



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

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONTENIDO DE METALES RESIDUALES PROVENIENTES
DE SALES INORGÁNICAS UTILIZADAS COMO COAGULANTES EN EL TRATAMIENTO DE
AGUAS SERVIDAS A UN REACTOR BIOLÓGICO A NIVEL LABORATORIO**

Alysson Sussana Ramírez Solórzano
Asesorado por el Ing. Jorge Mario Estrada Asturias

Guatemala, octubre de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONTENIDO DE METALES RESIDUALES PROVENIENTES
DE SALES INORGÁNICAS UTILIZADAS COMO COAGULANTES EN EL TRATAMIENTO DE
AGUAS SERVIDAS A UN REACTOR BIOLÓGICO A NIVEL LABORATORIO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ALYSSON SUSSANA RAMÍREZ SOLÓRZANO
ASESORADO POR EL ING. JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

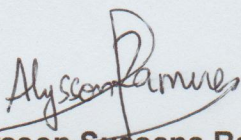
DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
EXAMINADOR	Ing. César Alfonso García Guerra
EXAMINADOR	Ing. Oscar Salvador Wong Davi
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

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:

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONTENIDO DE METALES RESIDUALES PROVENIENTES DE SALES INORGÁNICAS UTILIZADAS COMO COAGULANTES EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS A UN REACTOR BIOLÓGICO A NIVEL LABORATORIO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha de abril 2017.


Alysson Sussana Ramírez Solórzano



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Guatemala, agosto de 2017

Estimado Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
Director de la Escuela de Ingeniería Química
Presente

Por este medio hago constar que yo, Jorge Mario Estrada Asturias, colegiado activo No. 685, he revisado y aprobado el informe final de la estudiante de Ingeniería Química, Alysso Sussana Ramírez Solórzano, con carnet No. 2013-14243 y CUI No. 2509-17211-0101. El trabajo de graduación titulado: **“ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONTENIDO DE METALES RESIDUALES PROVENIENTES DE SALES INORGÁNICAS UTILIZADAS COMO COAGULANTES EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS A UN REACTOR BIOLÓGICO A NIVEL LABORATORIO”**

Con base a lo anterior, procedo a su consideración a efecto de continuar con el trámite respectivo para su aprobación, sin otro particular,

Jorge Mario Estrada Asturias

Ingeniero Químico

Colegiado 685

ASESOR



Jorge Mario Estrada Asturias
Ingeniero Químico Col. 685
Profesor Titular
Escuela de Ina. Química USAC



Guatemala, 06 de octubre de 2017.
Ref. EIQ.TG-IF.041.2017.

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **004-2016** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por la estudiante universitaria: **Alysson Sussana Ramírez Solórzano**.
Identificada con número de carné: **2013-14243**.
Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA**.

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:

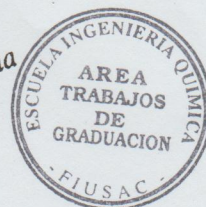
ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONTENIDO DE METALES RESIDUALES PROVENIENTES DE SALES INORGÁNICAS UTILIZADAS COMO COAGULANTES EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS A UN REACTOR BIOLÓGICO A NIVEL LABORATORIO

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Jorge Mario Estrada Asturias**.

Habiendo encontrado el referido informe final del 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"

César Alfonso Guerra
Ing. César Alfonso Guerra
COORDINADOR DE TERNA
INGENIERO QUIMICO No. 45.
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Ref.EIQ.TG.055.2017

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación de la estudiante, **ALYSSON SUSSANA RAMÍREZ SOLÓRZANO** titulado: **"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONTENIDO DE METALES RESIDUALES PROVENIENTES DE SALES INORGÁNICAS UTILIZADAS COMO COAGULANTES EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS A UN REACTOR BIOLÓGICO A NIVEL LABORATORIO"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"



Ing. Carlos Salvador Wong Davi
Director
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, octubre 2017

Cc: Archivo
CSWD/ale

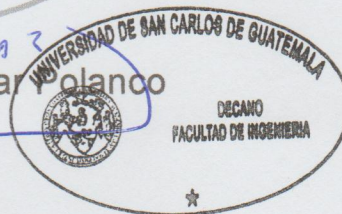




El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONTENIDO DE METALES RESIDUALES PROVENIENTES DE SALES INORGÁNICAS UTILIZADAS COMO COAGULANTES EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS A UN REACTOR BIOLÓGICO A NIVEL LABORATORIO**, presentado por la estudiante universitaria: **Alysson Sussana Ramírez Solórzano**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Pedro Antonio Aguilar Solórzano
Decano



Guatemala, octubre de 2017

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por darme la fortaleza y la sabiduría para salir adelante a pesar de todos los obstáculos durante este proceso, por darme la bendición y la oportunidad de, finalmente, realizarme como una profesional y cumplir mis sueños.

Mis padres

Lubia de Ramírez y Gabriel Ramírez por siempre darme su apoyo, por guiarme y por sus consejos, porque estuvieron conmigo en los momentos que más los necesité.

Mis hermanos

Andre y Gabriel Ramírez por siempre estar a mi lado, apoyándome siempre que los necesité y por sus ánimos en todo momento.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por permitirme ingresar a la máxima casa de estudios en Guatemala.
Facultad de Ingeniería	Por compartir todos los conocimientos con los que cuento y ayudarme a ser una gran profesional preparada para un futuro
Dios	Por darme la oportunidad de realizar mis sueños, la bendición de poder culminar mi carrera y guiar mis pasos hasta aquí.
Mis papás	Por nunca dejarme sola, por apoyarme en mis estudios y en mis desveladas, por darme ánimos cuando más los necesité y no dejarme vencer, por enseñarme a luchar por lo que quiero y ver el fruto de mis esfuerzos.
Mis hermanos	Por su apoyo incondicional en la carrera, por estar conmigo en mis desvelos y preocuparse por mí.
Asesor	Jorge Mario Estrada, por su ayuda y apoyo en la realización de mi informe final. Por su acompañamiento desinteresado.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTADO DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
HIPÓTESIS.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
1. ANTECEDENTES.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Clasificación de las aguas residuales.....	3
2.2. Tratamiento de residuos líquidos industriales.....	3
2.3. Tratamientos primarios.....	4
2.3.1. Cribado.....	4
2.3.2. Sedimentación.....	4
2.3.3. Coagulación-floculación.....	5
2.3.4. Neutralización.....	5
2.3.5. Homogeneización.....	6
2.4. Tratamientos secundarios.....	6
2.4.1. Lechos bacterianos.....	7
2.4.2. Fangos activos.....	7
2.4.3. Reactores biológicos secuenciales (SBR).....	8
2.4.4. Digestión anaerobia.....	8

2.4.5.	Reactor biológico de membrana (MBR)	9
2.5.	Tratamiento terciario	9
2.5.1.	Ósmosis inversa.....	9
2.5.2.	Destilación.....	10
2.5.3.	Adsorción	10
2.5.4.	Extracción por solvente	10
2.5.5.	Intercambio iónico	11
2.5.6.	Oxidación química.....	11
2.5.7.	Nitrificación.....	11
2.6.	Coagulación y floculación.....	12
2.7.	Coagulantes inorgánicos.....	14
2.7.1.	Sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3$).....	15
2.7.2.	Cloruro Férrico ($FeCl_3$)	16
2.7.3.	Prueba de jarras.....	16
2.8.	Eliminación de fosfatos	17
2.8.1.	Método de la absorciometría del ácido ascórbico ...	19
2.9.	Hierro	20
2.10.	Aluminio	20
2.10.1.	Método ICP-OES.....	21
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	23
3.1.	Variables	23
3.2.	Delimitación de campo de estudio	25
3.3.	Recursos humanos disponibles	26
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	26
3.4.1.	Equipo y cristalería	26
3.4.2.	Reactivos.....	27
3.5.	Técnicas cuantitativas	27

3.5.1.	Procedimiento para la recolección y análisis de resultados	28
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	29
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	29
3.7.1.	Determinación de coagulante para la prueba de jarras.....	29
3.7.2.	Determinación de muestra para el cálculo de fósforo total	29
3.8.	Análisis estadístico	30
3.8.1.	Número de repeticiones.....	30
3.8.2.	Análisis de varianza para el fósforo y porcentaje de metal residual total con cloruro férrico y sulfato de aluminio	31
3.8.3.	Desviación estándar para el fósforo total y porcentaje de metal residual con cloruro férrico y sulfato de aluminio.....	32
4.	RESULTADOS	35
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	39
	CONCLUSIONES	43
	RECOMENDACIONES.....	45
	BIBLIOGRAFÍA.....	47
	APÉNDICES	51
	ANEXOS	61

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Desestabilización del coloide y compresion de la capa difusa.....	13
2.	Fuerzas de repulsion y atracción de Van de Waals	14
3.	Prueba de jarras.....	17
4.	Procedimiento de toma de muestras y análisis de resultados	28
5.	Contenido de fósforo total en función de dosificaciones de cloruro férrico (FeCl ₃).....	35
6.	Contenido de fósforo total en función de dosificaciones de sulfato de aluminio (Al ₂ (SO ₄) ₃).....	36

TABLAS

I.	Definición de las variables a utilizar	23
II.	Variables a manipular.....	24
III.	Variables de respuesta.....	25
IV.	Desviación estándar y varianza del contenido de fósforo total con sulfato de aluminio.....	33
V.	Desviación estándar y varianza del contenido de fósforo total con cloruro férrico.....	34
VI.	Aluminio residual en dosis óptimas encontradas	36
VII.	Hierro residual en dosis óptimas encontradas	37
VIII.	Porcentaje de aluminio residual en dosis óptimas encontradas.....	37
IX.	Porcentaje de hierro residual en dosis óptimas encontradas	37

LISTADO DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
x_i	Cada uno de los datos
σ	Desviación estándar (mg/l)
\bar{x}	Media aritmética
ppm	Partes por millón
ICP-OES	Plasma de acoplamiento inductivo (ICP) Espectrofotómetro de emisión óptico (OES).
U Pt-Co	Unidades Platino Cobalto
σ^2	Varianza

GLOSARIO

Aerobio	Los organismos o procesos que necesitan del oxígeno diatómico para vivir o a los procesos que lo necesitan para poder desarrollarse.
Aguas residuales o servidas	Agua procedente de descargas residuales de uso doméstico o de procesos industriales, los cuales por razones de salud pública y por consideraciones de recreación económica y estética, no pueden desecharse vertiéndolas sin tratamiento en lagos o corrientes convencionales.
Ambiente	Comprende los sistemas atmosféricos, hídrico, lítico, edáfico, biótico, elementos audiovisuales y recursos naturales y culturales.
Anaerobio	Los organismos o procesos que no necesitan oxígeno (O ₂) para desarrollarse.
Clarificación	<p>Eliminación los agentes contaminantes de aguas entrantes o salientes.</p> <p>Mientras que en el caso de las aguas entrantes el objetivo de este método es obtener agua potable o de uso industrial, en el de las aguas salientes se realiza para garantizar el cumplimiento de las normas de descarga y reutilización.</p>

Cloruro férrico	Sal haloidea utilizada a escala industrial perteneciente al grupo de los haluros metálicos, cuya fórmula es FeCl_3 . El cloruro férrico en solución al 40 %, es un coagulante para tratamiento de aguas y efluentes.
Coagulante	Sustancia que favorece la separación de una fase insoluble en agua por medio de sedimentación. El coagulante es un compuesto químico que desestabiliza la materia suspendida en forma coloidal, a través de la alteración de la capa iónica cargada eléctricamente que rodea a las partículas coloidales.
Coloide	Sistema fisicoquímico formado por dos o más fases, principalmente estas son: una continua y otra dispersa.
Compuestos inorgánicos	Compuestos que están formados por distintos elementos, pero en los que su componente principal no siempre es el carbono, siendo el agua el más abundante.
Compuestos orgánicos	Sustancias químicas que contienen carbono, formando enlaces carbono – carbono o carbono – hidrogeno. En muchos casos contienen oxígeno, nitrógeno, azufre, fósforo, boro, halógenos y otros elementos.

