



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DE
COAGULANTE Y FLOCULANTE COMO TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN UNA
INDUSTRIA DE ALIMENTOS**

Angel Eduardo Hernández de Paz

Asesorado por la Msc. Inga. Adela María Marroquín González

Guatemala, abril de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DE
COAGULANTE Y FLOCULANTE COMO TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN UNA
INDUSTRIA DE ALIMENTOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ANGEL EDUARDO HERNÁNDEZ DE PAZ

ASESORADO POR LA MSC. INGA. ADELA MARÍA MARROQUÍN GONZÁLEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, ABRIL DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	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
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. César Alfonso García Guerra
EXAMINADORA	Inga. Mercedes Esther Roquel Chávez
EXAMINADORA	Inga. Dina Lisette Estrada Moreira
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:

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DE COAGULANTE Y FLOCULANTE COMO TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN UNA INDUSTRIA DE ALIMENTOS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 17 de agosto de 2020.

Angel Eduardo Hernández de Paz

Ref. EEPFI-0260-2020
Guatemala, 18 de febrero de 2021

Director
Williams Guillermo Álvarez Mejía
Escuela de Ingeniería Química
Presente.

Estimado Ing. Álvarez:

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DE LA DOSIS OPTIMA DE COAGULANTE Y FLOCULANTE COMO TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN UNA INDUSTRIA DE ALIMENTOS**, presentado por el estudiante **Angel Eduardo Hernández de Paz** carné número **201213049**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en Artes en Energía y Ambiente.

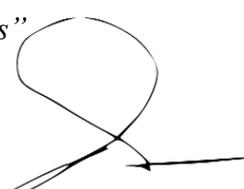
Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

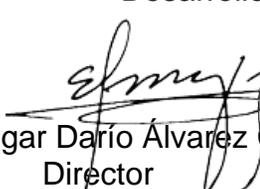
Atentamente,


Adela María Marroquín González
Ingeniera Química Col. No. 1446

Mtra. Adela María Marroquín González
Asesora

"Id y Enseñad a Todos"


Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador de Área
Desarrollo Socio-Ambiental y Energético


Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería

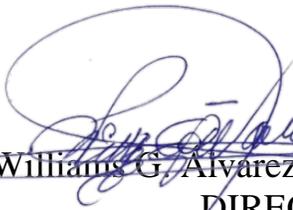




Ref.EEP.EIQ. 007.2021

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DE LA DOSIS OPTIMA DE COAGULANTE Y FLOCULANTE COMO TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN UNA INDUSTRIA DE ALIMENTOS**, presentado por el estudiante universitaria Angel Eduardo Hernández de Paz, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería en esta modalidad.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing.  **William G. Alvarez Mejia, M.Sc., M.U.I.E.**

DIRECTOR

Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, febrero de 2021

DTG. 179.2021.

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: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DE COAGULANTE Y FLOCULANTE COMO TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN UNA INDUSTRIA DE ALIMENTOS**, presentado por el estudiante universitario: **Angel Eduardo Hernández de Paz**, 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, abril de 2021.

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

Dios y la Virgen María

Por darme la vida, inteligencia, sabiduría y todas las bendiciones que me han permitido llegar a culminar esta carrera.

Mis padres

Miguel Hernández y Brenda de Paz por ser mi fuente de inspiración y ejemplo de vida. Por todo su amor incondicional y esfuerzo para llegar a donde hoy estamos. ¡Lo hemos logrado!

Mis hermanos

Brenda Eunice y Pablo Jose Hernández de Paz por todo su amor, su apoyo y comprensión. Han sido el pilar fuerte de mi vida.

Mis abuelos

Miguel Hernández, Carlota Escobar, Marta Hernández (q. e. p. d.) y Victoriano de Paz por todos sus consejos y enseñanzas, por ser fuente de inspiración. Para los tres que ya no están un abrazo al cielo.

Mi madrina

Dora Alicia de Paz Dávila (q. e. p. d.) por su amor y apoyo incondicional, por ser como mi segunda madre.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por darme la oportunidad y el acceso a mi formación educativa superior.
Facultad de Ingeniería	Por ser la facultad que me formó a nivel profesional y permitirme tener los conocimientos necesarios para desarrollarme como ingeniero.
Mis tíos y primos	Por ser parte importante de mi vida, por el cariño y por estar siempre presentes acompañándome en cada etapa.
Mis amigos de la facultad y maestría	Por todas las experiencias vividas en este camino universitario, por su cariño y apoyo en todo momento, no hubiera sido lo mismo sin ustedes.
Mis amigos del colegio	Por su amistad y cariño incondicional a través de los años, por estar siempre complementando mi vida.
Rafael Villegas	Por su cariño y apoyo incondicional. Gracias, por tanto.

Mi equipo de trabajo

Por abrirme las puertas de la vida profesional, compartir todos sus conocimientos y experiencias y por todo su apoyo y cariño.

Fabio Ordoñez

Por confiar en mí y darme la oportunidad de iniciar mi carrera profesional.

Mi asesora de tesis

Msc. Inga. Adela Marroquín por brindarme educación de calidad durante mi carrera universitaria y por todo su apoyo y aportes de conocimiento en este trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XI
1. INTRODUCCION	1
2. ANTECEDENTES.....	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	7
4. JUSTIFICACIÓN.....	9
5. OBJETIVOS.....	11
5.1 General.....	11
5.2 Específicos	11
6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN.....	13
7. MARCO TEÓRICO	15
7.1 Aguas residuales	15
7.1.1 Agua residual de tipo especial	15
7.1.2 Agua residual en la industria alimenticia	15
7.1.3 Parámetros de calidad del agua residual	16

	7.1.3.1	Características físicas.....	17
	7.1.3.2	Características químicas.....	17
	7.1.3.3	Características biológicas.....	18
7.1.4		Caracterización del agua residual.....	19
	7.1.4.1	Caudal.....	19
		7.1.4.1.1 Medición de caudal volumétrico manual.....	20
	7.1.4.2	Toma de muestras.....	20
		7.1.4.2.1 Manipulación de muestras.....	22
7.1.5		Efectos de las descargas de aguas residuales.....	22
7.2		Tratamiento de aguas residuales.....	23
	7.2.1	Clasificación de métodos de tratamiento.....	23
		7.2.1.1 Tratamientos físicos.....	23
		7.2.1.2 Tratamientos químicos.....	24
		7.2.1.3 Tratamientos biológicos.....	24
7.2.2		Diagramas de flujo de tratamientos.....	24
		7.2.2.1 Tratamiento primario.....	25
		7.2.2.2 Tratamiento secundario.....	25
		7.2.2.3 Tratamiento terciario.....	25
		7.2.2.4 Criterios para diseño.....	26
7.3		Coagulación-Floculación.....	27
	7.3.1	Coagulación.....	28
	7.3.2	Floculación.....	29
	7.3.3	Condiciones de operación y equipo.....	30
	7.3.4	Pruebas de tratabilidad.....	31
		7.3.4.1 Prueba de jarras.....	32
		7.3.4.1.1 Curvas de consumo de coagulante.....	34

7.4	Marco legal y regulatorio.....	36
7.4.1	Acuerdo Gubernativo 236-2006	36
7.4.1.1	Capítulo VI - Parámetros para aguas residuales y valores de descarga al alcantarillado público.....	37
7.4.1.2	Capítulo IX - Seguimiento y evaluación.....	42
7.4.1.3	Capítulo X - Prohibiciones y sanciones.....	42
7.4.2	Compromisos de resolución de la licencia ambiental	42
7.4.3	Requisitos internos y de partes interesadas.....	43
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	45
9.	METODOLOGÍA	49
9.1	Tipo de estudio	49
9.2	Definición de variables.....	49
9.3	Fases de estudio	50
9.3.1	Fase 1: exploración bibliográfica.....	51
9.3.2	Fase 2: consolidación de datos históricos del análisis de agua residual.....	51
9.3.3	Fase 3: toma de muestra	52
9.3.4	Fase 4: medición de condiciones iniciales.....	53
9.3.5	Fase 5: ensayo de prueba de jarras.....	53
9.3.6	Fase 6: elaboración de curvas de consumo	54
9.3.7	Fase 7: determinación de la dosis óptima	56
9.3.8	Fase 8: determinación del porcentaje de reducción de concentraciones.....	56

9.3.9	Fase 9: análisis de resultados	57
9.3.10	Fase 10: presentación y discusión de resultados ...	58
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	59
11.	CRONOGRAMA	61
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	63
13.	REFERENCIAS	65
14.	APÉNDICES	69

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Esquema de tratamiento para agua residual	16
2.	Representación del método volumétrico manual	21
3.	Ejemplo diagrama de flujo de planta de tratamiento residual	26
4.	Coagulación - Flocculación	28
5.	Reacciones de coagulación con sulfato de aluminio	29
6.	Gradientes de velocidad.....	30
7.	Equipo utilizado para la prueba de jarras	34
8.	Turbidez frente a dosis de coagulante.....	35
9.	Relación de clarificación frente a dosis de coagulante	35
10.	Modelo de reducción progresiva DBO.....	39
11.	Parámetro de calidad asociado a DBO	40
12.	Límites máximos permisibles de descargas de aguas residuales al alcantarillado público.....	41

TABLAS

I.	Características físicas del agua residual y sus procedencias.....	17
II.	Características químicas del agua residual y sus procedencias	18
III.	Características biológicas del agua residual y sus procedencias	19
IV.	Criterios para preservación de muestras	22
V.	Definición de variables.....	49
VI.	Parámetros históricos de descarga de agua residual.....	51
VII.	Registro de condiciones de manipulación de muestras	52
VIII.	Concentraciones iniciales de muestra.....	53
IX.	Condiciones de operación ensayo de prueba de jarras.	53
X.	Concentración de coagulante y floculante utilizada para las 3 corridas.....	54
XI.	Datos para curva de consumo corrida 1	55
XII.	Datos para curva de consumo corrida 2.	55
XIII.	Datos para curva de consumo corrida 3	55
XIV.	Dosis óptima de coagulante y floculante.....	56
XV.	Porcentaje de reducción de concentraciones.....	57
XVI.	Eficacia del tratamiento a escala laboratorio.....	57
XVII.	Cronograma de actividades para la realización de la investigación	61
XVIII.	Recursos económicos.	63

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
°C	Grados centígrados
L	Litro
m³	Metros cúbicos
mg	Miligramos
NMP	Número más probable
pH	Potencial de hidrogeno
RPM	Revoluciones por minuto
s	Segundo
UTN	Unidades de turbidez

GLOSARIO

Aguas residuales	Son las aguas que han recibido uso y cuyas calidades han sido modificadas.
Alcantarillado publico	Conjunto de tuberías y obras accesorias utilizadas por la municipalidad, para recolectar y conducir las aguas residuales de tipo ordinario o de tipo especial, o combinación de ambas que deben ser previamente tratadas antes de descargarlas a un cuerpo receptor.
Caudal	Volumen de agua por unidad de tiempo.
Coagulación	Son reacciones físicas y químicas que en medio liquido provocan desestabilización química de las partículas para que posteriormente se pueda generar partículas más densas que el agua.
Floculación	Consiste en la agitación lenta de las partículas desestabilizadas que tienen una densidad mayor a la del agua para que choquen unas con otras y se aglutinen.

Límite máximo permisible	Es el valor asignado a un parámetro, el cual no debe ser excedido en las etapas correspondientes para aguas residuales y en aguas para reuso y lodos.
Muestra compuesta	Dos o más muestras simples que se toman en intervalos determinados de tiempo y que se adicionan para obtener un resultado de las características de las aguas residuales, aguas para reuso o lodos.
Parámetro	Es la variable que identifica una característica de las aguas residuales, aguas para reuso o lodos, asignándole un valor numérico.
Tratamiento de aguas residuales	Cualquier proceso físico, químico, biológico o una combinación de estos, utilizado para mejorar las características de las aguas residuales.

