



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Artes en Energía y Ambiente

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

Ing. Angel Eduardo Hernández de Paz

Asesorado por la MSc. Inga. Adela María Marroquín González

Guatemala, mayo de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**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

ING. ANGEL EDUARDO HERNÁNDEZ DE PAZ

ASESORADO POR LA MSC. INGA. ADELA MARÍA MARROQUÍN GONZÁLEZ

AL CONFERIRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ARTES EN ENERGÍA Y AMBIENTE

GUATEMALA, MAYO DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz Gonzáles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Alvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Luis Rodolfo García Castro
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:

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.

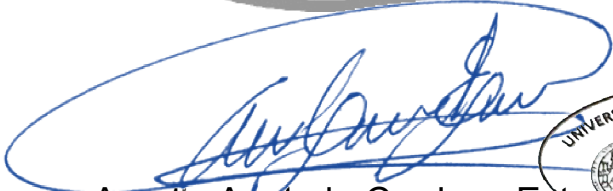
Ing. Angel Eduardo Hernández de Paz

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.407.2022

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 Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DE COAGULANTE Y FLOCULANTE COMO TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN UNA INDUSTRIA DE ALIMENTOS**, presentado por: **Angel Eduardo Hernández de Paz**, que pertenece al programa de Maestría en artes en Energía y ambiente después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Inga. Aurelia Arriola Cordova Estrada
Decana



Guatemala, mayo de 2022

AACE/gaoc



Guatemala, mayo de 2022

LNG.EEP.OI.407.2022

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

“EVALUACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DE COAGULANTE Y FLOCULANTE COMO TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN UNA INDUSTRIA DE ALIMENTOS”

presentado por **Angel Eduardo Hernández de Paz** correspondiente al programa de **Maestría en artes en Energía y ambiente** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





Guatemala, octubre 2021

Como coordinador de la **Maestría en Artes en Energía y Ambiente** doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **"EVALUACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DE COAGULANTE Y FLOCULANTE COMO TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN UNA INDUSTRIA DE ALIMENTOS"** presentado por el Ingeniero **Angel Eduardo Hernández de Paz** quien se identifica con carné **201213049**.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador de Maestría
Escuela de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería



Guatemala, 14 de octubre del 2021.

**Ingeniero M.Sc.
Edgar Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería USAC
Ciudad Universitaria, Zona 12**

Distinguido Ingeniero Álvarez:

Atentamente me dirijo a usted para hacer de su conocimiento que como asesor del trabajo de graduación del estudiante Angel Eduardo Hernández de Paz, Carné número 201213049, cuyo título es **“EVALUACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DE COAGULANTE Y FLOCULANTE COMO TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN UNA INDUSTRIA DE ALIMENTOS”**, para optar al grado académico de Maestro en Energía y Ambiente, he procedido a la revisión del INFORME FINAL y del ARTÍCULO.

En tal sentido, en calidad de asesor doy mi anuencia y aprobación para que el estudiante Hernández de Paz, continúe con los trámites correspondientes.

Sin otro particular, me es grato suscribirme de usted.

Atentamente,


Adela María Marroquín González
Ingeniera Química Col. No. 1446
Ing. Adela María Marroquín González
M.A. Energía y Ambiente
Asesora

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.
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.

**Ing. Zenón Much y a la
Escuela Regional de
Ingeniería Sanitaria
(ERIS)**

Por haberme dado la oportunidad y apoyarme en poder realizar los ensayos de este trabajo de graduación en sus instalaciones.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XV
OBJETIVOS.....	XIX
HIPÓTESIS.....	XXI
RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO.....	XXIII
INTRODUCCIÓN.....	XXV
1. MARCO TEÓRICO	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Aguas residuales	4
1.2.1. Agua residual de tipo especial	4
1.2.2. Agua residual en la industria alimenticia.....	5
1.2.3. Parámetros de calidad del agua residual	6
1.2.3.1. Características físicas.....	6
1.2.3.2. Características químicas	7
1.2.3.3. Características biológicas.....	8
1.2.4. Caracterización del agua residual.....	9
1.2.4.1. Caudal	9
1.2.4.1.1. Medición de caudal volumétrico manual	10
1.2.4.2. Toma de muestras.....	11