Concentración	Proporción o relación que hay entre la cantidad de soluto y la cantidad de disolvente, donde el soluto es la sustancia que se disuelve, el disolvente la sustancia que disuelve al soluto.
Dosificar	Graduar la cantidad o dividir la cantidad de una sustancia.
Efluente	La salida o flujos salientes de cualquier sistema que despacha flujos de agua, a un tanque de oxidación, a un tanque para un proceso de depuración biológica del agua, etc.
Equipo de Jarras	Equipo floculador, provisto de cuatro, cinco ó seis puntos de agitación, que permite agitar simultáneamente, a una velocidad determinada, el líquido contenido en una serie de vasos.
Homogenización	Término que connota un proceso por el que se hace que una mezcla presente las mismas propiedades en toda la sustancia.
Impacto ambiental	Cualquier alteración positivo o negativo, de uno o más de los componentes del ambiente, provocados por acción del hombre o fenómenos naturales en un área de influencia definida.
Precipitado	Sólido que se produce en una disolución por efecto de una reacción química o bioquímica.

pH	Medida de la acidez o alcalinidad de una solución. El pH indica la concentración de iones hidronio [H ₃ O ⁺] presentes en determinadas sustancias.
Reactivo	Sustancia que interactúa con otra en una reacción química que da lugar a otras sustancias de propiedades, características y conformación distinta, denominadas productos de reacción o simplemente productos.
Reactor biológico	Se encarga de favorecer el crecimiento de bacterias y otros organismos propios del agua (bacterias) que se alimenta de la materia orgánica, pueden ser aerobios o anaerobios.
Sedimentación	Es la acumulación por deposición de todos aquellos materiales alterados y transportados previamente.
Sulfato de aluminio	Sal de fórmula Al ₂ (SO ₄) ₃ , es sólido y blanco. Es ampliamente usada en la industria, comúnmente como floculante en la purificación de agua potable y en la industria del papel.
Tratamiento de aguas residuales	Consiste en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como fin eliminar los contaminantes físicos, químicos y biológicos presentes en el agua efluente del uso humano.

RESUMEN

En el estudio realizado se procedió a evaluar los metales residuales provenientes de utilizar sales inorgánicas como coagulantes para el tratamiento de aguas servidas a la salida de un reactor biológico.

Inicialmente, se realizó un análisis de color y fósforo total con distintas dosificaciones de cloruro férrico (Fe_3Cl) y sulfato de aluminio ($\text{Al}_3(\text{SO}_4)_2$) por medio de una prueba de jarras, se realizaron seis dosificaciones distintas y tres repeticiones para obtener un error del 25 %. En tres distintas dosificaciones se evaluó el hierro y aluminio residual en cada muestra, respectivamente.

La determinación del fósforo total en las muestras tratadas con distintas dosis de coagulantes se realizó por medio del método de la absorciometría del ácido ascórbico. La determinación de hierro y aluminio residual fue evaluada por el método de ICP-OES.

De los resultados obtenidos, la dosificación óptima utilizando el coagulante sulfato de aluminio es de 200 mg/l y utilizando cloruro férrico, de 240 mg/l. En la evaluación de metal residual, la mayor remoción se da en la dosificación utilizando sulfato de aluminio de 200 mg/l, el porcentaje de remoción de 5,06 % y utilizando cloruro férrico 6,23 % en la dosis de 140 mg/l.

OBJETIVOS

General

Comparar, a nivel de laboratorio, los metales residuales provenientes de utilizar sales inorgánicas como coagulantes para el tratamiento de aguas servidas de un reactor biológico.

Específicos

1. Determinar la dosis óptima de cloruro férrico (FeCl_3), para la remoción de fósforo total en el agua servida proveniente del reactor biológico.
2. Determinar la dosis optima de sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), para la remoción de fósforo total en el agua servida proveniente del reactor biológico.
3. Cuantificar el aluminio y el hierro residual de las aguas tratadas con los coagulantes inorgánicos correspondientes a las distintas dosis de coagulante.
4. Encontrar porcentaje de remoción del metal correspondiente para cada coagulante a distintas dosis calculadas.

HIPÓTESIS

Hipótesis de trabajo

Al tratar el agua proveniente de un reactor biológico con coagulantes inorgánicos metálicos se presenta la residualidad crítica del catión metálico correspondiente.

Hipótesis alternativa (H₁)

El agua del reactor biológico tratada con sulfato de aluminio presenta menor residualidad crítica del catión metálico correspondiente que cuando se trata con cloruro férrico.

$$\mu_{Al_2(SO_4)_3} \leq \mu_{FeCl_3}$$

Hipótesis nula (H₀)

El agua del reactor biológico tratada con sulfato de aluminio no presenta menor residualidad crítica del catión metálico correspondiente que cuando se trata con cloruro férrico.

$$\mu_{Al_2(SO_4)_3} > \mu_{FeCl_3}$$

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la disposición adecuada de los efluentes líquidos industriales es una parte fundamental en el control ambiental. Existen diversas maneras de tratar esta problemática, se tienen opciones tecnológicas para atacar el problema de las aguas residuales. Estas, pueden involucrar tratamientos físicos, químicos o biológicos del efluente.

El tratamiento de aguas residuales es una operación clave en la industria de procesos. Sea para cumplir con normas ambientales o para evitar impactos negativos en los cuerpos de agua cercanos, es conveniente que se conozca los fundamentos del tratamiento de aguas residuales, y las tecnologías para alcanzar las metas de tratamiento requeridas.

La legislación establece límites de seguridad o bien, límites máximos permisibles, y normas para el tratamiento de efluentes dirigidos a cuerpos de agua. Dichas normativas suelen aplicarse a los establecimientos industriales, comerciales y otros.

Una de las tecnologías para tratar el problema de la contaminación en las aguas residuales es el tratamiento de coagulación-floculación. Es un método que consiste en la desestabilización de cargas existentes en los sólidos disueltos para luego formar flóculos y sedimentar. Existen diversos tipos de coagulantes y floculantes para la aplicación de este método. En este proyecto se evaluarán coagulantes inorgánicos de sales metálicas.

El análisis comparativo que se realizará consiste, principalmente, en determinar el porcentaje de metal residual que queda disuelto al utilizar dos tipos de coagulantes: sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) y cloruro férrico (FeCl_3) en la remoción de fosfatos en aguas proveniente de un reactor biológico.

La mayor parte de los estudios realizados consisten en una comparación entre los coagulantes utilizados para el tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, estudios sobre los metales residuales que dichos coagulantes inorgánicos dejan después de cumplir su función, no se encuentra evidencia, siendo este el propósito de la presente investigación.

1. ANTECEDENTES

El uso de coagulantes inorgánicos metálicos ha sido ampliamente difundido en la industria para la clarificación de agua tanto para uso industrial como para aguas residuales para eliminar la mayor cantidad posible de sólidos suspendidos.

Ese uso extendido ha dado lugar a numerosas investigaciones para determinar la eficiencia de diferentes coagulantes, por ejemplo, Mejía Guillén, J. (1986), realizó su tesis titulada *La utilización de la semilla de la Moringa Oleifera como coagulante natural* pero lo que la hace diferente es el análisis del coagulante como producto natural sin contenido de metales residuales.

Asimismo, González Serrano, L. (2011), realizó su tesis *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* donde se evaluó la efectividad para disminuir la demanda química de oxígeno (DQO), no obstante, no se evaluaron efectos secundarios de los metales remanentes en el agua tratada.

De la misma forma, Ríos Rodríguez, J. (2011), realizó su trabajo de graduación titulado *Caracterización de las aguas residuales de una industria farmacéutica y propuesta de un proceso para la reducción y el control de contaminantes presentes* donde se realizó el análisis de diversos contaminantes presentes en el agua, sin embargo, no evidencia estudio sobre los contaminantes de cationes metálicos en el uso de coagulantes inorgánicos.

En el año 2008, Benítez Pacheco, I. realizó su tesis titulada *Evaluación de la distribución de metales pesados en las plantas acuáticas Jacinto de agua (Eichhornia Crassipes) y tul (Thypa Spp) utilizados en la planta de tratamiento de aguas residuales La Cerra, Villa Canales por medio de fluorescencia de rayos X* donde se evaluó los metales pesados contenidos en la planta de tratamiento, a pesar de eso, no se evaluaron los metales que quedan en remanencia en el uso de coagulantes.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Clasificación de las aguas residuales

Existen cuatro fuentes fundamentales de aguas residuales, entre ellas están:

- Aguas domésticas o urbanas
- Aguas residuales industriales
- Escorrentías de usos agrícolas
- Pluviales.

El objetivo principal de este trabajo es el estudio del tratamiento de aguas residuales domésticas.

2.2. Tratamiento de residuos líquidos industriales

La selección de los procesos de tratamiento de aguas residuales o la serie de proceso de tratamiento dependen de factores, entre los que incluyen:

- Características del agua residual: DBO, materia en suspensión, pH, productos tóxicos.
- Calidad del efluente.
- Disponibilidad del área de trabajo.

Los pretratamientos de aguas residuales implican la reducción de sólidos en suspensión o el acondicionamiento de las aguas residuales para su descarga en los cuerpos receptores o bien, para pasar a un tratamiento secundario.

2.3. Tratamientos primarios

Los tipos de tratamientos primarios son: el cribado, sedimentación, floculación, neutralización y homogeneización,

2.3.1. Cribado

Se emplea para la reducción de sólidos flotantes de distintos tamaños. Por medio de rejillas que dependen del objeto que se quiere eliminar. Los productos recogidos se destruyen por medio de la incineración, o se tratan por procesos de digestión anaerobia. Las materias sólidas recogidas se suelen clasificar en finos y gruesos.

2.3.2. Sedimentación

Se utiliza en los tratamientos para separar sólidos en suspensión de las aguas residuales. La sedimentación se basa en la diferencia de peso específico entre las partículas sólidas y el líquido donde se encuentran; puede producirse en una o varias etapas o en varios puntos del proceso de tratamiento. Pueden considerarse tres tipos de mecanismos o procesos de sedimentación, dependiendo de la naturaleza de los sólidos presentes en suspensión (sedimentación discreta, con floculación y por zonas).

2.3.3. Coagulación-floculación

Dichos procesos facilitan el retiro de los sólidos suspendidos y de las partículas coloidales. Esta se usa en la etapa final de la separación de los sólidos-líquidos: deposición, flotación o filtración. Coagulación es la desestabilización de las partículas coloidales causadas por la adición de un reactivo químico llamado coagulante.