RESUMEN

El agua residual de tipo industrial para poder ser descargada requiere de tratamientos previos que garanticen la reducción de contaminantes. El presente diseño de investigación está basado en un tratamiento a escala laboratorio de agua industrial por medios físicos y químicos con el objetivo de verificar si es eficaz para tratar las descargas de la industria alimenticia en cuestión.

Inicialmente se caracterizarán las muestras tomadas para fijar los parámetros de descarga iniciales DBO, DQO, sólidos sedimentables y suspendidos y turbidez. Posterior a ello se empleará la técnica de coagulación y floculación con el método de prueba de jarras, en donde se analizarán 6 muestras con diferentes concentraciones de coagulante y floculante para después diagramar el comportamiento del parámetro turbidez en función del consumo de coagulante y determinar así la dosis óptima para el tratamiento. También se caracterizará finalmente la muestra con la dosis óptima para fijar los parámetros definidos después del tratamiento.

Con la comparación de los parámetros iniciales y finales se busca establecer una dosis óptima que reduzca en un porcentaje significativo los parámetros caracterizados para así poder implementar un tratamiento a escala real en la industria alimenticia y garantizar que esta cumpla con los requisitos legales e internos de descarga de aguas residuales.

1. INTRODUCCIÓN

La descarga sin tratamiento de agua residual de tipo especial, en este caso de procedencia industrial, puede llegar a ocasionar fuertes impactos ambientales negativos en el suelo, el agua y los ecosistemas que los rodean, por la alteración de las características que esta sufre al ser utilizada en los distintos procesos y que la hacen ser un contaminante. Adicional al deterioro ambiental cualquier persona individual o jurídica que descargue agua residual sin tratamiento puede ser sancionada o multada por incumplimiento de requisitos legales ambientales, así como incumplir con requisitos internos corporativos y de clientes.

Con este trabajo de investigación se propone determinar, a escala laboratorio, una dosis óptima de coagulante y floculante como tratamiento primario para una descarga de agua residual industrial en una industria manufacturera de alimentos de trigo, para que sirva como base en la implementación del tratamiento a escala real. Además, también se busca establecer un antecedente para empresas que quieran implementar tratamiento de aguas con características similares de descarga ya que actualmente existen investigaciones de tratamientos con esta técnica, pero no aplicados al mismo tipo de industria.

Se espera que mediante la dosis óptima determinada se pueda disminuir de una forma significativa la concentración de los parámetros del agua residual, para que en la implementación a escala real este sea eficiente y apoye a la empresa a reducir el impacto negativo que sus descargas generan en el ambiente y a estar en cumplimiento legal y de requisitos internos.

El método que se utilizará será el de la prueba de jarras y se llevará a cabo mediante el análisis en 3 corridas de una muestra de agua residual, determinando en cada una mediante curvas de consumo de coagulante la dosis óptima con base en el parámetro de turbidez. También se medirán las concentraciones iniciales de la muestra y las concentraciones de la muestra con la dosis óptima para determinar la reducción de parámetros después del tratamiento. Este experimento es factible de realizar ya que se cuenta con la aprobación de la empresa en cuestión para la toma de muestras y para el presupuesto de los gastos de los análisis fisicoquímicos.

En el capítulo 1, se presentan los antecedentes más importantes que dan pauta a la utilización de esta técnica en tratamiento de aguas con distintos enfoques. En el capítulo 2, se hará una revisión bibliográfica de los fundamentos teóricos sobre los que está basada la investigación, tales como tipos de aguas residuales y su tratamiento, coagulación y floculación y el marco legal y regulatorio. En el capítulo 3, se consolidará la información de los análisis históricos de agua residual. En el capítulo 4, se presentará la metodología para la toma y resguardo de las muestras. En el capítulo 5, se plasmarán los parámetros de las concentraciones iniciales de la muestra. En el capítulo 6 se detallará lo obtenido en el ensayo de prueba de jarras y las condiciones de operación utilizadas para el experimento. En el capítulo 7 se elaborarán las curvas de consumo para plasmar la dosis óptima de coagulante y floculante en el capítulo 8.

En el capítulo 9 se analizarán los resultados obtenidos mediante el porcentaje de reducción de parámetros y en el capítulo 10 se realizará la presentación y discusión de los resultados. Finalmente se darán conclusiones del trabajo de investigación y recomendaciones para oportunidades de mejora o continuidad de esta.

2. ANTECEDENTES

En Guatemala se han encontrado estudios publicados acerca de tratamiento de aguas residuales y potables utilizando procesos de floculación y coagulación, mediante sustancias químicas y naturales. A continuación, se presentan algunos casos de estudio acorde al tratamiento de aguas utilizando esta técnica.

Turcios (2017) de la Universidad de San Carlos de Guatemala, realizó su trabajo de graduación de maestría titulado *Uso de semilla de moringa oleifera como coagulante orgánico en el tratamiento de agua para consumo humano*, en el cual realiza la comparación de eficiencia para la semilla de moringa como coagulante para reducir turbidez, respecto a otros coagulantes naturales, semilla de tamarindo y almidón de yuca, estudiados previamente por la institución ERIS. Posterior al tratamiento de mediante un ensayo de jarras, en donde se utilizó agua con una turbiedad de 500 UNT, concluyó que no es factible utilizar este compuesto orgánico para el tratamiento, midiendo el parámetro de turbidez, ya que presentó valores de eficiencia del 20 y 23 %, muy por debajo de los valores de eficiencia de los estudios con los otros compuestos, semilla de tamarindo y almidón de yuca, que presentaron valores de eficiencia del 40 y 53 % respectivamente.

En la publicación *Remoción de arsénico por floculación y filtración directa del agua subterránea del municipio de San Rafael Las Flores, Santa Rosa, Guatemala*, Estrada y Szarata (2016), diseñaron una planta de tratamiento de potabilidad de agua para consumo humano. Proponiendo que, el arsénico se encuentra en forma de suspensión y no disuelto como hipótesis, se planteó

removerlo con floculación y filtración. Se trató el agua mediante las técnicas mencionadas y luego de un año y un mes de monitoreo y ensayos de forma experimental, se obtuvieron concentraciones de arsénico de 0.019 mg/L en promedio, en el agua cruda y 0.005 mg/L en el agua tratada por las técnicas antes mencionadas, con dosificación de 25 mg/L. Después del estudio se concluyó que la floculación y filtración directa es efectiva para remover este contaminante por debajo del límite permitido de 0.010 mg/L para el agua potable.

Internacionalmente también se ha investigado acerca del tratamiento de aguas por floculación y coagulación, aplicándolos para procesos relacionados con clarificación, aguas residuales e incluso desarrollo de metodologías mediante software para optimización de procesos de coagulación y floculación. Los estudios encontrados se presentan a continuación.

En la publicación *Tratamiento del agua residual de un matadero: Eficiencia del proceso de coagulación-floculación*, Azabache, Murrieta, García y Cáceres (2020), analizaron muestras de 500 ml de agua descargada del matadero utilizando sulfato de aluminio (1 %) y cloruro férrico (1 %) como agentes coagulantes, polímero catiónico (1 %) como agente floculante y variaciones de gradientes de velocidad. Posterior al análisis concluyen que los resultados óptimos se obtuvieron al añadir 6 ml de sulfato de aluminio; 1 ml de polímero catiónico, una velocidad de mezcla de 200 rpm y tiempo de sedimentación de 25 minutos, mostrando disminuciones en las concentraciones de turbiedad, oxígeno disuelto y STD. Asimismo, la adición de 2 ml cloruro férrico, 0,75 ml de polímero catiónico, una velocidad en mezcla rápida de 300 rpm y tiempo de sedimentación de 35 minutos, permitieron obtener como resultado disminución en concentraciones de oxígeno disuelto, STD y nitratos.

En la publicación *Evaluación de la eficiencia de los procesos de coagulación-floculación y ozonización a escala de laboratorio en el tratamiento de aguas residuales municipales*, Vélez, Llanes y Fernández (2010), evalúan a escala de laboratorio ambos procesos en simultaneo, con el objetivo de conseguir aguas con características microbiológicas y fisicoquímicas de forma que permitan su vertimiento seguro o su reúso. Se empleó sulfato de aluminio como coagulante en dosis entre 6 y 100 mg/L y un polímero catiónico comercial como floculante en dosis de 0,5 mg/L. Posterior a evaluar los parámetros en cuestión, el tratamiento combinando ambas técnicas, coagulación y floculación, resulto eficiente con remociones de contaminantes fisicoquímicos y de coliformes fecales superiores al 90 y 99.9 % respectivamente.

En la publicación *Evaluación experimental del poder coagulante de extractos naturales empleados en la clarificación de aguas*, Torres, De la Peña, Gallegos, Rosales y Hernández (2017), evalúan el poder coagulante de extractos naturales obtenidos, a partir cladodios de cactácea y a partir de cascara de manzana. En el experimento de prueba de jarras las variables analizadas en la etapa experimental fueron el pH y la dosificación de extracto y la variable controlada medida fue la turbiedad. Las condiciones ideales de operación se obtuvieron basándose en el análisis estadístico de los datos obtenidos en la etapa experimental con la ayuda de un software especializado. Los extractos obtenidos demostraron ser eficaces en el proceso de remoción de turbidez del agua, logrando obtener resultados superiores al 80 % con dosis relativamente iguales a las plasmadas en la literatura al emplear un coagulante metálico para uso comercial.

En la publicación *Diseño de un Experimento de Optimización del Proceso de Coagulación-Floculación de Aguas en el Laboratorio de Química*, Devesa-Rey, Rodríguez y Urrejola (2017), determinan la forma de optimizar un

tratamiento por coagulación-floculación de aguas residuales con alto contenido de materiales suspendidos, utilizando un software llamado Statgraphics. Para llevar a cabo el diseño establecieron que se debe hacer un estudio preliminar de los coagulantes empleados a nivel comercial en la industria. Asimismo, realizar una búsqueda de coagulantes alternos y posterior a ello elegir tres coagulantes, para realizar un análisis preliminar y determinar cuál de los seleccionados produce los mejores resultados para el tratamiento. Una vez determinado el coagulante más funcional se realiza la optimización mediante el software, estudiando y modificando las variables que consideren que más impacto tienen en el proceso.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Según el historial de análisis de parámetros de la descarga de agua residual, en la industria manufacturera de alimentos en cuestión, se ha determinado que es necesario implementar un tratamiento de aguas residuales para el cumplimiento de requisitos legales, internos y de partes interesadas aplicables.

La descarga de agua residual es alimentada por las aguas resultantes del lavado de moldes y utensilios de producción. Estos contienen restos de mezclas de harina y se utilizan en la formulación y elaboración de los productos, por lo cual el agua puede contener almidones, gluten y soya; estos componentes están presentes sin riesgo a que sufran un proceso de gelatinización, ya que no proviene de restos de harina sometida a procesos térmicos. La carga de harina mezclada en el agua es alta ocasionando así que se pueda presentar un incumplimiento en los parámetros de materia flotante, sólidos suspendidos y demanda bioquímica de oxígeno. Dentro del proceso de lavado también se utilizan químicos para realizar procedimientos de limpieza y desinfección por lo que estos también aportan características al agua de esta descarga.

Los químicos de limpieza y desinfección utilizados son de tipo alcalino, al entrar en contacto con el agua forman iones de nitrógeno y fósforo, contribuyendo así en la alteración de la concentración de nitrógeno y fósforo total y en el aumento del pH del agua. En resumen, los parámetros mencionados anteriormente generan incumplimiento debido a la falta de un sistema de tratamiento de agua residual en esta descarga, ya que actualmente está conectada de forma directa al alcantarillado. Este incumplimiento de requisitos

podría llegar a incurrir en multas, demandas, pérdida de confiabilidad y daños al ambiente mediante la contaminación de suelos y agua.