	1.2.4.2.1.	Manipulación de muestras	11
	1.2.5.	Efectos de las descargas de aguas residuales	12
1.3.		Tratamiento de aguas residuales	12
	1.3.1.	Clasificación de métodos de tratamiento.....	12
	1.3.1.1.	Tratamientos físicos	13
	1.3.1.2.	Tratamientos químicos	13
	1.3.1.3.	Tratamientos biológicos.....	13
	1.3.2.	Diagramas de flujo de tratamientos.....	14
	1.3.2.1.	Tratamiento primario	14
	1.3.2.2.	Tratamiento secundario.....	15
	1.3.2.3.	Tratamiento terciario	15
	1.3.2.4.	Criterios para diseño	15
1.4.		Coagulación - floculación	16
	1.4.1.	Coagulación	18
	1.4.2.	Floculación	19
	1.4.3.	Condiciones de operación y equipo	20
	1.4.4.	Pruebas de tratabilidad	21
	1.4.4.1.	Prueba de jarras.....	21
	1.4.4.1.1.	Curvas de consumo de coagulante.....	24
1.5.		Marco legal y regulatorio	26
	1.5.1.	Acuerdo Gubernativo 236-2006	26
	1.5.1.1.	Capítulo VI - Parámetros para aguas residuales y valores de descarga al alcantarillado público.....	27
	1.5.1.2.	Capítulo IX - Seguimiento y evaluación	32

1.5.1.3.	Capítulo X - Prohibiciones y sanciones.....	32
1.5.2.	Compromisos de resolución de la licencia ambiental	32
1.5.3.	Requisitos internos y de partes interesadas	33
2.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	35
2.1.	Datos históricos de agua residual	35
2.2.	Toma de muestra	35
2.3.	Medición de condiciones iniciales	38
2.4.	Ensayo de prueba de jarras	38
2.4.1.	Prueba de tratabilidad 1	39
2.4.2.	Prueba de tratabilidad 2.....	42
2.4.3.	Prueba de tratabilidad 3	44
2.5.	Determinación de la dosis óptima de coagulante	47
2.5.1.	Curvas de consumo de coagulante	47
2.5.2.	Confirmación de dosis óptima.....	51
2.6.	Porcentaje de reducción de concentraciones	52
2.7.	Eficacia del tratamiento a escala laboratorio	54
3.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	55
3.1.	Parámetros de descarga del agua sin tratamiento	55
3.2.	Dosis óptima de coagulante	56
3.3.	Confirmación de dosis óptima de coagulante	57
3.4.	Parámetros del agua residual después del tratamiento	57
3.5.	Eficiencia del tratamiento con la dosis óptima	58
3.6.	Muestra inicial y muestra final	59
3.7.	Costo del agua tratada	60
3.8.	Gradiente de velocidad para flujo laminar y turbulento	60

3.9.	Porcentaje de lodos en la muestra con dosis óptima	61
3.10.	Comparativo de parámetros de trabajo con Acuerdo Gubernativo 236-2006	61
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	63
CONCLUSIONES		69
RECOMENDACIONES		71
REFERENCIAS		73
APÉNDICES		77
ANEXOS		79

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Esquema de tratamiento para agua residual.....	5
2.	Representación del método volumétrico manual	10
3.	Ejemplo diagrama de flujo de planta de tratamiento residual.....	16
4.	Coagulación - floculación	18
5.	Reacciones de coagulación con sulfato de aluminio	19
6.	Gradientes de velocidad.....	20
7.	Equipo utilizado para la prueba de jarras	24
8.	Turbidez frente a dosis de coagulante	25
9.	Relación de clarificación frente a dosis de coagulante.....	25
10.	Modelo de reducción progresiva DBO.....	29
11.	Parámetro de calidad asociado a DBO	30
12.	Límites máximos permisibles de descargas de aguas residuales al alcantarillado público.....	31
13.	Punto de muestreo del agua residual.....	37
14.	Proceso de muestreo	37
15.	Transporte y almacenaje temporal de muestras	38
16.	Ensayo de jarras prueba 1	40
17.	Muestras después de la prueba 1	41
18.	Ensayo de jarras prueba 2	43
19.	Muestras después de la prueba 2	44
20.	Ensayo de prueba de jarras 3	46
21.	Muestras después de la prueba 3	47
22.	Curva de consumo de coagulante prueba 1.....	48

23.	Curva de consumo de coagulante prueba 2	48
24.	Curva de consumo de coagulante prueba 3	49
25.	Comparativo muestras finales de las 3 pruebas	50
26.	Prueba de confirmación de dosis óptima	52
27.	Curva de consumo de coagulante integrada	56
28.	Comparativo muestra inicial y final	59

TABLAS

I.	Características físicas del agua residual y sus procedencias	6
II.	Características químicas del agua residual y sus procedencias	7
III.	Características biológicas del agua residual y sus procedencias	9
IV.	Criterios para preservación de muestras	11
V.	Parámetros históricos de descarga de agua residual.	35
VI.	Registro de condiciones de manipulación de muestras	36
VII.	Condiciones de operación ensayo de prueba de jarras 1.	39
VIII.	Concentración de coagulante prueba 1	40
IX.	Turbidez por jarra prueba 1	41
X.	Condiciones de operación ensayo de prueba de jarras 2.	42
XI.	Concentración de coagulante prueba 2	43
XII.	Turbidez por jarra prueba 2	44
XIII.	Condiciones de operación ensayo de prueba de jarras 3.	45
XIV.	Concentración de coagulante prueba 3	45
XV.	Turbidez por jarra prueba 3	46
XVI.	Datos curva de consumo de coagulante integrada	49
XVII.	Condiciones de operación ensayo de prueba de jarras 4	51
XVIII.	Turbidez por jarra prueba 4	52
XIX.	Cálculo porcentaje de reducción de concentraciones	53
XX.	Concentraciones iniciales de muestra	55