La floculación es la aglomeración de partículas desestabilizadas en microfloculos y después en los floculos más grandes que pueden ser depositados llamados floculo. La adición de otro reactivo llamado floculante o una ayuda del floculante pueden promover la formación del floculo.

Los factores, que pueden promover la coagulación-floculación son el gradiente de la velocidad, el tiempo, y el pH. El tiempo y el gradiente de velocidad son importantes al aumentar la probabilidad de que las partículas se unan. Por otra parte, el pH es un factor prominente en el retiro de coloides.

2.3.4. Neutralización

Las aguas residuales deben neutralizarse para ajustar su valor de pH. Solo mediante este proceso podrán cumplir los requisitos de las distintas unidades de proceso que conforman los sistemas de tratamiento de aguas residuales. La neutralización puede utilizarse para el tratamiento de las aguas residuales ácidas que contienen metales. La incorporación de un reactivo alcalino aumenta el pH de los residuos ácidos. Esto forma un precipitado que recoge los metales no deseados. El resultado es una solución inicial cuyo pH se ha ajustado dentro de un rango óptimo para precipitar los metales como hidróxidos.

2.3.5. Homogeneización

Es muy importante, tanto para un buen tratamiento, como para evitar las puntas de carga y contener los precios del canon de saneamiento, una buena homogeneización. La homogeneización en aguas de curtidos actúa además como un proceso fisicoquímico clásico. Las aguas del proceso de pelambre, ricas en cal, actúan de coagulante, por lo que si después se decantan el rendimiento es superior a una decantación primaria simple.

2.4. Tratamientos secundarios

El tratamiento secundario de depuración constituye importantes procesos biológicos de tratamiento de las aguas residuales que tienen en común la utilización de microorganismos (entre las que destacan las bacterias) para llevar a cabo la eliminación de materia orgánica biodegradable, tanto coloidal como disuelta, así como la eliminación de compuestos que contienen elementos nutrientes (Nitrógeno y Fósforo).

En la mayor parte de los casos, la materia orgánica constituye la fuente de energía y de carbono que necesitan los microorganismos para su crecimiento. Además, también es necesaria la presencia de nutrientes, que contengan los elementos esenciales para el crecimiento, especialmente los compuestos que contengan nitrógeno y fósforo y, por último, en el caso de sistema aerobio, la presencia de oxígeno disuelto en el agua. Este último aspecto será clave a la hora de elegir el proceso biológico más conveniente.

Los procesos aerobios se basan en la eliminación de los contaminantes orgánicos por su transformación en biomasa bacteriana, CO₂ y H₂O.

Los procesos anaerobios transforman la sustancia orgánica en biogás, mezcla de metano y CO₂.

2.4.1. Lechos bacterianos

También se denominan filtros biológicos o filtros percoladores. Se basan en los procesos biológicos aerobios. Consisten en poner el agua residual en contacto con un material inerte o soporte donde se adhieren los microorganismos.

Suelen ser lechos fijos de gran diámetro, rellenos con rocas o piezas de plástico o cerámica con formas especiales para desarrollar una gran superficie sobre el que se rocía el agua a tratar.

Sobre la superficie crece una fina capa de biomasa sobre la que se dispersa el agua residual que se tratará, que moja en su descenso la superficie. Al mismo tiempo, ha de quedar espacio suficiente para que circule aire, que asciende de forma natural. El crecimiento de la biomasa provoca que parte de los microorganismos se desprendan de la superficie y, por lo tanto, seguirá siendo necesaria una sedimentación posterior para su separación del efluente.

2.4.2. Fangos activos

Es un proceso aerobio de biomasa suspendida, que requiere un contacto íntimo entre el agua residual, la biomasa activa y el oxígeno.

Consiste en poner en contacto en un medio aerobio, normalmente en una balsa aireada o en un tanque de aireación, el agua residual con flóculos biológicos previamente formados, en los que la materia orgánica se adsorbe y las bacterias presentes (se mantiene una determinada concentración de microorganismos aerobios) la degradan. Para acelerar los procesos naturales se les suministra oxígeno disuelto, aumentando así la capacidad de tratamiento además de obtener una mejor calidad del efluente y menor cantidad de fangos.

2.4.3. Reactores biológicos secuenciales (SBR)

Son reactores discontinuos en los que el agua residual se mezcla con un lodo biológico en un medio aireado. Los procesos unitarios que intervienen son idénticos a los de un proceso convencional de fangos activados. En ambos sistemas intervienen la aireación y la sedimentación. No obstante, existe entre ambos una importante diferencia. En las plantas convencionales, los procesos se llevan a cabo simultáneamente en tanques separados, mientras que, en los SBR, los procesos tienen lugar secuencialmente en el mismo tanque. El empleo de un único tanque reduce sustancialmente el espacio y la inversión necesarios.

2.4.4. Digestión anaerobia

Es un proceso anaerobio de biomasa suspendida. Se utiliza especialmente cuando las aguas residuales tienen una gran carga contaminante. Consiste en la descomposición de la materia orgánica que genera como producto final un gas de alto contenido energético llamado biogás, formado fundamentalmente por metano (60-80%), dióxido de carbono (40-20%) y trazas de otros elementos como sulfuro de hidrógeno. Este biogás es susceptible de ser utilizado como combustible para la generación de energía térmica y/o eléctrica.

2.4.5. Reactor biológico de membrana (MBR)

Se compone de dos partes integradas en una sola: por un lado, el reactor biológico responsable de la depuración biológica y por otro, la separación física de la biomasa y el agua mediante un sistema de filtración directa con membranas. El sistema tiene una mayor capacidad para eliminar DQO coloidal, ya que al no atravesar la membrana tiene un tiempo de contacto mucho mayor con la biomasa.

Además, en los sistemas MBR se deriva de las elevadas concentraciones de biomasa con las que se trabaja en el reactor biológico gracias a la presencia de una barrera física (membrana) que no deja escapar las bacterias. Esto permite un control perfecto sobre la edad del fango y los parámetros principales de operación del sistema.

2.5. Tratamiento terciario

El tratamiento terciario se emplea para separar la materia residual de los efluentes de procesos de tratamiento biológico para prevenir la contaminación de los cuerpos de agua receptores, o bien, obtener la calidad adecuada para el reuso, factor de importancia en la planeación de recursos hidráulicos donde el abastecimiento de agua potable es limitado.

2.5.1. Ósmosis inversa

Es una tecnología de membrana en la cual el solvente (agua) es transferido a través de una membrana densa diseñada para retener sales y solutos de bajo peso molecular. Elimina prácticamente todas las sales y los solutos de bajo peso molecular. Se considera una eliminación prácticamente total de las sales disueltas y total de los sólidos en suspensión.

2.5.2. Destilación

Es la colección de vapor de agua, después de hervir las aguas residuales. Con un retiro correctamente diseñado del sistema de contaminantes orgánicos e inorgánicos y de impurezas biológicas puede ser obtenido, porque la mayoría de los contaminantes no se vaporizan. El agua pasará al condensador y los contaminantes permanecerán en la unidad de evaporación.

2.5.3. Adsorción

Es la colección de vapor de agua después de hervir las aguas residuales. Con un retiro correctamente diseñado del sistema de contaminantes orgánicos e inorgánicos y de impurezas biológicas puede ser obtenido, porque la mayoría de los contaminantes no se vaporizan. El agua pasará al condensador y los contaminantes permanecerán en la unidad de evaporación.

2.5.4. Extracción por solvente

Es una técnica de separación que involucra transferencia de masa entre dos fases inmiscibles. El metal es transferido de una fase acuosa a una fase orgánica o viceversa. Este tipo de técnicas se aplica ampliamente en procesos metalúrgicos de cobre, debido a su bajo costo y reducido impacto ambiental. Básicamente, el proceso de extracción por solventes se usa para purificar y concentrar metales. Solo se requiere que el metal específico sea transferido selectivamente desde una fase acuosa a una orgánica.

2.5.5. Intercambio iónico

Es un proceso donde un ion es sustituido o intercambiado por otro de la misma carga. Este proceso se utiliza tanto para la extracción de disolventes sólidos en el agua como para tratar la dureza de la misma, al reemplazar el calcio y el magnesio contenidos en el agua por otro ion, usualmente sodio.

2.5.6. Oxidación química

Las moléculas orgánicas complejas con estructuras con detergente - fenólicos pueden ser oxidadas dentro de un simple compartimiento con oxidantes como ozono y cloro. La ventaja de este proceso incluye la eliminación de compuestos de amonio y la oxidación de sustancias inorgánicas (hierro y manganeso). Existe la desventaja de que el cloro puede formar alomorfos con algunos compuestos orgánicos.

2.5.7. Nitrificación

Son procesos llevados a cabo por determinados grupos de microorganismos bacterianos que se utilizan en plantas de tratamiento de aguas residuales, donde aparte de la eliminación de la materia orgánica se persigue la eliminación de nitrógeno. La eliminación de la materia nitrogenada es necesaria cuando el efluente de la planta de tratamiento irá a embalses o masas de agua utilizadas para captación de aguas potables, o a las denominadas por ley como zonas sensibles

2.6. Coagulación y floculación

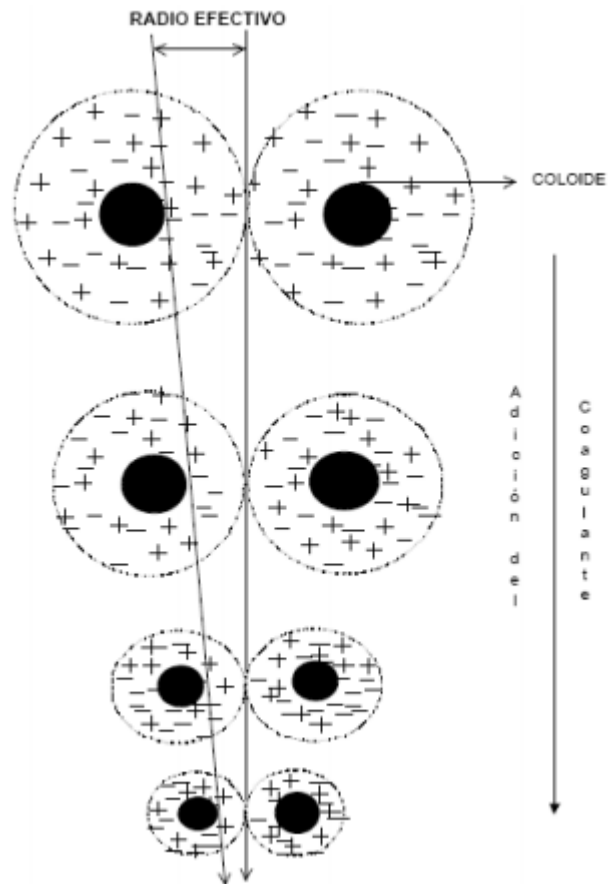
El color y la turbidez son características indeseables en las aguas residuales. Ambas son causadas mayormente por partículas coloidales. Los sólidos en suspensión son de tamaño de una micra; y las de una milésima de micra entran en el dominio de sólidos en solución. Las partículas de este tamaño dificultan la sedimentación de sólidos y contribuyen en su contaminación.