Dentro de las negociaciones con clientes industriales y licenciarios de marcas privadas, que figuran como partes interesadas de la organización, se establecen acuerdos de sostenibilidad y requisitos ambientales que se ven vulnerables ante este incumplimiento, pudiendo llegar a detener las relaciones comerciales que con ellos se tienen.

Otra de las consecuencias amarradas a esta problemática es que, al no tener tratamiento en la descarga en el agua residual, el sistema de gestión ambiental implementado en la empresa es ineficaz ya que dentro de sus objetivos esta la parte del cumplimiento de requisitos ambientales aplicables a aguas residuales. Presentando así una baja en los indicadores de eficiencia del sistema e incumpliendo las políticas internas de sostenibilidad.

Esto lleva a plantear la pregunta principal de este estudio: ¿Se logrará evaluar la dosis óptima de coagulante y floculante como tratamiento de agua residual en una industria de alimentos?

Para responder a esta interrogante se deberán contestar las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿Cuáles son los parámetros de descarga del agua sin tratamiento?
- ¿Cuál es la dosis óptima de coagulante y floculante para el tratamiento de agua?
- ¿Cuáles son los parámetros después del tratamiento por coagulación y floculación?
- ¿Será eficiente el proceso de coagulación y floculación como tratamiento para el agua residual?

4. JUSTIFICACIÓN

La realización de la presente investigación se justifica en la línea de investigación sobre gestión y tratamiento del agua, del área de gestión ambiental de la Maestría en Energía y Ambiente.

Para aguas residuales, la coagulación y floculación es una de las técnicas más comunes utilizadas como tratamiento primario por la versatilidad del proceso al poder utilizar distintos tipos de coagulantes y floculantes, químicos y naturales, y por la eficiencia de la técnica en el tratamiento de aguas demostrado en distintas investigaciones. Es por lo que se selecciona esta técnica para realizar un tratamiento, a escala laboratorio, que aportará datos de eficiencia en el tratamiento de aguas residuales de industrias alimenticias que sus productos sean elaborados a base de harina de trigo o con aguas residuales de características similares.

Este trabajo de investigación determinará una dosis óptima de coagulante y floculante, mediante un ensayo de jarras, que disminuya los parámetros de descarga de agua residual, para el tipo de agua de la industria alimenticia en cuestión. También se determinará el porcentaje de reducción de parámetros de descarga para establecer que tan eficiente es el tratamiento en este tipo de agua utilizando una sal metálica disociable y una poliacrilamida.

Con esta investigación se darán datos que aporten para poder implementar un efectivo tratamiento primario de las aguas descargadas, mediante la técnica de coagulación y floculación, en la industria alimenticia. También se busca dar un antecedente para futuras investigaciones que involucren esta misma técnica en

industrias de alimentos que elaboren productos a base de trigo o que tengan características similares.

Este estudio beneficiará a la industria a poder realizar una adecuada gestión de sus aguas residuales y así contribuir con la eficacia de su sistema de gestión ambiental. También generará un impacto positivo en el ambiente ya que contribuirá en la implementación de tratamiento de aguas residuales, mitigando así el impacto de contaminación de aguas y suelo.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Proponer una dosis óptima de coagulante y floculante como tratamiento de agua residual en una industria de alimentos.

5.2. Específicos

- Indicar los parámetros de descarga del agua sin tratamiento.
- Definir la dosis óptima de coagulante y floculante para el tratamiento de agua.
- Determinar los parámetros después del tratamiento por coagulación y floculación.
- Analizar si el proceso de coagulación y floculación es eficiente como tratamiento para el agua residual.

6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

De acuerdo con la problemática planteada en el presente trabajo de investigación se identifica la necesidad de implementar un tratamiento de aguas residuales en una industria de manufactura de alimentos. Para esto se determinará, a escala laboratorio, una dosis óptima de coagulante y floculante que sirva como base para implementar el tratamiento de agua residual a escala real.

La necesidad de un tratamiento radica principalmente en que el agua que se descarga se utiliza para limpieza de equipos, por lo que contiene restos de harina y químicos. Estos componentes le dan características al agua residual que puedan elevar los parámetros de descarga: demanda bioquímica de oxígeno, materia flotante, sólidos suspendidos y pH. La determinación de la dosis óptima de coagulante y floculante se realizará tomando en cuenta la eficacia de la dosis, comparando los parámetros antes y después del tratamiento a escala laboratorio.

Se ha determinado que el no contar con tratamiento de aguas residuales hace que el sistema de gestión ambiental implementado en la empresa sea ineficaz pues se incumplen requisitos internos, legales y de partes interesadas que en algún momento dado puedan llevar a contaminar el ambiente, incurrir en multas y afectar las relaciones comerciales. Este trabajo de investigación está contemplado como la base para que la empresa en cuestión inicie la fase uno del proyecto de tratamiento de aguas residuales.

Al presentar los resultados de la investigación se beneficiará a la empresa ya que la misma está contemplada como fase inicial para el proyecto de

tratamiento de aguas y también servirá como un antecedente para empresas que quieran implementar tratamiento de aguas con características similares de descarga.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Aguas residuales

De acuerdo con el Acuerdo Gubernativo 236 del año 2006, se denomina aguas residuales a todas las aguas que hayan sido utilizadas y que como efecto de este uso su calidad sea modificada. Por la clase de uso se clasifican en aguas de tipo ordinario y especial.

7.1.1. Agua residual de tipo especial

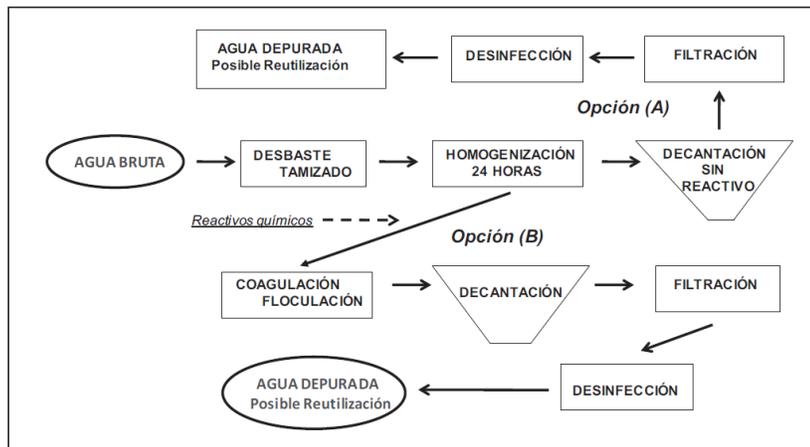
Se les llama aguas residuales especiales a las descargas por servicios públicos y municipales y a las vertidas como resultado de actividades derivadas con la agricultura, industria pecuaria, industria, hospitales y todas aquellas que no sean clasificadas de tipo ordinario, así como la mezcla entre vertidos de tipo ordinarios y especiales (Acuerdo Gubernativo 236, 2006).

7.1.2. Agua residual en la industria alimenticia

Las aguas residuales en esta clase de industria constituyen todos los desechos líquidos provenientes de una fábrica o empresa que produce cualquier clase de alimento derivado de sus procesos de producción. En el sector de fabricación de productos elaborados con maíz y trigo, las aguas descargadas presentan un contenido elevado para materia orgánica, con altas cargas de DQO, materia suspendida y en algunos casos grasas. También pueden encontrarse cantidades significativas de detergentes derivado del lavado de utensilios y equipos utilizados en el proceso de manufactura de los productos (Marín, 2013).

En la figura 1 se muestra un esquema general del tratamiento de este tipo de agua residual.

Figura 1. **Esquema de tratamiento para agua residual**



Fuente: Marín. *Procesos fisicoquímicos en depuración de aguas*. Consultado el 24 de octubre de 2020. Recuperado de <http://www.editdiazdesantos.com/wwwdat/pdf/9788499693873.pdf>

7.1.3. **Parámetros de calidad del agua residual**

Todas las aguas ya sea naturales o residuales contienen sustancias presentes en su composición. En su mayoría las aguas residuales industriales están compuestas por las características que aporta el agua limpia utilizada en los procesos y las impurezas que se le añaden durante el uso en los distintos procesos, estas impurezas pueden ser cargas de materia orgánica o mineral, sustancias químicas, grasas y fibras (Fair *et. al.*, 1954). Para tener una cuantificación de estas impurezas adicionadas es necesario determinar y analizar las características químicas, físicas y biológicas presentes en la muestra tomada de agua para estudiar (Noyola, 2000).

7.1.3.1. Características físicas

La determinación de las características físicas para agua residual se encuentra dentro de los parámetros significativos para medir la calidad del agua, siendo más relevantes que las características químicas y biológicas. De esto se deriva que en el proceso de tratamiento de aguas se busca obtener un agua incolora, inodora e insípida (Noyola, 2000). La tabla I plasma las características físicas más utilizadas para determinar la calidad de agua residual y su origen.

Tabla I. **Características físicas del agua residual y sus procedencias**

Característica	Procedencia
Color	Se debe a agentes colorantes sintéticos o naturales utilizados en procesos industriales.
Olor	Presencia de residuos resultantes de procesos industriales, generalmente en descomposición.
Sólidos	Residuos resultantes de procesos industriales.
Temperatura	Agua sometida a procesos térmicos industriales.
Turbiedad	Presencia de partículas suspendidas y materia coloidal.

Fuente: Metcalf y Eddy. *Ingeniería de Aguas Residuales*. Consultado el 24 de octubre de 2020.

Recuperado de <https://civilmas.net/libros/ingenieria-de-aguas-residuales-metcalf-eddy/>

7.1.3.2. Características químicas

Estas características de agua residual tienden a ser más específicas y se utilizan para medir propiedades de agua con origen químico. Se analizan estos parámetros para poder determinar la naturaleza de esta y poder así obtener

información que determine la viabilidad de los tratamientos a utilizar y las propiedades que aportará a donde sea vertida (Noyola, 2000). Las características químicas más comunes medidas para calidad de agua residual y sus procedencias se describen en la tabla II.

Tabla II. **Características químicas del agua residual y sus procedencias**

Característica	Procedencia
Demanda de oxígeno	Presencia de materia orgánica residual resultante de procesos industriales.
Fosforo	Uso de detergentes industriales y agentes químicos utilizados en limpiezas.
Aceites y grasas	Residuales de aceites y grasas utilizados en los procesos de manufactura o de mantenimiento.
Metales pesados	Presencia residual de materias primas o sustancias utilizadas en los procesos de producción o mantenimiento.
Nitrógeno	Uso de proteínas, aminoácidos, urea o sales amoniacales en los procesos productivos. También puede ser por alta carga de heces fecales.
pH	Presencia de partículas en suspensión y materia coloidal.

Fuente: Metcalf y Eddy. *Ingeniería de Aguas Residuales*. Consultado el 24 de octubre de 2020.
 Recuperado de <https://civilmas.net/libros/ingenieria-de-aguas-residuales-metcalf-eddy/>

7.1.3.3. Características biológicas

Estas características son las más sensibles para su medición en el agua residual. Nos sirven para cuantificar e identificar la presencia de microorganismos procedentes generalmente de toda la materia orgánica que pueda estar

involucrada en la descarga de agua. También la presencia de estos parámetros nos puede dar un indicador de contaminación microbiológica en alguna etapa del proceso (Noyola, 2000). La tabla III detalla los parámetros biológicos más comunes.

Tabla III. **Características biológicas del agua residual y sus procedencias**

Característica	Procedencia
Protistas	Uso de materia orgánica con microorganismos o presencia de microorganismos en etapas del proceso productivo
Virus	Principalmente proceden del agua descargada con heces fecales humanas

Fuente: Metcalf y Eddy. *Ingeniería de Aguas Residuales*. Consultado el 24 de octubre de 2020. Recuperado de <https://civilmas.net/libros/ingenieria-de-aguas-residuales-metcalf-eddy/>

7.1.4. Caracterización del agua residual

Para poder determinar los parámetros de agua residual mediante análisis de laboratorio es necesario poder tomar muestras de esta mediante métodos aprobados y garantizar su preservación para evitar alteración en los resultados.

