infostat.

Continuación apéndice 30.

Análisis de varianza de dos factores para remoción de turbiedad en función de la dosis de coagulante en época lluviosa y seca.

Origen de las variaciones	F	Probabilidad	α	Valor crítico para F	Gráfica
Época	3,03	0,10	0,05	4,35	
Dosis	28,94	0,00	0,05	2,87	
Interacción	6,17	0,01	0,05	2,87	

Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 14, 15 y 16 empleando Infostat.

Análisis de varianza de dos factores para remoción de nitrógeno total en función de la dosis de coagulante en época lluviosa y seca.

Origen de las variaciones	F	Probabilidad	α	Valor crítico para F	Gráfica
Época	15,48	0,00	0,05	4,35	
Dosis	1,52	0,25	0,05	2,87	
Interacción	0,12	0,95	0,05	2,87	

Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 14, 15 y 16 empleando Infostat.

Continuación apéndice 30.

Análisis de varianza de dos factores para remoción de fósforo total en función de la dosis de coagulante en época lluviosa y seca.

Origen de las variaciones	F	Probabilidad	A	Valor crítico para F	Gráfica
Época	1,74	0,21	0,05	4,35	
Dosis	10,10	0,00	0,05	2,87	
Interacción	2,58	0,09	0,05	2,87	

Fuente: elaboración propia con base en apéndice 14, 15 y 16 empleando Infostat.

Análisis de varianza de dos factores para remoción de densidad óptica total en función de la dosis de coagulante en época lluviosa y seca.

Origen de las variaciones	F	Probabilidad	A	Valor crítico para F	Gráfica
Época	0,21	0,65	0,05	4,35	
Dosis	20,04	0,00	0,05	2,87	
Interacción	10,65	0,00	0,05	2,87	

Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 14, 15 y 16 empleando Infostat.

Continuación apéndice 30.

Análisis de varianza de dos factores para remoción de color en función de la dosis de floculante en época lluviosa y seca.

Origen de las variaciones	F	Probabilidad	α	Valor crítico para F	Gráfica
Época	1,41	0,25	0,05	4,35	
Dosis	1,51	0,24	0,05	2,87	
Interacción	0,90	0,48	0,05	2,87	

Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 20, 21 y 22 empleando Infostat.

Análisis de varianza de dos factores para remoción de turbiedad en función de la dosis de floculante en época lluviosa y seca.

Origen de las variaciones	F	Probabilidad	α	Valor crítico para F	Gráfica
Época	7,26	0,01	0,05	4,35	
Dosis	0,53	0,71	0,05	2,87	
Interacción	0,45	0,77	0,05	2,87	

Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 20, 21 y 22 empleando Infostat.

Continuación apéndice 30.

Análisis de varianza de dos factores para remoción de nitrógeno total en función de la dosis de floculante en época lluviosa y seca.

Origen de las variaciones	F	Probabilidad	α	Valor crítico para F	Gráfica
Época	21,75	0,00	0,05	4,35	
Dosis	0,18	0,95	0,05	2,87	
Interacción	0,21	0,93	0,05	2,87	

Fuente: elaboración propia con base en apéndice 20, 21 y 22 empleando Infostat.

Análisis de varianza de dos factores para remoción de fósforo total en función de la dosis de floculante en época lluviosa y seca.

Origen de las variaciones	F	Probabilidad	α	Valor crítico para F	Gráfica
Época	2,38	0,14	0,05	4,35	
Dosis	6,24	0,00	0,05	2,87	
Interacción	0,10	0,98	0,05	2,87	

Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 20, 21 y 22 empleando Infostat.

Continuación apéndice 30.

Análisis de varianza de dos factores para remoción de densidad óptica total en función de la dosis de floculante en época lluviosa y seca.