Las partículas coloidales presentan cargas superficiales electroestáticas, que forman fuerzas de repulsión entre ellas. Esto impide la aglomeración y su sedimentación. Por lo general, dichas cargas, son negativas, aunque los hidróxidos precipitados con cal, en su mayoría son positivas.

La coagulación consiste en la neutralización de las cargas superficiales mediante adición de electrolitos. Es la desestabilización de un coloide producida por la eliminación de las dobles capas eléctricas que rodean a todas las partículas coloidales, con la formación de núcleos microscópicos. La precipitación de un coloide se provoca mediante la adición de un electrolito de carga opuesta a la de las partículas coloidales. Además, el efecto aumenta notoriamente con el número de cargas que lleva el electrolito.

En la Figura 1, se muestra cómo los coagulantes cancelan las cargas eléctricas sobre la superficie de un coloide permitiendo la aglomeración y la formación de flóculos. Los flóculos inicialmente son pequeños, luego se juntan y forman aglomerados de mayor tamaño capaces de sedimentar.

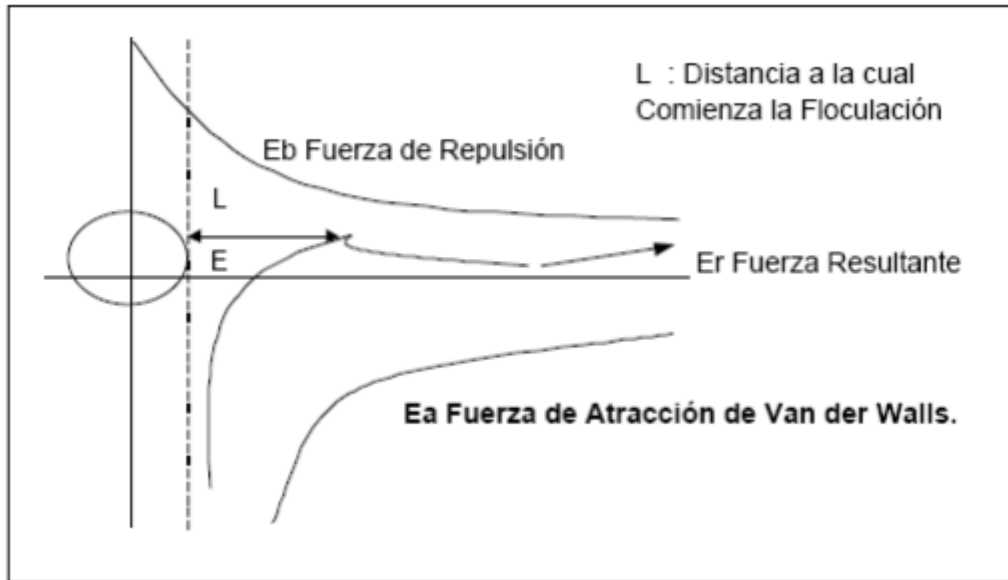
Figura 1. **Desestabilización del coloide y compresión de la capa difusa**



Fuente: JIMENEZ CISNEROS, Blanca Jimena. *La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada*. p 56.

Cuando se aproximan dos partículas semejantes, sus capas difusas interactúan y generan una fuerza de repulsión. Dicho potencial de repulsión está en función a la distancia que hay entre ellos, cayendo velozmente con el incremento de iones de carga opuesta al de las partículas.

Figura 2. **Fuerzas de repulsión y atracción de Van de Waals**



Fuente: JIMENEZ CISNEROS, Blanca Jimena. *La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada*. p 56.

Existe un potencial de atracción entre las partículas, llamadas fuerzas de Van der Waals. Estas fuerzas dependen de los átomos que constituyen las partículas y la densidad de las partículas. Si la distancia que separa a las partículas es superior a "L" las partículas no se atraen.

2.7. **Coagulantes inorgánicos**

Los iones metálicos, sales de hierro y aluminio, históricamente, han sido los coagulantes más utilizados en la clarificación de aguas y en la eliminación de DBO y fosfatos de aguas residuales.

Tienen las ventajas de actuar como coagulantes y floculantes al mismo tiempo. Estas sales metálicas forman especies hidratadas complejas cargadas positivamente como:

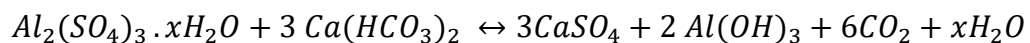


Los coagulantes inorgánicos tienen la desventaja de ser sensibles al cambio de pH, ya que, si no está dentro del rango adecuado de pH, la clarificación es menor y pueden llegar a solubilizar Hierro y Aluminio, generando problemas de contaminación. Los coagulantes inorgánicos de sales metálicas a analizar son:

2.7.1. Sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3$)

El sulfato de aluminio reacciona con el agua en medio débilmente ácido, neutro o débilmente alcalino, produciendo hidróxido de aluminio insoluble. Es un flóculo gelatinoso que sedimenta lentamente y arrastra consigo a las partículas en suspensión. El hidróxido de aluminio recién precipitado tiene la importante propiedad de adsorber fuertemente ciertos colorantes orgánicos formando lo que denominan lacas.

Suponiendo que la alcalinidad de disolución sea por medio del bicarbonato cálcico o magnésico, la reacción que se produce es la siguiente:



(x tiene valores de deshidratación comprendidos entre 13 y 18)

El hidróxido de aluminio se disuelve en medios ácidos, originando fundamentalmente el catión aluminio (Al^{+3}); también se disuelve en medios básicos dando el anión aluminato (AlO_2^-). La mínima solubilidad de ese hidróxido se presenta para valores de pH comprendidos entre 6,5 y 7,5.

2.7.2. Cloruro Férrico ($FeCl_3$)

Las sales férricas utilizadas son los cloruros y los sulfatos. Desde valores próximos a 2 hasta los de fuerte alcalinidad, el ion férrico precipita como hidróxido férrico insoluble. El ion férrico es incoloro, sin embargo, las soluciones de Fe^{+3} presentan, la mayoría de veces, un color amarillo debido a las especies básicas. El color puede cambiar dada la facilidad con la que el catión forma complejos con numerosos aniones y con grupos orgánicos diversos. El ion cloruro y el cianuro intensifican el color amarillo; el fluoruro, ortofosfato y el pirofosfato, lo decoloran.

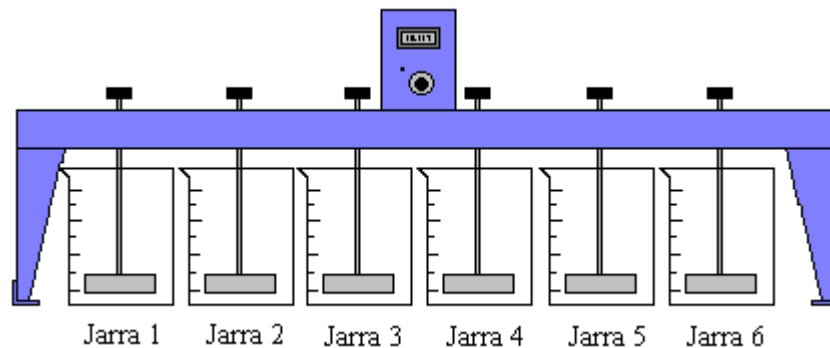
Se debe tener en cuenta que, cuando se forma el hidróxido férrico, se disminuye el pH del medio, no obstante, se lleve a cabo la precipitación a un pH= 2, para mantener el pH a niveles neutros, puede que exista la necesidad de añadir hidróxido de sodio al agua.

2.7.3. Prueba de jarras

La prueba de jarras se utiliza para determinar si el efluente por analizar puede ser tratado de manera eficaz y eficiente mediante un tratamiento de floculación-coagulación.

El ensayo consiste en colocar el efluente por analizar en vasos de precipitado y añadir distintas dosis del coagulante. Los vasos de precipitado (las jarras) a una agitación rápida para homogeneizar el medio y, seguidamente, a una velocidad más lenta para ayudar a favorecer la formación del flóculo. Después de un tiempo, se dejan los vasos de precipitado en reposo.

Figura 3. **Prueba de jarras**



Fuente: Norma Colombiana INCONTEC. *Agua potable. Determinación de hierro.* p 102.

Mediante este ensayo es posible determinar el coagulante o floculante óptimo, mezclado óptimo, pH, dosis óptima y rendimiento máximo alcanzable.

2.8. Eliminación de fosfatos

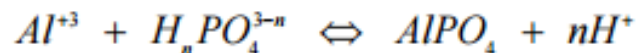
La precipitación química del fósforo se consigue mediante la adición de sales de iones metálicos de valencia múltiple que forman precipitados de fosfatos poco solubles. Las sales más comunes son las de calcio, hierro y aluminio. En esta investigación, solamente se utilizarán sales de hierro y aluminio.

El fósforo, generalmente, se encuentra en aguas naturales, residuales y residuales tratadas como fosfatos. Estos se clasifican como ortofosfatos, fosfatos condensados y compuestos órganofosfatados. Estas formas de fosfatos provienen de una gran cantidad de fuentes, como productos de limpieza, fertilizantes, procesos biológicos, etc.

El fósforo favorece la eutrofización. Se ha demostrado que la ausencia de este elemento es más importante que la del nitrógeno para limitar el crecimiento de las algas planctónicas, especialmente, en algunos tipos (algas «azules-verdes»), capaces de fijar el nitrógeno atmosférico.

Las reacciones básicas que intervienen en el proceso de precipitación del fósforo con hierro y aluminio son las siguientes:

Precipitación de fosfatos con aluminio:



Precipitación de fosfatos con hierro:



En el caso del aluminio y del hierro, 1 mol precipitará 1 mol de fosfato. Sin embargo, estas ecuaciones simples resultan engañosas y deberán ser consideradas teniendo en cuenta multitud de reacciones secundarias que se producen y las constantes de equilibrio asociadas a estas reacciones, los efectos de la alcalinidad, pH, elementos en estado traza y ligantes presentes en el agua residual.

En consecuencia, no se deben emplear las ecuaciones anteriores para estimar directamente las dosis necesarias, sino que deben realizarse ensayos a escala de laboratorio, que será lo que se realizará en la prueba de jarras de la presente investigación.

La eliminación del fosfato con sulfato de aluminio o cloruro férrico es una reacción con la formación del fosfato de aluminio o bien, fosfato férrico insolubles; el pH del agua residual que se tratará puede producir reacciones secundarias con el hierro y el aluminio, reacciones de precipitación de hidróxidos de aluminio o hierro a pH moderadamente alcalino o reacciones de formación de hidroxocomplejos a pH altamente alcalino.

Por esto, la dosis necesaria de los coagulantes para la eliminación del fósforo debe ser estudiada experimentalmente para cada agua analizada. Se ha comprobado que utilizando hierro como coagulante el pH óptimo de eliminación de fosfatos se encuentra entre 4 y 6. Utilizando aluminio se obtiene una mayor remoción del fósforo que con el hierro y a pH comprendidos entre 5 y 7.

2.8.1. Método de la absorciometría del ácido ascórbico

El ortofosfato reacciona con el molibdato en un medio ácido para producir un complejo de fósforo-molibdato. El ácido ascórbico reduce el complejo, dándole un intenso color azul al molibdeno.