7.1.4.1. Caudal

La medición del caudal en una descarga de agua residual es indispensable ya que establece una base fundamental para la proyección de cargas, instalaciones de conducción, tratamiento y descarga del agua para tratar. En la industria el caudal descargado es muy variable de acuerdo con la naturaleza del

proceso, en el caso de las industrias alimenticias que elaboran productos derivados de harinas de trigo se estima que se descarga un caudal de agua residual de entre 2-4 m³/ton producto (Metcalf *et. al.*, 1995).

Para la medición del caudal se debe tomar el método que se adapte mejor al sitio de descarga que exista. En caso no exista algún método que se adapte completamente se puede utilizar uno de referencia y hacer modificaciones (ANDI, 1997).

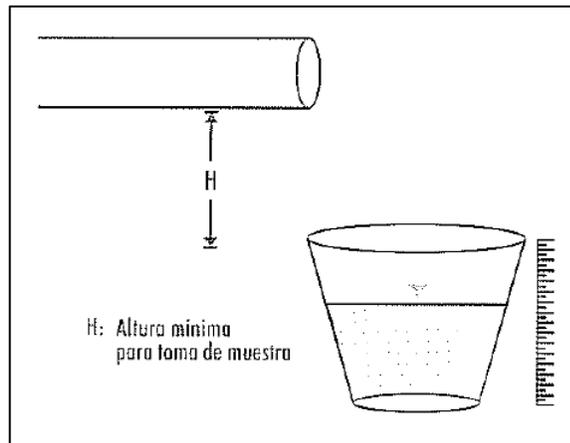
7.1.4.1.1. Medición de caudal volumétrico manual

Con este tipo de técnica se utiliza un recipiente graduado o aforado y un cronometro. El procedimiento consiste en tomar una muestra y medir el tiempo en que se llena el recipiente. La relación de estas dos variables permite conocer el caudal y se determina mediante la ecuación 1.

$$Q = \frac{V}{t} \quad (1)$$

Donde el caudal Q se mide en (l/s), el volumen V en (L) y el tiempo en (s) (ANDI, 1997).

Figura 2. **Representación del método volumétrico manual**



Fuente: Asociación Nacional de Empresarios de Colombia. *Manual de Caracterización de Aguas Residuales Industriales*. Consultado el 20 de octubre de 2020. Recuperado de: <https://www.acodal.org.co/holland/memorias/Taller%20Vertimientos/MANUAL%20DE%20CARACTERIZACION%20DE%20AGUAS%20RESIDUALES%20INDUSTRIALES.pdf>

7.1.4.2. Toma de muestras

Para realizar la toma de muestra es necesario seleccionar un sitio en donde el agua presente características representativas, ya que pueden no estar uniformemente mezcladas o presentar distintas calidades en diferentes puntos (Sierra, 2011).

También es importante conocer el proceso de donde proviene el agua descargada para determinar si la calidad de agua es uniforme o presenta variabilidad. Si es uniforme, una muestra simple única podrá servir para la determinación, pero si el caudal presenta variabilidad se debe tomar una muestra compuesta de acuerdo con el caudal medido (Noyola, 2000).

7.1.4.2.1. Manipulación de muestras

ANDI (1997) indica que la toma de muestras es una fase de las más importantes para la confiabilidad de los resultados y para evitar alteraciones se debe tener en cuenta los enjuagues de recipientes, recolección de volumen adecuado, identificación de las muestras y la correcta preservación de estas. Los criterios para la preservación se detallan a continuación en la tabla IV.

Tabla IV. **Criterios para preservación de muestras**

Parámetro	Recipiente	Preservación	Tiempo máximo
DBO y DQO	Plástico o vidrio	Refrigeración	48 horas
Sólidos	Plástico o vidrio	Refrigeración	7 días
Turbidez	Plástico o vidrio	Refrigeración, oscuridad	48 horas

Fuente: Asociación Nacional de Empresarios de Colombia. *Manual de Caracterización de Aguas Residuales Industriales*. Consultado el 20 de octubre de 2020. Recuperado de: <https://www.acodal.org.co/holland/memorias/Taller%20Vertimientos/MANUAL%20DE%20CARACTERIZACION%20DE%20AGUAS%20RESIDUALES%20INDUSTRIALES.pdf>

7.1.5. Efectos de las descargas de aguas residuales

Las aguas residuales son descargadas generalmente a cuerpos receptores, estos contaminantes ocasionados por actividades humanas son los que degradan de una forma significativa la calidad del agua de los cuerpos provocando la muerte de toda vida presente y dejándolos sin usos benéficos para las poblaciones (Valdez *et. al.*, 2003).

Dentro de los impactos ambientales significativos ocasionados por el vertido de aguas residuales sin tratamiento se encuentra la disminución en la concentración de oxígeno disuelto, formación de depósito de lodos, oxidación de

contaminantes, descomposición de materiales orgánicos y nitrogenados, crecimiento de bacterias y aceleración de la eutrofización (Ramalho, 1983).

7.2. Tratamiento de aguas residuales

Los contaminantes presentes en los flujos de agua residual pueden ser eliminados previo a su descarga mediante procesos físicos, químicos y biológicos. Los métodos pueden ser clasificados individualmente como operaciones unitarias físicas, operaciones químicas y operaciones biológicas. Dependiendo de los contaminantes y los objetivos que se tengan para tratamiento de aguas estos pueden utilizarse por separado o juntos (Metcalf *et. al.*, 1995).

7.2.1. Clasificación de métodos de tratamiento

Los métodos de tratamiento se clasifican de acuerdo con su naturaleza y principio de actuación. Estos pueden ser químicos, físicos y/o biológicos.

7.2.1.1. Tratamientos físicos

En esta clasificación se utiliza la acción de fuerzas físicas conocidas como operaciones unitarias, este tipo de tratamiento fue de los primeros en ser aplicados al tratamiento de aguas residuales y entre las operaciones que se pueden aplicar están mezclado, sedimentación, flotación, transferencia de gases, floculación y desbaste (Metcalf *et. al.*, 1995).

7.2.1.2. Tratamientos químicos

En este tipo de tratamiento lo que se busca es eliminar o convertir los contaminantes presentes en el agua residual mediante la aplicación de agentes químicos y desarrollo de reacciones químicas. Para realizar este tipo de tratamientos las operaciones más comunes son precipitación, adsorción y desinfección.

7.2.1.3. Tratamientos biológicos

La principal función de este tipo de tratamiento es la eliminar los contaminantes orgánicos biodegradables presentes tanto en forma disuelta como coloidal. La eliminación se da principalmente por tejido celular biológico eliminado por sedimentación y por sustancias que se convierten en gases para ser liberadas a la atmosfera. Otra aplicación importante es que mediante este tipo de tratamiento se puede eliminar el nitrógeno contenido en el agua residual.

7.2.2. Diagramas de flujo de tratamientos

Para un adecuado tratamiento los procesos mencionados anteriormente se deben combinar y complementar para poder crear diversos niveles de tratamiento de agua residual. De acuerdo con (Ramalho, 1983) la selección de los niveles de tratamiento debe hacerse considerando los siguientes factores:

- Características del agua residual: DBO, DQO, materia en suspensión, pH y otros contaminantes específicos.
- Requerimientos para el efluente después del tratamiento.

- Disponibilidad económica y de infraestructura para poder implementar los tratamientos.
- Consideraciones para futuras ampliaciones o crecimiento de operaciones.

7.2.2.1. Tratamiento primario

Con este tratamiento se busca eliminar un porcentaje de sólidos y materia orgánica en suspensión del agua residual. En esta etapa suelen realizarse las operaciones físicas, como la sedimentación. Una característica de la descarga después del tratamiento primario es que contiene una cantidad de DBO alta y carga de materia orgánica, por lo que en muchas ocasiones se necesita complementar con un tratamiento posterior (Ramalho, 1983).

7.2.2.2. Tratamiento secundario

El tratamiento secundario para descarga de agua residuales está orientado principalmente a eliminar compuestos específicos, orgánicos biodegradables y sólidos en suspensión mediante procesos químicos. Esta etapa en tratamiento de aguas se define como la unión de distintas técnicas empleadas para la eliminación de estos contaminantes, apoyándose de tratamientos biológicos, reactores, sistemas de lagunas y sedimentación (Metcalf *et. al.*, 1995).

7.2.2.3. Tratamiento terciario

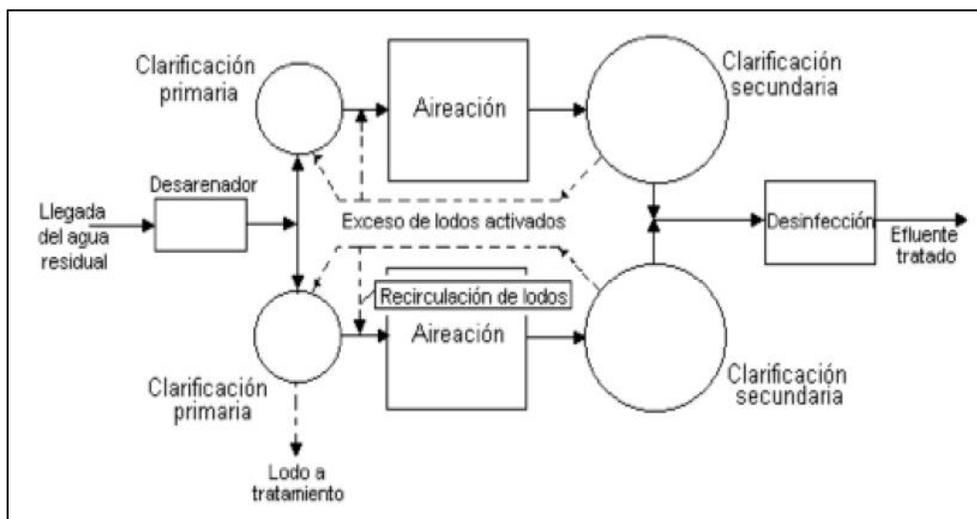
A esta tercera etapa del tratamiento de aguas se le conoce también como tratamiento avanzado, ya que puede incluir los tres tipos de tratamiento físico, químico y biológico para poder conseguir objetivos de remoción de contaminación más específicos en el agua tratada, que no se pueden lograr

mediante tratamiento secundario (Ramalho, 1983). Entre las técnicas utilizadas en este tipo de tratamiento podemos encontrar intercambio iónico, osmosis inversa, adsorción y electrodiálisis.

7.2.2.4. Criterios para diseño

Para el diseño de un sistema de tratamiento se debe tomar en cuenta distintos factores para garantizar el correcto funcionamiento. Entre estos aspectos están la experiencia de la persona a cargo del diseño, requisitos legales, disponibilidad de equipos para tratamientos, inversión inicial y costos de operación y mantenimiento (Valdez, 2003). En la figura 3 se muestra un ejemplo genérico del diseño de un sistema de tratamiento para agua residual, plasmando los tipos de tratamiento mencionados anteriormente.

Figura 3. Ejemplo diagrama de flujo de planta de tratamiento residual



Fuente: Valdez. *Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales*.

Consultado el 20 de octubre de 2020. Recuperado de

http://siar.minam.gob.pe/puno/sites/default/files/archivos/public/docs/ingenieria_de_los_sistemas_de_tratamiento_y_disposicion_de_aguas_residuales_civilgeeks.pdf

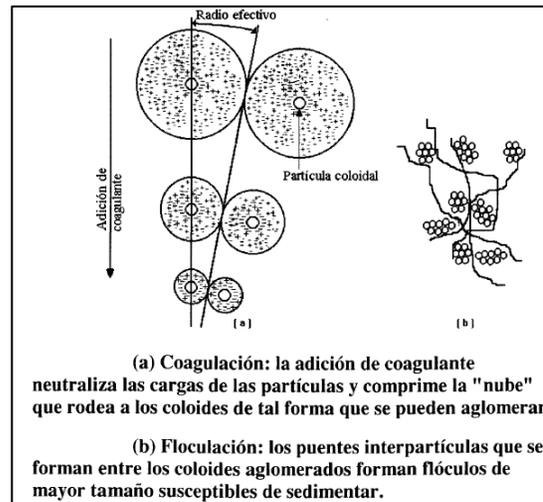
7.3. Coagulación - Floculación

La coagulación - floculación es una de las técnicas más viables para tratamiento de aguas utilizada en la industria ya que presenta una alta eficiencia y aun siendo procesos naturalmente distintos, ya que la coagulación es un proceso puramente químico y la floculación es un proceso físico, es muy usual encontrarlos asociados (Marín, 2013).