Origen de las variaciones	F	Probabilidad	α	Valor crítico para F	Gráfica
Época	4,41	0,05	0,05	4,35	
Dosis	0,62	0,65	0,05	2,87	
Interacción	0,30	0,87	0,05	2,87	

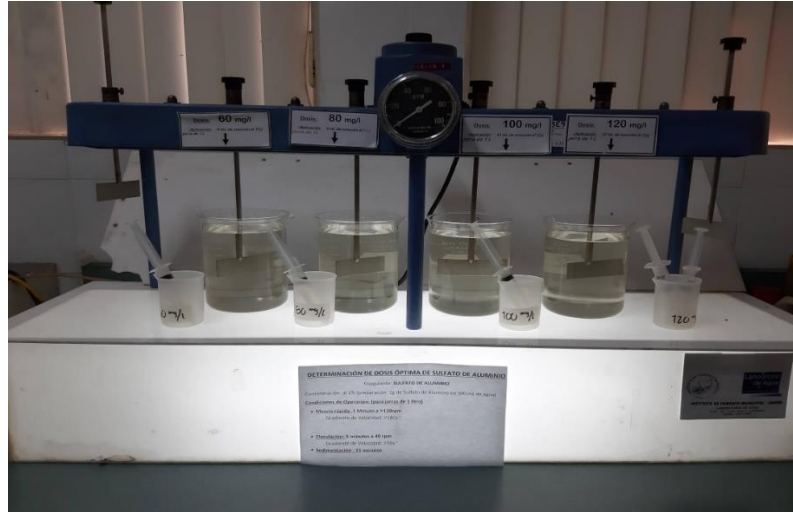
Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 20, 21 y 22 empleando Infostat.

Prueba de tukey para determinar la dosis óptima de poliacrilamida en función de los porcentajes de remoción de fósforo total.

Dosis (mg/L)	Medias	n	E.E.			Gráfica
10	0,44	6	0,04	A		
0	0,53	6	0,04	A	B	
15	0,56	6	0,04	A	B	
25	0,67	6	0,04		B	
20	0,69	6	0,04		B	

Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 20, 21 y 22 empleando Infostat.

Apéndice 31. Prueba de jarras para determinar dosis óptima del coagulante $Al_2(SO_4)_3$



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 32. Prueba de jarras para determinar dosis óptima del floculante poliacrilamida



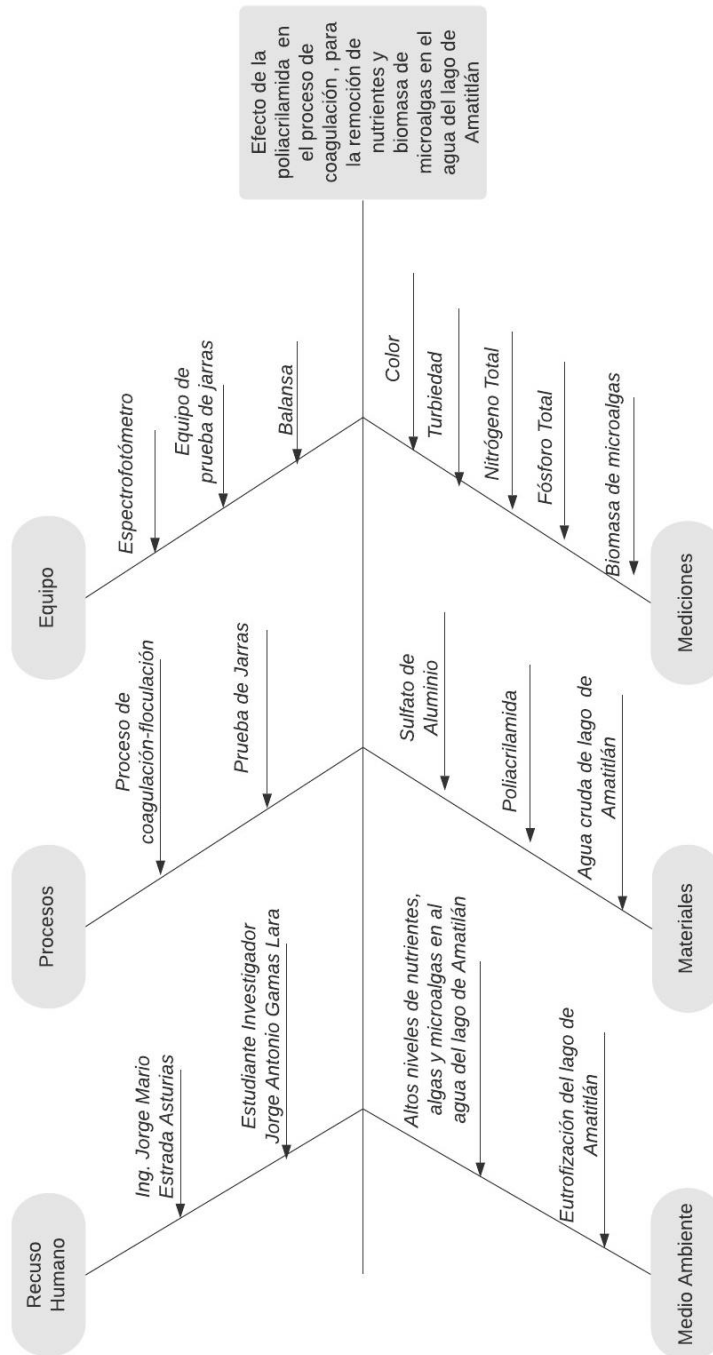
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 33. **Tabla de requisitos académicos**