2.9. Hierro

El ion hierro, puede presentarse en las aguas como ion ferroso, Fe^{+2} o bien, en su forma oxidada como ion férrico, Fe^{+3} . La estabilidad de las distintas formas que pueden presentarse químicamente depende de condiciones oxidantes o reductoras del medio, composición de la solución, pH o presencia de materias orgánicas acomplejantes. La presencia de hierro puede afectar la potabilidad del agua y, en las aguas industriales, puede dar lugar a depósitos incrustantes.

Se determina analíticamente por colorimetría y espectrofotometría de absorción atómica, dando el hierro total que incluye las formas solubles, coloidal y en suspensión fina.

2.10. Aluminio

El aluminio presente en aguas proviene de la disolución de silicatos y filosilicatos. Puede encontrarse como sales solubles o compuestos coloidales; su concentración varía entre 0.1 y 10 mg/L. La dinámica del aluminio en aguas naturales se inicia con la meteorización de rocas silicatadas que generan, en un principio, aluminio coloidal, posteriormente convertido en aluminio disuelto. En embalses y lagos, las concentraciones de aluminio aumentan en profundidad durante el período de mezcla térmica debido a los aportes de aguas ricas en arcillas en suspensión al lago.

La solubilidad del hidróxido de aluminio presenta un mínimo a pH de 5,07 en aguas con pH más ácidos, se encuentra el aluminio en forma iónica como Al^{+3} o complejoado con cloruros o fluoruros y a pH básicos mayores a 9, debido al anfoterismo, está como ion aluminato de alta solubilidad AlO_2^- .

La existencia de aluminio en las aguas tratadas proviene del uso común de sales de aluminio en coagulación de aguas destinadas a consumo doméstico.

Se puede determinar mediante el método de espectrofotometría de absorción molecular: en un medio tamponado acético, el aluminón (reactivo selectivo de Aluminio) forma con el metal un complejo de coloración roja, susceptible de medida colorimétrica a 525 nm. Opcionalmente, se podría analizar aluminio en aguas mediante absorción atómica sin llama, operando a 309,2 nm.

2.10.1. Método ICP-OES

El plasma de acoplamiento inductivo (ICP) es una fuente de ionización que junto a un espectrofotómetro de emisión óptico (OES) constituye el equipo de ICP-OES.

En esta técnica, la introducción continua de la muestra líquida y un sistema de nebulización forma un aerosol que es transportado por el Argón a la antorcha del plasma, acoplado inductivamente por radio frecuencia. En el plasma, debido las altas temperaturas generadas, los analitos son atomizados e ionizados generándose los espectros de emisión atómicos de líneas características. Los espectros son dispersados por la red de difracción y el detector sensible a la luz se encarga de medir las intensidades de las líneas. La información es procesada por el sistema informático.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Tabla I. Definición de las variables a utilizar

No.	Variables	Dimensional	Descripción
1	Dosis de sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3$)	$\frac{mg}{L}$ (miligramo por litro)	Cantidad adecuada de coagulante para reducir la contaminación del agua residual.
2	Dosis cloruro férrico ($FeCl_3$)	$\frac{mg}{L}$ (miligramo por litro)	Cantidad adecuada de coagulante para reducir la contaminación del agua residual.
3	Contenido de fósforo total (P_{total})	$\frac{mg}{L}$ (miligramo por litro)	El fósforo es un elemento esencial para el crecimiento biológico, favoreciendo la eutrofización. Por medio de la digestión todas las formas de fósforo existentes se convierten a fósforo total.
4	Contenido de hierro residual (Fe^{+3})	<i>ppm (Partes por millón)</i>	Parámetro que mide la cantidad de metal catiónico no soluble existente en la muestra de agua.

Continuación tabla I.

5	Contenido de aluminio residual (Al ³⁺)	ppm (<i>Partes por millón</i>)	Parámetro que mide la cantidad de metal catiónico no soluble existente en la muestra de agua.
6	Color	U Pt-Co (Unidades Platino- Cobalto)	Parámetro que mide la cantidad de color contenida en una muestra.

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel.

Tabla II. **Variables a manipular**

No.	Variables	Rango de variación
1	Dosificación de coagulante	(140 – 240) mg/L
2	Tiempo de agitación	(1 – 6) minutos
3	Velocidad de agitación	(40 – 120) revoluciones por minuto

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel.

Tabla III. **Variables de respuesta**

No.	Variabes	Variación
1	Fósforo total	(0 – 10) mg/L
2	Metal residual	(0-10) ppm
3	Porcentaje de metal residual	0 – 100
4	Color	(0-500) Unidades platino cobalto

Fuente: Acuerdo Gubernativo 236-2006.

3.2. Delimitación de campo de estudio

El campo de estudio será delimitado a tres muestras representativas de 5 galones del efluente original, tomada un día de trabajo y en condiciones estándar de operación, el cual proviene de un reactor biológico y, evaluado a través de un equipo de jarras adaptado.

El equipo para la prueba de jarras presenta las siguientes características:

- Motor de corriente alterna (AC) para generar 100 revoluciones por minuto.
- Seis secciones verticales de 1000 ml cada una.
- Seis agitadores de paleta.
- Reóstato para regular la velocidad de agitación.

El reactor biológico objeto de este estudio será el sistema anaerobio/aerobio de la Planta de tratamiento de aguas residuales “Ingeniero Arturo Pazos” de la colonia Aurora II, de la ciudad de Guatemala.

3.3. Recursos humanos disponibles

Alysson Sussana Ramírez Solórzano

Ing. Jorge Mario Estrada Asturias

3.4. Recursos materiales disponibles

3.4.1. Equipo y cristalería

Instrumentos de medición

- Balanza analítica electrónica 220/0.0001 gr. (Modelo: AX224, Marca: OHAUS).
- Probeta 100 ml (vidrio con escala y tapón de vidrio, base hexagonal).
- Pipeta serológica 2 ml. (vidrio, graduada, código color blanco).
- Pipeta serológica 5 ml. (vidrio, graduada, código color blanco).
- Pipeta serológica 10 ml. (vidrio, graduada, código color blanco).
- Balón aforado 100 ml (vidrio, kimax).
- Espectrofotómetro (UV-VIS haz compacto).

Equipo de contención y calefacción

- Beaker 1 000 ml (vidrio, forma baja, kimax).
- Beaker 500 ml (vidrio, forma baja, kimax).
- Beaker 100 ml (vidrio, forma baja, kimax).
- Beaker 50 ml (vidrio, forma baja, kimax).
- Recipiente para toma de muestras (plástico, 5 galones, con tapadera).

Elementos varios

- Embudo de filtración (cónico de vidrio, tallo corto).
- Succionador 10 ml.
- Celdas para Espectrofotometría.
- Agitador magnético (plato 150 ml).
- Ensayo de Jarras (seis agitadores en paralelo, 120 rpm, luz inferior).
- Guantes Nitrilo (talla *small*, blanco).

3.4.2. Reactivos

Reactivos nivel laboratorio

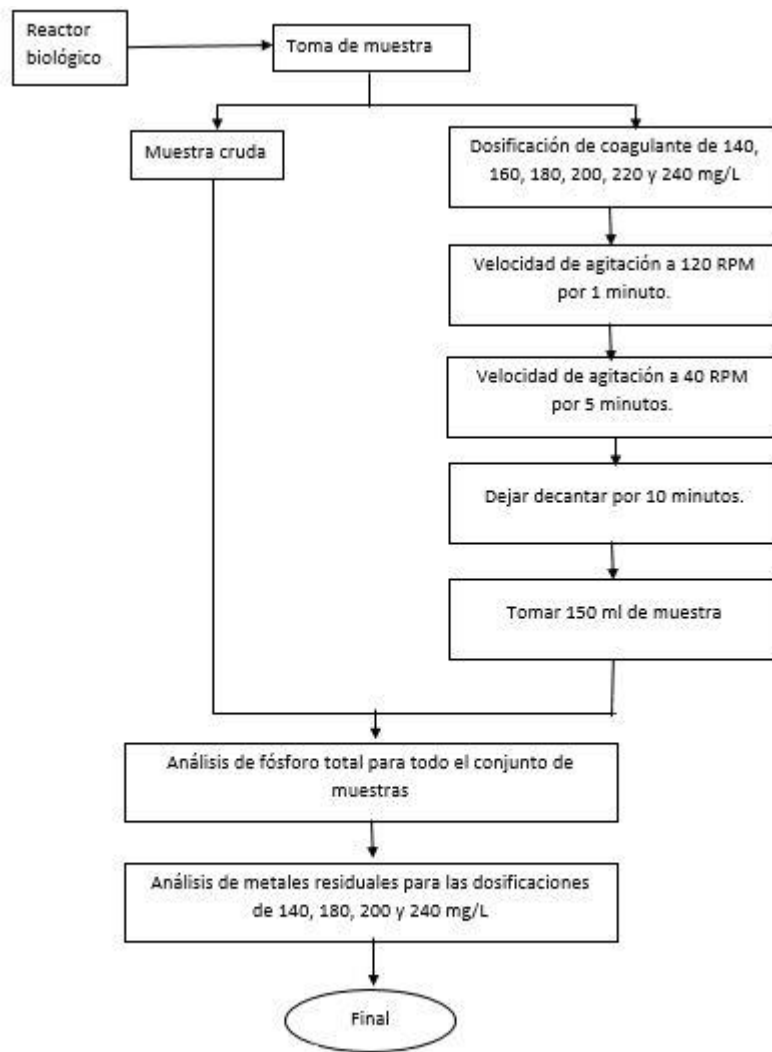
- Sulfato de Aluminio (tipo A)
- Cloruro Férrico (grado técnico 40°)
- Agua desmineralizada

3.5. Técnicas cuantitativas

- Para la determinación de dosificación de coagulante óptima se realizará la prueba de jarras con seis dosificaciones distintas.
- Para determinar la dosificación donde existe mayor remoción de fósforo total se analizará el fósforo por medio del método de absorciometría del ácido ascórbico.
- Para la determinación de hierro residual se obtendrá por medio del método de ICP-OES.
- Para la determinación de aluminio residual, se realizará por medio del método de ICP-OES.

3.5.1. Procedimiento para la recolección y análisis de resultados

Figura 4. Procedimiento de toma de muestras y análisis de resultados



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Las muestras fueron recolectadas en depósitos de cinco galones. Se verificó que el depósito estuviera completamente limpio para evitar que residuos de tierra y otros contaminantes afectaran su contenido.

Las muestras se caracterizaron el mismo día en que fueron tomadas, las pruebas de fósforo total se realizaron con un día de diferencia para evitar la variación en las características del agua o por actividad microbiológica.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

3.7.1. Determinación de coagulante para la prueba de jarras

Determinación del coagulante sulfato de aluminio o cloruro férrico para una concentración de 100 mg/l, con un tiempo de contacto de un minuto y una velocidad de mezclado de 120 revoluciones por minuto es necesaria una muestra de 1 L de efluente.

Para todas las dosificaciones de coagulante de cloruro férrico o sulfato de aluminio, se necesita de una muestra de 1 L de efluente.