Mediante la combinación de estos dos procesos se obtienen remociones de entre 80-90% de materia total suspendida, del 30-60% de DQO, del 40-70% de DBO y del 80-90% de bacterias. Este tipo de combinación de procesos es aplicable en las siguientes situaciones específicas (Noyola, 2000):

- Como pretratamiento o complemento de un tratamiento primario, ya que aumenta la eficiencia de los tratamientos siguientes mediante la alta eliminación de materia coloidal.
- Cuando existen en el agua residual contaminantes que no son biodegradables y si hay necesidad de sedimentar sólidos suspendidos y coloidales.
- Cuando se tiene un agua con gran cantidad de compuestos tóxicos.
- Si se tiene disponibilidad de los reactivos químicos seleccionados para el tratamiento y son viables económicamente.

Figura 4. **Coagulación – Floculación**



Fuente: Noyola. *Alternativas de tratamiento de aguas residuales*. Consultado el 20 de octubre de 2020. Recuperado de https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/NOYOLA%20et%20al%202000.%20Alternativas%20de%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales._0.pdf

7.3.1. **Coagulación**

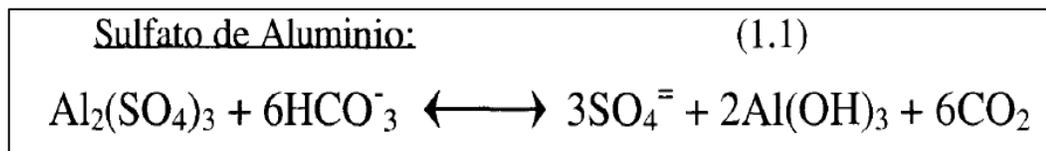
Para poder describir el concepto de coagulación es necesario conocer el estado de los sólidos coloidales en el agua, estos se encuentran suspendidos con una carga electrostática en la superficie que provoca la repulsión entre partículas, ocasionando que estas no puedan agruparse para formar conglomerados de partículas de mayor tamaño (Noyola, 2000).

La coagulación entonces consiste en agregar reactivos químicos al agua residual para desestabilizar las cargas coloidales de las partículas mediante la disminución del potencial Z. Esta desestabilización sucede por el contacto que se establece entre las partículas coloidales suspendidas y las partículas de carga

positiva de las sales disociables agregadas. El punto ideal para este proceso es cuando en la coagulación el potencial Z alcanza su más bajo nivel, que es cuando las fuerzas entre partículas prevalecen (Martínez, 1999).

Los reactivos más utilizados en la industria son sales hidrolizables con iones metálicos de hierro y aluminio. Estos al hidrolizarse forman rápidamente precipitados que son insolubles, el propósito es poder formar flóculos densos y fácilmente sedimentables (Noyola, 2000). En la figura 5 se muestra una de las reacciones químicas más comunes que tienen lugar en la coagulación.

Figura 5. **Reacciones de coagulación con sulfato de aluminio**



Fuente: Noyola. *Alternativas de tratamiento de aguas residuales*. Consultado el 20 de octubre de 2020. Recuperado de https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/NOYOLA%20et%20al%202000.%20Alternativas%20de%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales._0.pdf

7.3.2. Floculación

Este proceso consiste en aglomerar las partículas coloidales suspendidas mediante la ayuda física de un mezclado o con ayuda de un coagulante químico. El objetivo es formar conglomerados de partículas de un tamaño tal que sean posibles separar del agua residual por procesos subsecuentes como filtración o sedimentación. Para lograr una floculación ideal es necesario realizar el mezclado por medios mecánicos o hidráulicos (Noyola, 2000).

El criterio de operación más importante a tomar en cuenta es el gradiente de velocidad, ya que este dependerá la formación y fuerza del floculo resultante, mientras más frágil el floculo menor gradiente de velocidad de mezclado necesita (Martínez, 1999). En la figura 6 se muestran los gradientes de velocidad utilizados para distintas aguas residuales.

Los floculantes generalmente son polielectrolitos y polímeros con pesos moleculares muy elevados. Estos floculantes pueden ser: orgánicos, minerales, naturales y orgánicos de síntesis. Los más comunes son la sílice o las poliacrilamidas (Cárdenas, 2000).

Figura 6. **Gradientes de velocidad**

Agua residual	Gradiente de velocidad G (s ⁻¹)
Flóculos frágiles, ej. flóculos biológicos	10 - 30
Flóculos de fuerza media, ej. flóculos presentes al remover la turbiedad	20 - 50
Flóculos químicos, ej. flóculos formados en los procesos de precipitación.	40 - 100

Fuente: Noyola. *Alternativas de tratamiento de aguas residuales*. Consultado el 20 de octubre de 2020. Recuperado de https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/NOYOLA%20et%20al%202000.%20Alternativas%20de%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales._0.pdf

7.3.3. **Condiciones de operación y equipo**

Las condiciones de operación deben ser tales que permitan realizar el proceso de una forma eficaz. Para esto se debe tener una dosis óptima de coagulante y floculante. Si a la muestra que se va a tratar se le adiciona menos

coagulante que la dosis óptima no se formaran los flóculos esperados o serán tan pequeños que no logran sedimentar. Caso contrario si se añade en exceso se formula un floculo denso y esponjoso que tenderá a romperse con la agitación del proceso (Martínez, 1999).

Para poder determinar esta dosis óptima a utilizar en el tratamiento de agua residual es necesario poder escoger los reactivos ideales y poder probarlos en un laboratorio, a escala piloto, mediante una prueba de jarras también conocidas como pruebas de tratabilidad, tomando principalmente en cuenta el tipo de agua a tratar (Noyola, 2000).

Para seleccionar el coagulante optimo se recomienda utilizar sales hidrolizables de hierro y aluminio, ya que, al reaccionar con el agua a tratar, los flóculos que se forman como producto de la hidrolisis son mucho más eficaces que los iones. Lo que se forma son hidróxidos de hierro o aluminio que son insolubles en agua por lo cual son ideales para formar los precipitados (Cárdenas, 2000).

7.3.4. Pruebas de tratabilidad

La selección de los reactivos a utilizar, el tiempo de agitación y demás parámetros para el tratamiento de aguas se deben determinar mediante pruebas de tratabilidad a escala laboratorio para que luego los resultados óptimos sean escalados a escala real. La prueba de tratabilidad más común para coagulación y floculación es la prueba de jarras (Martínez, 1999).

7.3.4.1. Prueba de jarras

La prueba de jarras es un método utilizado para estudiar a escala laboratorio el comportamiento de un sistema para tratamiento de aguas residuales por coagulación y floculación añadiendo cantidades de reactivos químicos con concentraciones conocidas. Esta prueba se opera normalmente con vasos de precipitado de 1L de capacidad, en los cuales se introduce un sistema de agitación mecánico, con velocidades de giro variables y regulables. El procedimiento consiste en añadir dosis en aumento del reactivo definido y con condiciones dadas de tiempo y velocidad de agitación y sedimentación. Luego se procede a hacer un análisis del comportamiento del agua con las distintas condiciones. (Marín, 2013).

En este tipo de prueba es de gran importancia realizar una correcta mezcla y agitación de los reactivos químicos que permita su distribución y crecimiento de los flóculos. Para eso es necesario determinar la potencia requerida para la agitación del líquido y la velocidad del agitador. La potencia necesaria para el agitador se determina a partir de la Ecuación 2, donde P es la potencia en (W), G es el gradiente de velocidad (s^{-1}), μ es la viscosidad del agua en ($Pa \cdot s$) y V es el volumen del recipiente en (m^3) (Miranda *et. al.*, 2018).

$$P = G^2 \cdot \mu \cdot V \quad (2)$$

Ya con el dato conocido de potencia es necesario determinar la velocidad del agitador, la cual se calcula mediante la Ecuación 3, donde n es la velocidad del agitador en (rev/s), P es la potencia del agitador en (W), N_p es el número de potencia, D_i es el diámetro del agitador en (m) y ρ es la densidad del fluido en (kg/m^3) (Miranda *et. al.*, 2018).

$$n = \left[\frac{P}{N_p \cdot D_i^5 \cdot \rho} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

De acuerdo con (Marín, 2013) el procedimiento estandarizado para un ensayo de prueba de jarras consiste en:

- Preparar la disolución de reactivo a utilizar y aplicar al agua residual a tratar.
- Agitar la mezcla de agua a tratar con reactivo en un tiempo de entre 1 a 2 min. a una velocidad de agitación rápida de entre 75-100 rpm.
- Continuar agitando la mezcla en un periodo de 10-15 min. a la velocidad de agitación determinada.
- Detener la agitación, sacar el mezclador y dejar reposar 10 min.
- Filtrar la muestra para separar los flóculos sedimentados del agua tratada.
- Analizar la muestra para determinar los parámetros después del tratamiento.
- Elegir la dosis óptima de coagulante y floculante en función del resultado esperado.

Figura 7. **Equipo utilizado para realizar prueba de jarras**

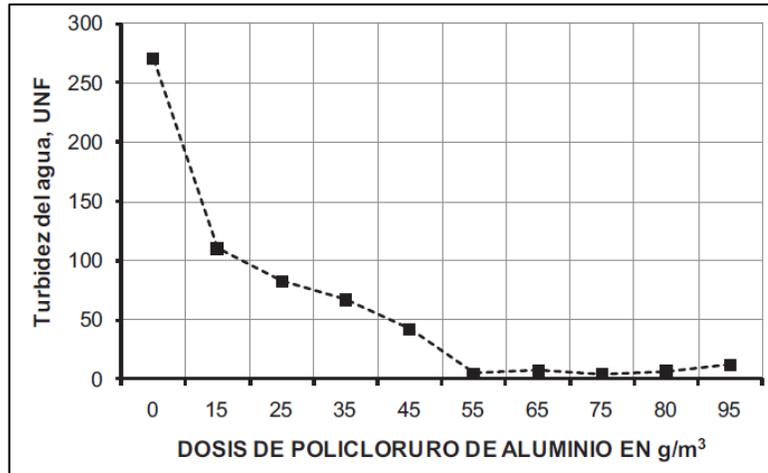


Fuente: Marín. *Procesos físicoquímicos en depuración de aguas*. Consultado el 24 de octubre de 2020. Recuperado de <http://www.editdiazdesantos.com/wwwdat/pdf/9788499693873.pdf>

7.3.4.1.1. Curvas de consumo de coagulante

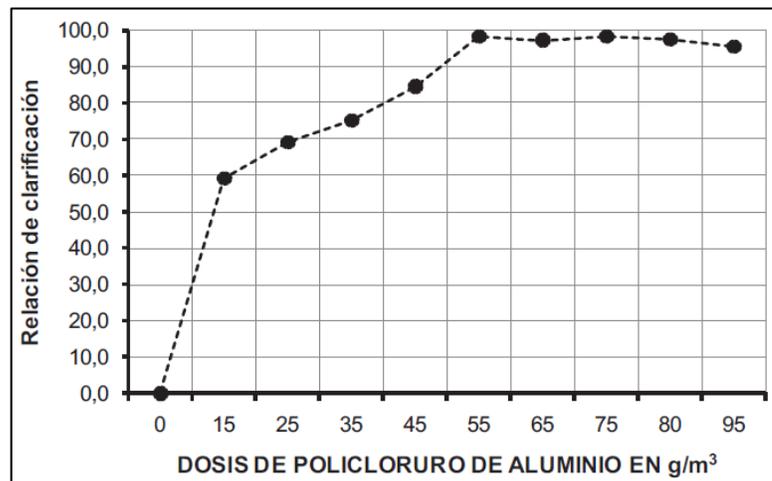
Las curvas de consumo de coagulante son una representación gráfica que ayuda a obtener información del comportamiento de un ensayo de prueba de jarras. Estas reflejan el efecto que causan las diferentes dosis aplicadas de coagulante sobre los parámetros de calidad del agua después de tratada y permiten obtener un modelo matemático que explique este comportamiento. Para elaborarlas se sitúan en el eje de las abscisas las dosis empleadas de coagulantes y en el eje de las ordenadas el parámetro de calidad del agua que se quiera representar (Marín, 2013). En las figuras 8 y 9 se pueden observar dos curvas de consumo de coagulante utilizando policloruro de aluminio y los parámetros turbidez y relación de clarificación.