Carrera	Área	Curso	Tema
Ingeniería química	Química	Química 3	Reacciones químicas
		Química 4	Rendimiento, porcentaje de remoción
		Química Ambiental	Contaminación, eutrofización, tratamiento de aguas residuales
		Control de contaminantes industriales	Residuos líquidos, proceso floculación - coagulación, prueba de jarras
	Fisicoquímica	Fisicoquímica 2	Química de superficies, absorbancia
		Laboratorio de fisicoquímica 1	Diseño experimental de una investigación
		Laboratorio de fisicoquímica 2	Medición de absorbancia (densidad óptica)
	Ciencias básicas y complementarias	Estadística 1	Estadística descriptiva
		Estadística 2	Análisis de varianza

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 34. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia, empleado Lucidchart.

Apéndice 35. Preparación del equipo de jarras



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 36. Recolección de muestras de agua en época lluviosa



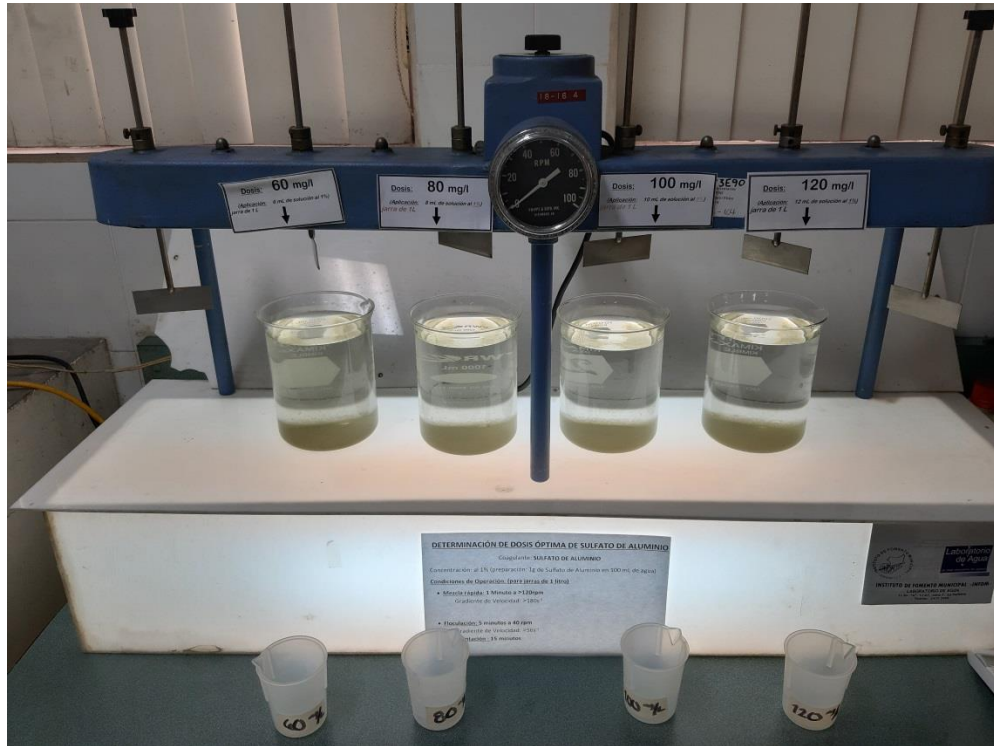
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 37. **Recolección de muestras de agua en época seca**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 38. Muestras de agua luego de la prueba de jarras



Fuente: elaboración propia.