3.7.2. Determinación de muestra para el cálculo de fósforo total

Determinación de muestra para obtener el fósforo total, se obtiene una muestra de 10ml y se diluye en un balón aforado de 100ml. Luego, se realiza el procedimiento descrito en la parte de ANEXOS en el área de “Metodología analítica para el método de absorciometría del ácido ascórbico para la determinación del fósforo total”.

Tomar en cuenta que para todas las dosificaciones con los dos coagulantes se realizan las mismas diluciones y la misma metodología.

3.8. Análisis estadístico

3.8.1. Número de repeticiones

Cálculo del número de repeticiones

$$N = \frac{\left(\frac{Z_{\alpha}}{2}\right)^2 * p * q}{E^2}$$

Donde

N= Número de corridas

$\frac{Z_{\alpha}}{2}$ = Área bajo la curva con un nivel de confianza del 95%.

p= Probabilidad de éxito

q= Probabilidad de fracaso

E= Error máximo.

El número de repeticiones calculado corresponde a un nivel de confianza del 95 %. Equivale a la proporción de éxito y una proporción de fracaso del 5 %, con un error máximo de 25 %.

$$N = \frac{(1.96)^2 * 0.95 * 0.05}{0.25^2} = 2.919$$

Se realizará un total de 3 corridas.

3.8.2. Análisis de varianza para el fósforo y porcentaje de metal residual total con cloruro férrico y sulfato de aluminio

$$\sigma^2 = \frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{N}$$

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

(Ecuación No. 1)

Donde:

σ^2 = varianza

x_i = cada uno de los datos

\bar{x} = media aritmética

N = número de datos

Ejemplo No. 1

Varianza para fósforo total de con una dosificación de 140 mg/L de cloruro férrico.

$$\sigma^2 = \frac{(1,806 - 1,8003)^2 + (1,608 - 1,8003)^2 + (1,987 - 1,8003)^2}{3}$$

$$\sigma^2 = 0,03593 \frac{mg}{l}$$

Nota: el análisis de varianza para el fósforo total se encuentra en las tablas IV y V de la sección de análisis estadístico.

3.8.3. Desviación estándar para el fósforo total y porcentaje de metal residual con cloruro férrico y sulfato de aluminio

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m)^2}{n-1}} \quad (\text{Ecuación No. 2})$$

Donde:

σ = desviación estándar

x_i = cada uno de los datos

m = media aritmética

n = número de datos

Ejemplo No. 2

Desviación estándar para fósforo total de con una dosificación de 140 mg/L de cloruro férrico.

$$\sigma^2 = \sqrt{\frac{(1,806 - 1,8003)^2 + (1,608 - 1,8003)^2 + (1,987 - 1,8003)^2}{3 - 1}}$$

$$\sigma^2 = 0,18956 \frac{mg}{l}$$

Nota: la desviación estándar para el fósforo total se encuentra en las tablas V y VI de la sección de análisis estadístico.

Tabla IV. **Desviación estándar y varianza del contenido fósforo total con sulfato de aluminio**

Dosificación (mg/l)	Concentración (mg/L)	Media	Varianza	Desviación Estándar
140	1,679	1,6847	0,0348	0,1866
	1,874			
	1,501			
160	0,964	0,9463	0,0016	0,0396
	0,974			
	0,901			
180	0,625	0,6190	0,0119	0,1091
	0,507			
	0,725			
200	0,239	0,2333	0,0011	0,0329
	0,263			
	0,198			
220	0,568	0,6527	0,0076	0,0871
	0,742			
	0,648			
240	0,474	0,4867	0,0067	0,0817
	0,574			
	0,412			

Fuente: incisos 3.8.2 y 3.8.3 de la sección de análisis estadístico.

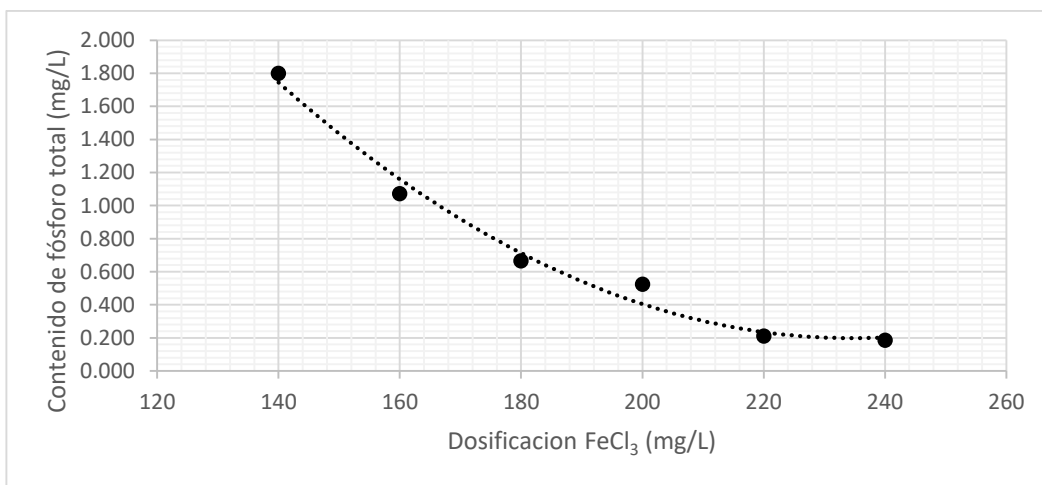
Tabla V. **Desviación estándar y varianza de fósforo total con cloruro férrico**

Dosificación (mg/l)	Concentración (mg/l)	Promedio	Varianza	Desviación Estándar
140	1,806	1,8003	0,0359	0,1896
	1,608			
	1,987			
160	1,058	1,0717	0,0055	0,0744
	1,005			
	1,152			
180	0,597	0,6670	0,0104	0,1020
	0,784			
	0,62			
200	0,578	0,5253	0,0038	0,0620
	0,541			
	0,457			
220	0,267	0,2120	0,0059	0,0770
	0,245			
	0,124			
240	0,192	0,1857	0,0002	0,0155
	0,168			
	0,197			

Fuente: incisos 3.8.2 y 3.8.3 de la sección de análisis estadístico.

4. RESULTADOS

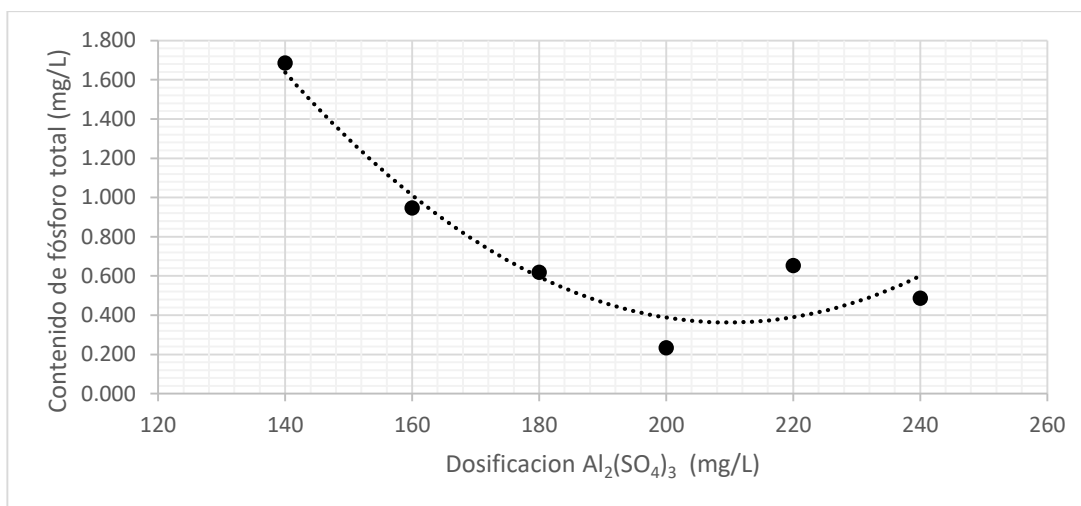
Figura 5. Contenido de fósforo total en función de dosificaciones de cloruro férrico (FeCl_3)



COLOR	MODELO MATEMÁTICO	RANGO	R^2
	$P_{\text{total}} = 0,0002D_{\text{Fe}}^2 - 0,0812 D_{\text{Fe}} + 9,7197$	$(140-240) \frac{\text{mg}}{\text{ml}}$	0,9849

Fuente: datos calculados, apéndice 1, 2, 3.

Figura 6. **Contenido de fósforo total en función de dosificaciones de sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$)**



COLOR	MODELO MATEMÁTICO	RANGO	R^2
	$P_{\text{total}} = 0,0003 D_{\text{Al}}^2 + 0,1096 D_{\text{Al}} + 11,861$	$(140-240) \frac{\text{mg}}{\text{ml}}$	0,9111

Fuente: datos calculados, apéndice 1, 2, 3.

Tabla VI. **Aluminio residual en dosis óptimas encontradas**

Dosificación $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (mg/L)	Al^{+3} (ppm)
140	8,685
180	8,678
200	5,691

Fuente: datos calculados, apéndice 4.

Tabla VII. **Hierro residual en dosis óptimas encontradas**

Dosificación FeCl ₃ (mg/L)	Fe ⁺³ (ppm)
140	2,632
180	9,211
240	4,22

Fuente: datos calculados, apéndice 5.

Tabla VIII. **Porcentaje de aluminio residual en dosis óptimas encontradas**

Dosificación Al ₂ (SO ₄) ₃ (mg/L)	Porcentaje de metal residual
140	4,08%
180	3,48%
200	5,06%

Fuente: datos calculados, apéndice 4.

Tabla IX. **Porcentaje de hierro residual en dosis óptimas encontradas**

Dosificación FeCl ₃ (mg/L)	Porcentaje de Fe ⁺³ residual
140	6,23%
180	1,83%
240	3,72%

Fuente: datos calculados, apéndice 5.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Se realizó el análisis comparativo, a nivel laboratorio, de los metales residuales que quedan después del tratamiento con el uso de coagulantes inorgánicos (cloruro férrico y sulfato de aluminio) a la salida de un reactor biológico.

Principalmente, se realizaron pruebas preliminares de remoción de fósforo total para ubicar las dosificaciones de coagulante a la salida de un reactor biológico tipo INHOFF para tener un rango de dosificación más preciso. Luego, se realizaron los análisis correspondientes en los rangos de dosificaciones de mayor remoción.

Para el análisis de los resultados de fósforo total, se utilizó el método de absorciometría del ácido ascórbico y, para la determinación de hierro y aluminio residual, se utilizó el método ICP-OES (Plasma de acoplamiento inductivo por medio de un espectrofotómetro de emisión óptico). En casos como este, es preferible en la espectrometría de absorción atómica ya que tiene menores límites de detección para una mayor exactitud en los resultados de hierro y aluminio, ya que inicialmente no se tenía conocimiento de la residualidad. Es decir, se pueden detectar concentraciones a niveles de trazas, y los valores detectados en este trabajo están en orden de ppm, lo que lo cubre perfectamente cualquiera de los dos métodos.

Se observa una tendencia descendente del fósforo total en función de la dosificación de coagulante. En la figura 6, se muestra un mínimo, dejando la dosificación óptima de coagulante. El análisis de metales residuales se realizó en esta dosificación y en otras dos para comparar cuál deja menor residualidad del metal correspondiente.