Figura 8. **Turbidez frente a dosis de coagulante**



Fuente: Marín. *Procesos fisicoquímicos en depuración de aguas*. Consultado el 24 de octubre de 2020. Recuperado de <http://www.editdiazdesantos.com/wwwdat/pdf/9788499693873.pdf>

Figura 9. **Relación de clarificación frente a dosis de coagulante**



Fuente: Marín. *Procesos fisicoquímicos en depuración de aguas*. Consultado el 24 de octubre de 2020. Recuperado de <http://www.editdiazdesantos.com/wwwdat/pdf/9788499693873.pdf>

7.4. Marco legal y regulatorio

El tema de aguas residuales en nuestro país está reglamentado por acuerdos gubernativos y ciertos reglamentos de parte del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales los cuales establecen los parámetros legales que se deben cumplir en este tipo de descargas.

7.4.1. Acuerdo Gubernativo 236-2006

Este acuerdo llamado Reglamento de las Descargas y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos se oficializó el 5 de mayo del 2006 mediante el Acuerdo Gubernativo 236 del año 2006, bajo la conformidad de la Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente, la cual establece que el Gobierno debe emitir los reglamentos y disposiciones para ejercer control, aprovechamiento y uso de las aguas para controlar y prevenir los niveles de contaminación de ríos, mares, lagos y cualquier fuente hídrica dentro del país (Acuerdo Gubernativo 236, 2006).

Este acuerdo fue creado con el objeto de establecer lineamientos y criterios que deben cumplirse de forma obligatoria para la descarga y reuso de aguas residuales y para la disposición de lodos mediante un proceso de operación continua que permita:

- Proteger los cuerpos receptores de agua de los impactos ambientales derivados de las actividades humanas.
- Recuperar los cuerpos de agua que ya se encuentran en proceso de eutrofización.

- Promover el enfoque de gestión integrada para incentivar el desarrollo del recurso hídrico.

También brinda un marco práctico de operación que permite establecer al Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales los mecanismos de evaluación, control y seguimiento de forma que se promueva la conservación y mejoramiento del agua. Este reglamento, de acuerdo con lo establecido, es aplicable para:

- Las personas individuales o jurídicas que generen descargas de aguas residuales.
- Las personas individuales o jurídicas que descarguen sus aguas residuales de tipo especial en el alcantarillado público.
- Las personas que generen aguas residuales para reuso.
- Las personas que reusen en su totalidad o de forma parcial las aguas residuales.
- Las personas encargadas del manejo, tratamiento y disposición final de lodos.

7.4.1.1. Capítulo VI – Parámetros para aguas residuales y valores de descarga al alcantarillado público

En este capítulo se establece que los parámetros obligatorios a medir para determinar la calidad del agua residual descargada al alcantarillado público son los siguientes (Acuerdo Gubernativo 236, 2006):

- Temperatura
- Potencial de hidrógeno
- Grasas y aceites
- Materia flotante
- Sólidos suspendidos totales
- Demanda bioquímica de oxígeno a veinte grados Celsius a los cinco días
- Demanda química de oxígeno
- Nitrógeno total
- Fósforo total
- Arsénico
- Cadmio
- Cianuro total
- Cobre
- Cromo hexavalente
- Mercurio

- Níquel
- Plomo
- Zinc
- Color
- Coliformes fecales

De acuerdo con lo dictado en el Artículo 26 los entes generadores que ya existan antes de la publicación de este acuerdo deberán cumplir con un modelo de reducción progresiva de cargas de demanda bioquímica de oxígeno para las aguas que se descarguen al alcantarillado público, cumpliendo valores y etapas (Acuerdo Gubernativo 236, 2006). En la figura 10 se presentan dichos valores y la etapa de cumplimiento vigente.

Figura 10. **Modelo de reducción progresiva DBO**

Etapas	Cuatro	
Fecha máxima de cumplimiento	Dos de mayo de dos mil veinticuatro	
Duración, años	4	
Carga, kilogramos por día	3000<EG<4000	4000≤EG<7000
Reducción porcentual	40	60

Fuente: Gobierno de Guatemala. *Reglamento de las Descargas y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos*. Consultado el 24 de octubre de 2020. Recuperado de <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/gua67171.pdf>

Para poder realizar la aplicación del modelo plasmado anteriormente, el valor inicial de la caracterización de descarga estará plasmado en el estudio técnico. Dicho valor inicial, se referirá a la carga expresada en kilogramos por día de demanda bioquímica de oxígeno en ese momento. Para la reducción de la etapa uno, se utilizará el valor inicial de descarga plasmado en el estudio técnico y para cada una de las etapas posteriores, la carga inicial será el valor obtenido del porcentaje de reducción de la etapa anterior (Acuerdo Gubernativo 236, 2006).

Para calcular la demanda química de oxígeno los entes generadores, al realizar el Estudio Técnico, deberán incluir el valor de la demanda química de oxígeno, para relacionarla con la demanda bioquímica de oxígeno, mediante el cálculo demanda química de oxígeno dividido entre la demanda bioquímica de oxígeno. Los entes generadores que descarguen al alcantarillado publico además de cumplir con el modelo de reducción del Artículo 26 deberán cumplir con los valores del parámetro de demanda bioquímica de oxígeno que se plasma en la figura 11.

Figura 11. **Parámetro de calidad asociado a DBO**

Parámetro	Dimensional	Valor inicial	Fecha máxima de cumplimiento			
			Dos de mayo de dos mil once	Dos de mayo de dos mil quince	Dos de mayo de dos mil veinte	Dos de mayo de dos mil veinticuatro
			Etapa			
			Uno	Dos	Tres	Cuatro
Demanda bioquímica de oxígeno	Miligramos por litro	3500	1500	750	450	200

Fuente: Gobierno de Guatemala. *Reglamento de las Descargas y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos*. Consultado el 24 de octubre de 2020. Recuperado de <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/gua67171.pdf>

El Artículo 20 del presente reglamento dicta los límites máximos permitidos de calidad del agua para ser descargada a los cuerpos receptores. Estos límites de cumplimiento se plasman en la figura 12 (Acuerdo Gubernativo 236, 2006).

Figura 12. **Límites máximos permisibles de descargas de aguas residuales al alcantarillado público**

Parámetros	Dimensionales	Valores iniciales	Fecha máxima de cumplimiento			
			Dos de mayo de dos mil once	Dos de mayo de dos mil quince	Dos de mayo de dos mil veinte	Dos de mayo de dos mil veinticuatro
			Etapa			
			Uno	Dos	Tres	Cuatro
Temperatura	Grados Celsius	< 40	< 40	< 40	< 40	< 40
Grasas y aceites	Miligramos por litro	1500	200	100	60	60
Materia flotante	Ausencia/presencia	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos suspendidos	Miligramos por litro	3500	1500	700	400	200
Nitrógeno total	Miligramos por litro	1400	180	150	80	40
Fósforo total	Miligramos por litro	700	75	40	20	10
Potencial de hidrógeno	Unidades de potencial de hidrógeno	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
Coliformes fecales	Número más probable en cien mililitros	< 1x10 ⁸	< 1x10 ⁶	< 1x10 ⁵	< 1x10 ⁴	< 1x10 ⁴
Arsénico	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Cadmio	Miligramos por litro	1	0.4	0.1	0.1	0.1
Cianuro total	Miligramos por litro	6	3	1	1	1
Cobre	Miligramos por litro	4	4	3	3	3
Cromo hexavalente	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Mercurio	Miligramos por litro	0.1	0.1	0.02	0.02	0.01
Níquel	Miligramos por litro	6	4	2	2	2
Plomo	Miligramos por litro	4	1	0.4	0.4	0.4
Zinc	Miligramos por litro	10	10	10	10	10
Color	Unidades platino cobalto	1500	1300	1000	750	500

Fuente: Gobierno de Guatemala. *Reglamento de las Descargas y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos*. Consultado el 24 de octubre de 2020. Recuperado de <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/gua67171.pdf>

El Artículo 31 dicta las opciones que las personas que descargan agua residual pueden tomar para poder cumplir con los parámetros establecidos de descarga al alcantarillado público. La primera opción es establecer sistemas de tratamiento propio previo a la descarga y la segunda sería pagar a la

municipalidad una tasa por concepto de tratamiento de aguas en caso la municipalidad de la jurisdicción tenga tratamiento de aguas (Acuerdo Gubernativo 236, 2006).

7.4.1.2. Capítulo IX – Seguimiento y evaluación

Se establece, mediante el Artículo 49, que todos los entes generadores deberán realizar obligatoriamente mínimo dos muestras anuales de agua residual y así medir la calidad del agua de acuerdo con los parámetros anteriormente mencionados. Es obligatorio también en cada toma de muestra medir el caudal para poder relacionar concentraciones y así determinar cargas, esto se define en el Artículo 50.

7.4.1.3. Capítulo X – Prohibiciones y sanciones

En este capítulo de los artículos 55 al 57 se prohíbe disponer de aguas residuales en alcantarillados de agua pluvial o a ras de la tierra, descargar aguas residuales directamente sin tratar y la dilución de aguas residuales previo a su descarga.

7.4.2. Compromisos de resolución de la licencia ambiental

De acuerdo con el instrumento de Diagnostico Ambiental, para la categoría B1, que otorgó la Licencia Ambiental para la Industria de Alimentos en cuestión, el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales resolvió que se deberían cumplir los siguientes compromisos:

- Cumplir en todo momento con el Acuerdo Gubernativo 236-2006, presentar los registros de análisis microbiológicos y fisicoquímicos para su respectiva comparación con el cumplimiento de parámetros.
- Las aguas de purga de las calderas deben ser sometidas a un tratamiento de aguas especiales.

Estos requisitos de dicha resolución se convierten para la operación de la empresa requisitos ambientales obligatorios ya que son compromisos que se adquieren de forma legal al obtener la Licencia Ambiental.

Eventualmente estos requisitos de la resolución para la Licencia Ambiental pueden ser auditables en inspecciones no anunciadas del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales y debe mostrarse evidencia del cumplimiento para evitar incurrir en sanciones, multas o cierre de operaciones según sea la gravedad de la falta.

7.4.3. Requisitos internos y de partes interesadas

Dentro de los requisitos internos de la empresa en cuestión se encuentran los objetivos ambientales planteados para cumplir con el objetivo macro de sostenibilidad. Estos objetivos ambientales comprenden una reducción del impacto que los procesos de la empresa tienen hacia el medio ambiente, a través de cumplimiento de requisitos legales y mejora continua de procesos y actividades. Por lo que dentro de los impactos está el de la descarga de agua residual, el cual tiene un indicador de cumplimiento asociado para monitorear continuamente los parámetros de calidad del agua.

Las partes interesadas de la organización, en este caso específicamente clientes comerciales, han determinado que se debe cumplir con un sistema de gestión ambiental bajo algún estándar internacional para mantener las relaciones comerciales. Es por esto por lo que se tiene implementado un sistema de gestión ambiental bajo el estándar ISO 14001, el cual abarca dentro de sus objetivos de gestión el cumplimiento de parámetros de descarga de agua residual.

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

HIPÓTESIS

RESUMEN DEL MARCO TEÓRICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Aguas residuales

1.1.1 Agua residual de tipo especial

1.1.2 Agua residual en la industria alimenticia

1.1.3 Parámetros de calidad del agua residual

1.1.3.1 Características físicas

1.1.3.2 Características químicas

1.1.3.3 Características biológicas

1.1.4 Caracterización del agua residual

1.1.4.1 Caudal

1.1.4.1.1 Medición de caudal volumétrico
manual

1.1.4.2 Toma de muestras

1.1.4.2.1 Manipulación de muestras

1.1.5 Efectos de las descargas de aguas residuales

- 1.2 Tratamiento de aguas residuales
 - 1.2.1 Clasificación de métodos de tratamiento
 - 1.2.1.1 Tratamientos físicos
 - 1.2.1.2 Tratamientos químicos
 - 1.2.1.3 Tratamientos biológicos
 - 1.2.2 Diagramas de flujo de tratamientos
 - 1.2.2.1 Tratamiento primario
 - 1.2.2.2 Tratamiento secundario
 - 1.2.2.3 Tratamiento terciario
 - 1.2.2.4 Criterios para diseño
- 1.3 Coagulación-Floculación
 - 1.3.1 Coagulación
 - 1.3.2 Floculación
 - 1.3.3 Condiciones de operación y equipo
 - 1.3.4 Pruebas de tratabilidad
 - 1.3.4.1 Prueba de jarras
 - 1.3.4.1.1 Procedimiento estandarizado para prueba de jarras
 - 1.3.4.2 Curvas de consumo de coagulante
- 1.4 Marco legal y regulatorio
 - 1.4.1 Acuerdo Gubernativo 236-2006
 - 1.4.1.1 Capítulo VI – Parámetros para aguas residuales y valores de descarga al alcantarillado público
 - 1.4.1.2 Capítulo IX – Seguimiento y evaluación
 - 1.4.1.3 Capítulo X – Prohibiciones y sanciones
 - 1.4.2 Compromisos de resolución de la licencia ambiental
 - 1.4.3 Requisitos internos y de partes interesadas

2. CONSOLIDACIÓN DE DATOS HISTÓRICOS DEL ANÁLISIS DE AGUA RESIDUAL
3. TOMA DE MUESTRA
4. MEDICIÓN DE CONCENTRACIONES INICIALES
5. ENSAYO DE PRUEBA DE JARRAS
6. ELABORACIÓN DE LA CURVA DE CONSUMO
7. DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA
8. ANÁLISIS DE RESULTADOS
9. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

APÉNDICES

ANEXOS

9. METODOLOGÍA

9.1. Tipo de estudio

El presente estudio es de tipo cuantitativo descriptivo. En este se hará la determinación de la dosis óptima de coagulante y floculante, a escala laboratorio, como tratamiento de aguas residuales en una industria de alimentos. Para ello se compararán los parámetros de descarga históricos con los parámetros después del tratamiento a escala laboratorio y así determinar la eficiencia de la dosis óptima.

9.2. Definición de variables

A continuación, en la tabla V, se plasman las definiciones de las variables seleccionadas para este estudio.

Tabla V. **Definición de variables**

Variable	Definición conceptual	Definición operacional
DBO	La demanda bioquímica de oxígeno es la medida indirecta del contenido de materia orgánica en aguas residuales.	Se medirá en miligramos por litro (mg/L) y se determinará mediante ensayos de laboratorio acreditado.
Dosis óptima de coagulante	Concentración de coagulante requerida para lograr la mayor eficiencia en tratamiento de aguas residuales.	Se determinará en miligramos por litro (mg/L) y se determinará mediante ensayo de prueba de jarras.

Continuación tabla V.

Variable	Definición conceptual	Definición operacional
Dosis de floculante	Concentración de floculante requerida para lograr la mayor eficiencia en tratamiento de aguas residuales.	Se determinará en miligramos por litro (mg/L) y se determinará mediante ensayo de prueba de jarras.
DQO	La demanda química de oxígeno es la medida indirecta del contenido de materia orgánica e inorgánica oxidable en aguas residuales.	Se medirá en miligramos por litro (mg/L) y se determinará mediante ensayos de laboratorio acreditado.
Solidos sedimentables	Cantidad de material que sedimenta en una muestra de agua residual en determinado periodo de tiempo.	Se medirá en miligramos por litro (mg/L) y se determinará mediante ensayos de laboratorio acreditado.
Solidos suspendidos	Se clasifica como solidos suspendidos a toda materia solida contenida y no disuelta en sustancias liquidas o semilíquidas.	Se medirá en miligramos por litro (mg/L) y se determinará mediante ensayos de laboratorio acreditado.
Turbidez	Es una expresión del efecto óptico causado por la dispersión e interferencia de los rayos luminosos que pasan a través de una muestra de agua.	Se medirá en unidades de turbidez nefelométrica (UTN) y se determinará mediante ensayos de laboratorio acreditado.

Fuente: elaboración propia.

9.3. Fases del estudio

Se describirán a continuación las fases detalladas que contendrá el estudio.

9.3.1. Fase 1: exploración bibliográfica

En esta primera fase se describirá de acuerdo con la teoría consultada que es el agua residual, los parámetros físicos, químicos y biológicos que podrían aportar características en las descargas y cuáles son los parámetros que constituyen principalmente el agua residual del tipo de industria en cuestión para determinar las variables a analizar. Posteriormente se definirán los tipos de tratamientos de agua residual que existen y así profundizar en la técnica de coagulación y floculación y la metodología para realizar un ensayo de prueba de jarras. Por último, se plasmará el marco legal y regulatorio que convierte el tratamiento de aguas en un requisito legal e interno para esta industria.

9.3.2. Fase 2: consolidación de datos históricos del análisis de agua residual

Para consolidar los datos históricos de agua residual se tomarán los datos de los últimos tres análisis realizados, tomando en cuenta solo los parámetros pertinentes para este estudio. La información se consolidará como sigue:

Tabla VI. **Parámetros históricos de descarga de agua residual**

Parámetro	Dimensionales	Histórico 1	Histórico 2	Histórico 3	Promedio
DBO	mg/L				
DQO	mg/L				
Sólidos sedimentables	mg/L				

Continuación tabla VI.

Parámetro	Dimensionales	Histórico	Histórico	Histórico	Promedio
		1	2	3	
Sólidos suspendidos	mg/L				
Turbidez	NTU				

Fuente: elaboración propia.

9.3.3. Fase 3: toma de muestra

El muestreo que se realizará será mediante una muestra simple, tomada el segundo día de paro mensual por la mañana, esto con el fin de tomar la muestra en condiciones similares a las que se han tomado para el histórico de análisis. Las condiciones para la toma de muestra y el manejo de estas se realizarán de acuerdo con lo indicado en la tabla IV y se registrara como se muestra a continuación:

Tabla VII. **Registro de condiciones de manipulación de muestras**

Condición	Cumple (Si/No)	Observaciones
Recipiente de vidrio o plástico		
Muestras refrigeradas después de tomadas		
Almacenamiento y traslado en oscuridad		
Tiempo máximo entre toma de muestra y análisis debe ser de 48h.		

Fuente: elaboración propia.

9.3.4. Fase 4: medición de condiciones iniciales

Para determinar las condiciones iniciales de la muestra tomada se enviará a analizar a un laboratorio acreditado. Los resultados del análisis se tabularán en la siguiente tabla:

Tabla VIII. **Concentraciones iniciales de muestra**

Parámetro	Dato
DBO (mg/L)	
DQO (mg/L)	
Sólidos sedimentables (mg/L)	
Sólidos suspendidos (mg/L)	
Turbidez (UTN)	

Fuente: elaboración propia.

9.3.5. Fase 5: ensayo de prueba de jarras

El ensayo de prueba de jarras se realizará utilizando la metodología y el equipo descrito en el marco teórico. Para realizar esta prueba será necesario determinar las condiciones de operación del equipo y las concentraciones utilizadas en cada una de las jarras.

Tabla IX. **Condiciones de operación ensayo de prueba de jarras**

Condición	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
Coagulante utilizado			
Floculante utilizado			

Continuación tabla IX.

Condición	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
Velocidad (RPM)			
Tiempo (s)			
Volumen jarras			

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Concentración de coagulante y floculante utilizada para las 3 corridas**

No. de jarra	Coagulante (mg/L)	Floculante (mg/L)
1		
2		
3		
4		
5		
6		

Fuente: elaboración propia.

9.3.6. Fase 6: elaboración de la curva de consumo

Para elaborar las curvas de consumo de coagulante y floculante se tomarán en cuenta las concentraciones de coagulante y floculante utilizadas y los resultados del parámetro de turbidez. Las gráficas se realizarán colocando las concentraciones de coagulante y floculante en el eje de las abscisas y los valores de parámetro de turbidez en el eje de las ordenadas. Los datos se plasmarán en las tablas que se muestran a continuación:

Tabla XI. **Datos para curva de consumo corrida 1**

No. de jarra	Coagulante (mg/L)	Floculante (mg/L)	Turbidez (NTU)
1			
2			
3			
4			
5			
6			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Datos para curva de consumo corrida 2**

No. de jarra	Coagulante (mg/L)	Floculante (mg/L)	Turbidez (NTU)
1			
2			
3			
4			
5			
6			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Datos para curva de consumo corrida 3**

No. de jarra	Coagulante (mg/L)	Floculante (mg/L)	Turbidez (NTU)
1			
2			
3			
4			
5			
6			

Fuente: elaboración propia.

9.3.7. Fase 7: determinación de la dosis óptima

Para determinar la dosis óptima de coagulante y floculante se analizarán las curvas de consumo, para identificarla se tomarán los puntos mínimos reflejados en los gráficos.

Tabla XIV. Dosis óptima de coagulante y floculante

Tipo	Sustancia	Dosis óptima (mg/L)
Coagulante		
Floculante		

Fuente: elaboración propia.

9.3.8. Fase 8: determinación del porcentaje de reducción de concentraciones

Para determinar el porcentaje de reducción de parámetros de descarga en la muestra de agua residual, con la dosis óptima, se utilizará la siguiente ecuación:

$$\%R = \frac{P_1}{P_o} \times 100 \text{ (Ecuación 1)}$$

Donde:

- %R = porcentaje de reducción de la concentración.
- P_o = concentración del parámetro histórico

- P_1 = concentración del parámetro después del tratamiento a escala laboratorio.

Tabla XV. **Porcentaje de reducción de concentraciones**

Parámetro	P_0	P_1	%R
DBO (mg/L)			
DQO (mg/L)			
Solidos sedimentables (mg/L)			
Solidos suspendidos (mg/L)			
Turbidez (UTN)			

Fuente: elaboración propia.

9.3.9. Fase 9: análisis de resultados

Los resultados para la determinar la eficiencia de la dosis óptima se analizarán con base en el porcentaje de reducción. De acuerdo con la teoría consultada los valores aceptables para considerar un tratamiento eficaz se plasmarán como sigue:

Tabla XVI. **Eficacia del tratamiento a escala laboratorio**

Parámetro	% Eficacia aceptado	% Obtenido	Eficaz (Si/No)
DQO	Mayor a 30%		
DBO	Mayor a 40%		
Solidos suspendidos	Mayor a 80%		
Turbidez	Mayor a 80%		

Fuente: elaboración propia.