Se realizaron mediciones de pH y temperatura a las muestras y no se notó una variación significativa, por lo que estos análisis no se tomaron en cuenta.

Utilizando el sulfato de aluminio se puede observar que en la dosificación de 200 mg/L se tiene la mayor remoción de fósforo, pero en la dosis de 180 mg/L se obtiene una remoción de fósforo por debajo del límite permisible¹, además se observa que es la dosis donde se tiene el menor porcentaje de metal residual (3,48 %).

Al utilizar cloruro férrico, se obtiene una mayor remoción de fósforo total en la dosificación de 240 mg/L de coagulante. Sin embargo, en la dosis de 180 mg/L es la dosis donde se obtiene el mayor porcentaje de metal residual, hierro. Teniendo una remoción de fósforo por debajo del límite permisible.

Al utilizar cloruro férrico, no se observa un mínimo, sin embargo, para una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas, utilizar más de 240 mg/L, la dosificación que remueve mayor cantidad de fósforo total, no es rentable ni viable económicamente. Sin embargo, como el objeto de estudio de la presente investigación es la remoción de metal residual, la dosificación óptima es de 180 mg/L.

¹ Según el Acuerdo Gubernativo 236-2006 el límite máximo permisible es de 10 mg/l.

Estos parámetros pueden ser tomados en cuenta ya que, según el Acuerdo Gubernativo 236-2006, los parámetros de fósforo total, pH, temperatura y color están en norma. Esto ayudó cuando se llevaron a cabo los análisis preliminares porque a dosificaciones más altas de coagulante, se tenía una mayor remoción de fósforo; sin embargo, con menores dosis, según el Acuerdo Gubernativo 236-2006, los parámetros de fósforo total ya se encontraban en norma.

A manera de comparación, se realizaron mediciones de color cuyos datos se encuentran en el apéndice 6, 7 y 8, donde se observa que, al utilizar sulfato de aluminio, se tiene una mayor remoción en el color. Sin embargo, todos los resultados de color que se calcularon en todas las dosificaciones de sulfato de aluminio y cloruro férrico están dentro de norma según el Acuerdo Gubernativo 236-2006.

CONCLUSIONES

1. La dosis óptima utilizando sulfato de aluminio para la mayor remoción de fósforo total en el agua proveniente de un reactor biológico es de 200 mg/L.
2. La dosis óptima determinada para la mayor remoción de fósforo total en el agua proveniente de un reactor biológico es de 240 mg/L al utilizar cloruro férrico.
3. Al utilizar sulfato de aluminio, en la dosificación de 200 mg/L, el metal residual es de 5.691 mg/kg.
4. Al utilizar cloruro férrico, en la dosificación de 240 mg/L, el metal residual es de 2.632 mg/kg.
5. Utilizando sulfato de aluminio, en la dosificación de 200 mg/L, el porcentaje de metal residual es de 5,06 %.
6. El porcentaje de metal residual utilizando cloruro férrico en la dosificación de 240 mg/L, es 6,23 %.
7. Cuando se utiliza sulfato de aluminio el menor porcentaje de metal residual se obtiene en la dosificación de 180 mg/L, cumpliendo con el límite máximo permitido.

8. Cuando se utiliza cloruro férrico el menor porcentaje de metal residual se obtiene en la dosificación de 180 mg/L, cumpliendo con el límite máximo permitido.

RECOMENDACIONES

1. Verificar que el volumen de la muestra sea el adecuado para realizar todos los análisis contemplados el cual no deberá ser menor de 20 litros.
2. Realizar los análisis el mismo día que se toma la muestra para evitar la oxidación de la materia presente.
3. Realizar el análisis de fósforo total en los tiempos estipulados en el manual "Standard Methods for Examination of Water and Wastewater".
4. Para hacer los análisis de hierro y aluminio, preservar las muestras a un pH menor o igual a 2 con ácido nítrico.
5. Preparar las soluciones de sulfato de aluminio y cloruro férrico utilizando el equipo de seguridad adecuado, ya que son soluciones ácidas y corrosivas.
6. Preparar soluciones diluidas de sulfato de aluminio y cloruro férrico, al 1 % para optimizar el área de contacto entre las fases.
7. Preparar las soluciones de los coagulantes el mismo día en que se utilizarán para evitar la descomposición por hidrólisis de las mismas.

8. Homogenizar la muestra del efluente original debido a que es una etapa crítica para determinar de manera precisa los parámetros fisicoquímicos de interés antes y después de adicionar los dos coagulantes de estudio a sus diferentes concentraciones.

BIBLIOGRAFÍA

1. American Public Health Association. *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*. 2a ed. EE.UU.: Broadway, 1965. 769 p.
2. BENITEZ PACHECO, Ingrid Lorena. *Evaluación de la distribución de metales pesados en las plantas acuáticas Jacinto de agua (Eichhornia Crassipes) y tul (Thypha Spp) utilizadas en la planta de tratamiento de aguas residuales La Cerra. Villa Canales por medio de fluorescencia de rayos X*. Trabajo de graduación de Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2008. 68 p.
3. GONZALES SERRANO, Luis Fernando. *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 Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2011. 182 p.
4. GRIJALVA DE CIUDAD REAL, Claudia Fabiola. *Análisis comparativo de un polímero coagulante catiónico vrs. Sulfato de aluminio en la clarificación de agua en una planta de elaboración de bebidas carbonatadas*. Trabajo de graduación de Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2004. 69 p.

5. JIMÉNEZ BELTRÁN, Domingo. DE LORA, Federico. SETTE RAMALHO, Rubens. *Introduction to Wastewater Treatment Processes*. 2a ed. London, Inglaterra: Academic Press, 1996. 704 p.
6. JIMÉNEZ CISNEROS, Blanca Jimena. *La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada*. México: Limusa, Colegio de Ingenieros Ambientales de México, A.C. Instituto de Ingeniería de la UNAM y FEMISCA, 2001. 927 p.
7. Norma Colombiana INCONTEC. *Agua potable. Determinación de hierro*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas. Bogotá, Colombia: 1978. 1209 p.
8. Norma Sanitaria Panamericana OFSANPAN - IALUTZ A 010. *Norma Técnica de métodos físicos y químicos para análisis de aguas potables*. Oficina Sanitaria Panamericana. Washington, EE.UU.: 1968. 8 p.
9. RIGOLA LAPEÑA, Miguel. *Tratamiento de aguas industriales: Aguas de proceso y residuales*. España: MARCOMBO, S.A., 1990. 161 p.
10. RÍOS RODRIGUEZ, Jhonatan Alexander. *Caracterización de las aguas residuales de una industria farmacéutica y propuesta de un proceso para la reducción y el control de los contaminantes presentes*. Trabajo de graduación de Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2011. 201 p.
11. SANS FONFRÍA, Ramón. *Ingeniería ambiental: Contaminación y tratamientos*. España: MARCOMBO, S.A., 1989. 153 p.

12. Secretaría de Economía DGN. *Análisis de aguas – Determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba*. México: NMX-AA-029-SCFI-2001. 21 p.

13. SERRANO GALLEGO, Roque. INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE DATOS EXPERIMENTALES: *Tratamiento de datos en bioensayos*. 2a ed. España: Universitat Jaume I, 2003. 193 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Datos calculados para el cálculo de fósforo total en la primera corrida

	Muestra (mg/l)		FOSFORO TOTAL				
			BLANCO	ABS SIN/REACT	ABS CON/REACT	ABS VERDADERA	CONCENTRACIÓN (mg/L)
PRIMERA CORRIDA	Al₂(SO₄)₃	80	0	0,001	0,496	0,495	3,507
		100	0	0	0,423	0,423	3,375
		120	0	0	0,350	0,350	2,292
		140	0	0	0,150	0,150	1,679
		160	0	0	0,400	0,400	0,964
		180	0	0	0,103	0,103	0,625
		200	0	0	0,078	0,078	0,239
		220	0	0	0,100	0,100	0,568
		240	0	0	0,081	0,081	0,474
	FeCl₃	80	0	0	0,475	0,475	3,479
		100	0	0	0,400	0,400	2,311
		120	0	0	0,367	0,367	2,066
		140	0	0	0,950	0,950	1,806
		160	0	0	0,150	0,150	1,058
		180	0	0	0,100	0,100	0,597
		200	0	0	0,099	0,099	0,578
		220	0	0	0,061	0,061	0,267
		240	0	0,001	0,040	0,039	0,192

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Apéndice 2.

Datos calculados para el cálculo de fósforo total en la segunda corrida

	Muestra (mg/l)	FOSFORO TOTAL					
		BLANCO	ABS SIN/REACT	ABS CON/REACT	ABS VERDADERA	CONCENTRACIÓN (mg/L)	
SEGUNDA CORRIDA	Al₂(SO₄)₃	80	0	0,001	0,478	0,477	3,402
		100	0	0	0,463	0,463	3,347
		120	0	0	0,349	0,349	2,119
		140	0	0	0,153	0,153	1,874
		160	0	0	0,138	0,138	0,974
		180	0	0	0,102	0,102	0,507
		200	0	0	0,061	0,061	0,263
		220	0	0	0,096	0,096	0,742
		240	0	0	0,086	0,086	0,574
	FeCl₃	80	0	0	0,474	0,474	3,574
		100	0	0	0,352	0,352	2,214
		120	0	0	0,327	0,327	2,369
		140	0	0	0,296	0,296	1,608
		160	0	0	0,148	0,148	1,005
		180	0	0	0,099	0,099	0,784
		200	0	0	0,097	0,097	0,541
		220	0	0	0,064	0,064	0,245
		240	0	0,001	0,056	0,055	0,168

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Apéndice 3.

Datos calculados para el cálculo de fósforo total en la tercera corrida

	Muestra (mg/l)		FOSFORO TOTAL				CONCENTRACIÓN (mg/L)
			BLANCO	ABS SIN/REACT	ABS CON/REACT	ABS VERDADERA	
TERCERA CORRIDA	Al₂(SO₄)₃	80	0	0,001	0,598	0,597	3,612
		100	0	0	0,465	0,465	3,125
		120	0	0	0,347	0,347	2,342
		140	0	0	0,100	0,100	1,501
		160	0	0	0,138	0,138	0,901
		180	0	0	0,100	0,100	0,725
		200	0	0	0,050	0,050	0,198
		220	0	0	0,060	0,060	0,648
		240	0	0	0,075	0,075	0,412
	FeCl₃	80	0	0	0,500	0,500	3,789
		100	0	0	0,370	0,370	2,547
		120	0	0	0,310	0,310	2,143
		140	0	0	0,296	0,296	1,987
		160	0	0	0,150	0,150	1,152
		180	0	0	0,098	0,098	0,62
		200	0	0	0,096	0,096	0,457
		220	0	0	0,061	0,061	0,124
		240	0	0,001	0,048	0,047	0,197

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Apéndice 4.

Datos calculados para la determinación de aluminio residual

Dosificación $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (mg/L)	Al^{+3} (ppm)	Porcentaje de Al^{+3} residual
140	8,685	4,08%
180	8,678	3,48%
200	5,691	5,06%

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Apéndice 5.