9.3.10. Fase 10: presentación y discusión de resultados

En esta fase se plasmarán los resultados obtenidos de acuerdo con los objetivos planteados para esta investigación y se discutirá acerca del cumplimiento de estos.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Para determinar la dosis óptima de coagulante y floculante como tratamiento primario para agua residual se realizará el análisis de las concentraciones de la muestra de agua sin tratamiento y de la muestra después del tratamiento a escala laboratorio, también se establecerá un modelo matemático que explique el comportamiento de los datos con la dosis óptima y se determinará el porcentaje de reducción de parámetros mediante la comparación de las concentraciones iniciales y finales. Para recopilar y analizar los datos se utilizarán las siguientes herramientas:

- Herramientas de recolección de datos:
 - Tabla de parámetros históricos de descarga de agua residual.
 - Tabla de registro de condiciones de manipulación de muestras.
 - Tabla de concentraciones iniciales de muestra.
 - Tabla de condiciones de operación ensayo de prueba de jarras.
 - Tabla de concentraciones de coagulante y floculante utilizadas para las 3 corridas.
 - Tabla de datos para curva de consumo corrida 1.
 - Curva de consumo turbidez vrs. dosis utilizada corrida 1.
 - Tabla de datos para curva de consumo corrida 2.

- Curva de consumo turbidez vrs. dosis utilizada corrida 2.
- Tabla de datos para curva de consumo corrida 3.
- Curva de consumo turbidez vrs. dosis utilizada corrida 3.
- Tabla de dosis óptima de coagulante y floculante.
- Tabla de porcentaje de reducción de concentraciones.
- Tabla de eficacia del tratamiento a escala laboratorio.
- Herramientas estadísticas:
 - Promedio de parámetros históricos de descarga de agua residual.
 - Determinación de punto mínimo curva de consumo corrida 1.
 - Determinación de punto mínimo curva de consumo corrida 2.
 - Determinación de punto mínimo curva de consumo corrida 3.
 - Porcentaje de reducción de concentraciones.

11. CRONOGRAMA

Tabla XVII. Cronograma de actividades para la realización de la investigación

Actividad	2021					
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Fase 1: Exploración bibliográfica						
Fase 2: Consolidación de datos históricos del análisis de agua residual						
Fase 3: Toma de muestra						
Fase 4: Medición de condiciones iniciales						
Fase 5: Ensayo de prueba de jarras						
Fase 6: Elaboración de la curva de consumo						
Fase 7: Determinación de la dosis óptima						
Fase 8: Determinación del porcentaje de reducción de concentraciones						
Fase 9: Análisis de resultados						
Fase 10: Presentación y discusión de resultados						

Fuente: elaboración propia.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

Para realizar la presente investigación se necesitarán los siguientes recursos económicos:

Tabla XVIII. Recursos económicos

Descripción	Costo (GTQ)
Movilización	500
Materiales para muestreo	100
Análisis fisicoquímicos para muestra inicial y posterior al tratamiento	1500
Asesor	2500
Total:	4600

Fuente: elaboración propia.

La industria en cuestión costeará los gastos de los análisis fisicoquímicos y del asesor y el estudiante los gastos por movilización y materiales para muestreo, por lo que el estudio se considera factible.

13. REFERENCIAS

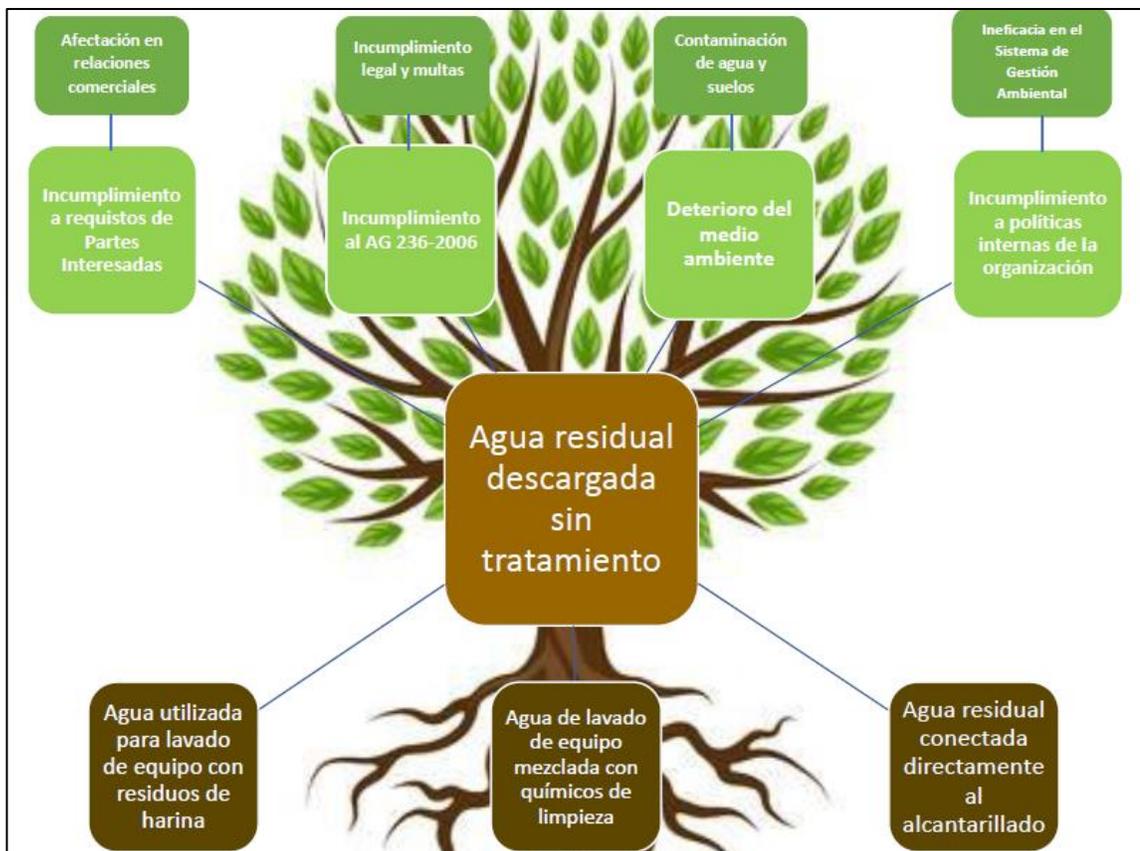
1. Acuerdo Gubernativo 236-2006: *Reglamento de las Descargas y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos*. Diario de Centroamérica, ciudad de Guatemala, Guatemala, 5 de mayo de 2006.
2. Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (1997). *Manual de caracterización de aguas residuales industriales*. (2da. ed.). Medellín: Ideas Gráficas Ltda.
3. Asturias, J., y Sagastume, A. (2016). Remoción de arsénico por floculación y filtración directa del agua subterránea del municipio de San Rafael Las Flores, Santa Rosa, Guatemala. *Revista Científica Agua, Saneamiento & Ambiente*, 11(1).
4. Azabache, Y., Murrieta, E., García, P., Ayala, M., Caceres, G., y Garcia, M. (2020). Tratamiento del agua residual de un matadero: Eficiencia del proceso de coagulación-floculación. *Agroindustrial Science*, 10(1), 23-27.
5. Cárdenas, Y. (2000). Tratamiento de agua: coagulación y floculación. *Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico SEDAPAL*, 44 pp.
6. Devesa-Rey, R., Rodríguez, F., y Madriñan, S. (2017). Diseño de un Experimento de Optimización del Proceso de Coagulación-Floculación de Aguas en el Laboratorio de Química. *Modelling in Science Education and Learning*, 10(2), 35-44.

7. Fair, G., Geyer, J., y Okun, D. (1995). *Ingeniería sanitaria y de aguas residuales*. Volumen 1. (1era. ed.). México: Limusa S.A.
8. Lorenzo, E., Ocaña, J., García, L., y Venta, M. (2010). Evaluación de la eficiencia de los procesos de coagulación-floculación y ozonización a escala de laboratorio en el tratamiento de aguas residuales municipales. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, 41(1), 49-56.
9. Marín, R. (2013). *Procesos fisicoquímicos en depuración de aguas*. (1era. ed.). Madrid: Díaz de Santos, S.A.
10. Martínez, S. (1999). *Parámetros de diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales*. (1era. ed.). México: Universidad Autónoma Metropolitana
11. Metcalf y Eddy, INC. (1995). *Ingeniería de las aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización*. Tomo I. (1era. ed.). Madrid: McGraw-Hill.
12. Miranda, R., Oliet, M., Pérez-Corona, T., Alonso, M., Madrid, Y., Domínguez, J., & García, P. (2018). *Tratamiento de aguas residuales*. (1era. ed.). Madrid: Dextra Editorial, S. L.
13. Ramalho, R. (1996). *Tratamiento de aguas residuales*. (1era. ed.). Barcelona: Editorial Reverté, S.A.
14. Romero, J. (2002). *Calidad del agua*. (2da. ed.). Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.

15. Sierra, C. (2011). *Calidad del agua: evaluación y tratamiento*. (1era. ed.). Medellín: Universidad de Medellín.
16. Torres, L., De la Peña, L., Gallegos, J., Rodríguez, M., y Hernández, F. (2017). Evaluación experimental del poder coagulante de extractos naturales empleados en la clarificación de aguas. *Memorias del XXXVIII Encuentro Nacional de la AMIDIQ*. 23(1), 1-5.
17. Turcios, E. (2017). *Uso de semilla de moringa oleífera como coagulante orgánico en el tratamiento de agua para consumo humano*. (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. Recuperado de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/06/06_2209.pdf
18. Valdez, E., y Vasquez, A., (2003). *Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales*. (1era. ed.). México: Fundación ICA, A. C.

14. APÉNDICES

Apéndice 1. Cronograma



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Matriz de coherencia

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	VARIABLES	METODOLOGÍA	PLAN DE ACCIÓN
<p>Pregunta principal: ¿Se logrará evaluar la dosis óptima de coagulante y floculante como tratamiento de agua residual en una industria de alimentos?</p>	<p>Objetivo general: Proponer una dosis óptima de coagulante y floculante como tratamiento de agua residual en una industria de alimentos.</p>	Dosis óptima de coagulante y floculante (mg/L)	Ensayo a escala laboratorio mediante prueba de jarras, análisis en laboratorio e interpretación de resultados.	Realizar análisis de agua residual previamente tratada en un ensayo de prueba de jarras aplicando coagulante y floculante (1 mes).
<p>Preguntas auxiliares: 1. ¿Cuáles son los parámetros de descarga del agua sin tratamiento?</p>	<p>Objetivos específicos: 1. Indicar los parámetros de descarga del agua sin tratamiento.</p>	Sólidos suspendidos (mg/L), DBO y DQO (mg/L), turbidez (NTU), todos sin tratamiento.	Historial de análisis del agua residual de la industria de alimentos.	1. Consolidar los datos para determinar el promedio del análisis de agua residual (1 día).
2. ¿Cuál es la dosis óptima de coagulante y floculante para el tratamiento de agua?	2. Definir la dosis óptima de coagulante y floculante para el tratamiento de agua.	Dosis a utilizar de coagulante y floculante (mg/L) en el ensayo de jarras y ecuación matemática que explique el comportamiento de los resultados.	Ensayo de prueba de jarras	2. Toma de muestra (1 día) 3. Ensayo de prueba de jarras (1 día). 4. Elaboración de curva de consumo de coagulante (1 día).
3. ¿Cuáles son los parámetros después del tratamiento por coagulación y floculación?	3. Determinar los parámetros después de establecer la dosis óptima de coagulante y floculante.	Sólidos suspendidos (mg/L), DBO y DQO (mg/L), turbidez (NTU), después del tratamiento.	Análisis de muestra después de ensayo de jarras en laboratorio fisicoquímico.	5. Envío de muestras al laboratorio de análisis fisicoquímico y espera de resultados (15 días).
4. ¿Será eficiente el proceso de coagulación y floculación como tratamiento para el agua residual?	4. Analizar si se cumple con lo requerido para un proceso de coagulación y floculación con estos parámetros.	Porcentajes de reducción de parámetros (%).	Análisis de resultados de laboratorio y exploración bibliográfica.	6. Análisis de resultados y realización de cálculos para determinar % de reducción (7 días).

Fuente: elaboración propia.