Datos calculados para la determinación de hierro residual

Dosificación FeCl_3 (mg/L)	Fe^{+3} (ppm)	Porcentaje de Fe^{+3} residual
140	2,632	6,23%
180	9,211	1,83%
240	4,22	3,72%

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Apéndice 6.

Datos calculados para la determinación de color en la primera corrida

	Muestra (mg/l)		COLOR		
			BLANCO	ABSORBANCIA	COLOR U PI-Co
PRIMERA CORRIDA	Al₂(SO₄)₃	80	0	0,089	66,72
		100	0	0,063	46,4
		120	0	0,044	31,55
		140	0	0,028	19,04
		160	0	0,019	18,25
		180	0	0,018	16,78
		200	0	0,015	16,21
		220	0	0,009	12,08
		240	.	0,005	11,94
	FeCl₃	80	0	0,103	77,67
		100	0	0,095	71,41
		120	0	0,082	61,25
		140	0	0,075	55,78
		160	0	0,071	51,26
		180	0	0,061	50,78
		200	0	0,060	48,33
		220	0	0,051	41,55
		240	0	0,02	39,81

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Apéndice 7.

Datos calculados para la determinación de color en la segunda corrida

	Muestra (mg/l)		COLOR		
			BLANCO	ABSORBANCIA	COLOR U PI-Co
SEGUNDA CORRIDA	Al₂(SO₄)₃	80	0	0,09	68,29
		100	0	0,075	55,78
		120	0	0,057	41,71
		140	0	0,047	51,034
		160	0	0,035	54,51
		180	0	0,033	22,95
		200	0	0,03	20,61
		220	0	0,024	15,92
		240	0	0,027	18,26
	FeCl₃	80	0	0,321	248,07
		100	0	0,324	250,41
		120	0	0,284	219,15
		140	0	0,075	55,78
		160	0	0,086	64,38
		180	0	0,072	53,44
		200	0	0,072	53,44
		220	0	0,054	39,27
		240	0	0,039	27,64

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Apéndice 8.

Datos calculados para la determinación de color en la tercera corrida

	Muestra (mg/l)		COLOR		
			BLANCO	ABSORBANCIA	COLOR U PI-Co
TERCERA CORRIDA	Al₂(SO₄)₃	80	0	0,078	34,870
		100	0	0,057	30,270
		120	0	0,041	27,190
		140	0	0,038	26,550
		160	0	0,035	24,510
		180	0	0,033	22,950
		200	0	0,030	20,610
		220	0	0,024	15,920
		240	0	0,027	18,260
	FeCl₃	80	0	0,140	79,310
		100	0	0,129	75,001
		120	0	0,120	72,254
		140	0	0,100	70,210
		160	0	0,086	64,380
		180	0	0,072	53,440
		200	0	0,072	53,440
		220	0	0,054	39,370
		240	0	0,039	27,640

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Apéndice 9. **Tabla de requisitos académicos**

1	2	3	4	5	6	7
Carrera	Área	Tema genérico	Tema Específico	Especificación	Problema a resolver	Temario tentativo
Licenciatura en Ingeniería Química	Química	Química III	Expresiones de concentración	Molaridad, Normalidad, partes por millón	Comparar a nivel laboratorio la cantidad de metales residuales al utilizar dos distintos coagulantes inorgánicos para el tratamiento de aguas servidas provenientes de un reactor biológico.	<p>ÍNDICE RESUMEN INTRODUCCIÓN 1. MARCO CONCEPTUAL 1.1 ANTECEDENTES 1.2 JUSTIFICACIÓN 1.3 DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA 1.4 HIPÓTESIS 2. MARCO TEÓRICO 3. OBJETIVOS 4. METODOLOGÍA 4.1 VARIABLES 4.2 DELIMITACIÓN DE CAMPO DE ESTUDIO 4.3 RECURSOS HUMANOS DISPONIBLES 4.4 RECURSOS MATERIALES DISPONIBLES 4.5 TÉCNICA CUALITATIVA O CUANTITATIVA 4.6 RECOLECCIÓN Y ORDENAMIENTO DE LA INFORMACIÓN 4.7 TABULACIÓN, ORDENAMIENTO Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN 4.8 ANÁLISIS ESTADÍSTICO 4.9 PLAN DE ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS 4.9.1 MÉTODOS Y MODELOS DE LOS DATOS SEGÚN TIPO DE VARIABLES 4.9.2 PROGRAMAS A UTILIZAR PARA ANÁLISIS DE DATOS 5. CRONOGRAMA 6. PRESUPUESTO BIBLIOGRAFÍA Y/O REFERENCIAS</p>
		Química IV	Equilibrio Homogéneo	Equilibrio de fases		
			Sistema Coloidal	Interacción de coloides en distintas fases		
		Análisis Cualitativo	Equilibrio ácido-base	Acidificación, Neutralización		
		Análisis Cuantitativo	Métodos analíticos	Métodos gravimétricos y volumétricos		
	Control de Contaminantes Industriales	Caracterización de aguas residuales	Clasificación de los contaminantes			
			Sistemas de tratamiento de aguas residuales			
	Operaciones Unitarias	Flujo de Fluidos (IQ2)	Principios de transferencia	Agitación y mezcla		
	Fisicoquímica	Laboratorio de Fisicoquímica 2	Cinética de reacciones	Espectrofotometría		
	Ciencias Básicas y Complementarias	Calidad del Agua	Generalidades básicas de acondicionamiento, tratamiento y depuración de agua	Tratamiento de residuos líquidos industriales		
Estadística		Análisis de datos	Análisis de varianza, medidas de distribución, porcentaje de error de un conjunto de datos			

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

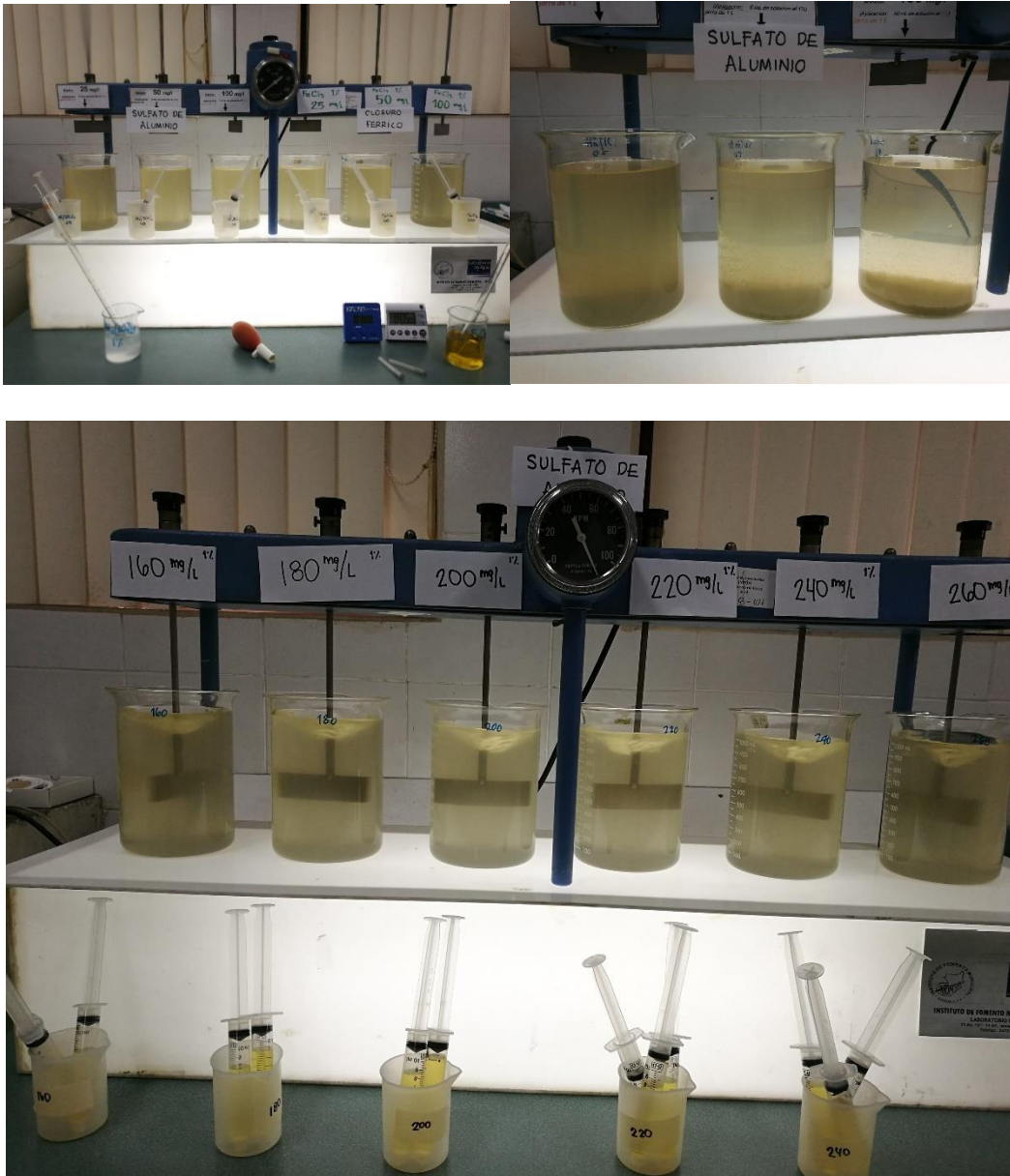


Fuente: planta de tratamiento de aguas residuales "Ingeniero Arturo Pazos".

Reactor anaerobio ubicado en el sistema anaerobio/aerobio de la Planta de tratamiento de aguas residuales "Ingeniero Arturo Pazos" de la Colonia Aurora II, de la Ciudad de Guatemala. Vista superior de donde se colectaron las muestras.

Apéndice 11.

Pruebas preliminares, prueba de jarras.



Fuente: Planta de tratamiento de aguas residuales “Ingeniero Arturo Pazos”.

Pruebas preliminares con sulfato de aluminio y cloruro férrico para establecer las dosificaciones óptimas.

ANEXOS

Anexo1. **Procedimiento analítico para el método de absorciometría del ácido ascórbico para la determinación del fósforo total**

Utilizando reactivo en polvo

1. Ingresar en el programa el código para el reactivo del fósforo, el método del ácido ascórbico.
2. Girar el dial selector de longitud de onda hasta 890 nm.
3. Adicionar 10 ml de muestra de agua en la celda.
4. Agregar el contenido de reactivo de fosforo PhosVer3 con los 10 ml de la muestra en la celda preparada. Agitar inmediatamente para mezclar e insertarla en el compartimento.
5. Presionar el botón de control de tiempo para que la muestra reaccione un periodo de dos minutos.
6. Llenar una segunda celda con 10 ml de agua destilada (este es el blanco).
7. Cuando la alarma de tiempo termina, el dispositivo de lectura muestra la concentración en mg/L PO_4^{3-} PV. Colocar el blanco dentro del soporte de la celda.
8. Presionar el botón de ajuste del ZERO. El dispositivo mostrará la frase "Reduciendo a cero...", después 0.00 mg/L PO_4^{3-} PV.
9. Colocar la celda preparada dentro del soporte. Cerrar ligeramente.
10. Presionar el botón para leer el y luego, los resultados serán mostrados en mg/L de fósforo total.

Fuente: American Public Health Association. *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*. P. 149-152.