XXI.	Dosis óptima de coagulante	57
XXII.	Desviación estándar turbidez de dosis óptima	57
XXIII.	Concentraciones finales de muestra	58
XXIV.	Porcentaje de reducción de concentraciones.....	58
XXV.	Eficacia del tratamiento a escala laboratorio	59
XXVI.	Costos del agua tratada por mes	60
XXVII.	Gradiente de velocidad por tipo de flujo	60
XXVIII.	Porcentaje de lodos.....	61
XXIX.	Comparativo de parámetros.....	61

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
°C	Grados Celsius
L	Litro
m³	Metros cúbicos
mg	Miligramos
mL	Mililitro
pH	Potencial de hidrógeno
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 público	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	Cantidad de fluido que circula a través de una sección por unidad de tiempo.
Coagulación	Son reacciones físicas y químicas que en medio líquido 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 se 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 reúso o lodos.
Parámetro	Es la variable que identifica una característica de las aguas residuales, aguas para reúso 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

Las aguas residuales de tipo especial para poder ser descargadas requieren de tratamientos previos que garanticen la reducción de contaminantes, para cumplir con requisitos legales y minimizar el impacto de contaminación al ambiente. El presente trabajo de graduación tiene como objetivo proponer un tratamiento de agua residual para una industria alimenticia, mediante la determinación de la dosis óptima de coagulante a escala laboratorio, que haga que la descarga tratada cumpla con los parámetros aceptables y que sea eficiente para su implementación en escala real.

Inicialmente se tomó una muestra simple de agua residual, la cual se caracterizó en un laboratorio externo para fijar los parámetros de descarga iniciales: DBO, DQO, sólidos sedimentables y suspendidos y turbidez. Posterior a ello se empleó la técnica de coagulación con el método de prueba de jarras, utilizando sulfato de aluminio al 1 %, en donde se corrieron 3 ensayos con diferentes concentraciones de coagulante, para después diagramar el comportamiento del parámetro turbidez en función del consumo de coagulante y determinar así la dosis óptima para el tratamiento. Establecido el dato anterior se corrió una cuarta prueba para confirmar la dosis óptima y así obtener una muestra final después del tratamiento. Esta muestra final también fue enviada al laboratorio externo para poder obtener los parámetros fijados después del tratamiento.

La dosis óptima de sulfato de aluminio al 1 % se determinó en 100 mg/L y mediante la comparación de los parámetros iniciales y finales de las muestras se calcularon los porcentajes de reducción de contaminantes siendo estos de 84 %

para DBO, 85 % para DQO, 83 % para sólidos sedimentables, 91 % para sólidos suspendidos y 99 % para turbidez.

Finalmente, mediante estos porcentajes se estableció la eficiencia de la dosis óptima, comprobando que la misma reduce en un porcentaje significativo los parámetros de descarga, de acuerdo con los porcentajes aceptables de remoción. Por lo cual se determina que este tratamiento si es eficiente para su implementación a escala real en la industria alimenticia ya que garantiza que esta cumplirá con los requisitos legales e internos de descarga de aguas residuales.

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 está 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?

OBJETIVOS

General

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

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.

HIPÓTESIS

Por ser una investigación de tipo cuantitativo descriptivo no aplica.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

El presente estudio es de tipo cuantitativo descriptivo. En este se determinó la dosis óptima de coagulante, a escala laboratorio, como tratamiento de aguas residuales en una industria de alimentos. Para ello se compararon los parámetros de descarga antes del tratamiento con los parámetros después del tratamiento a escala laboratorio, se creó una curva de consumo de coagulante y se determinó la eficiencia de la dosis óptima.

Para definir los parámetros a tratar en esta investigación se consolidó el historial de las tres últimas mediciones de parámetros de la descarga de agua residual, siendo estos DBO, DQO, turbidez, sólidos sedimentables y suspendidos.

Se inició el estudio tomando una muestra simple del agua residual, ésta se recolectó el segundo día de paro mensual por la mañana, con el fin de tomarla en condiciones similares a las que se han tomado del dato histórico que se tenía consolidado. Para determinar las condiciones iniciales de la muestra tomada se envió a analizar a un laboratorio acreditado.

Posteriormente con la muestra tomada se realizaron 3 ensayos de prueba de jarras, utilizando un agente coagulante en diferentes concentraciones y variando el pH de las muestras. Para determinar la dosis óptima se generó una curva de consumo de coagulante integrada entre las 3 pruebas, relacionando la concentración de éste en función del parámetro turbidez, obteniendo con el mínimo del gráfico el dato de dosis óptima. La gráfica se realizó colocando las

concentraciones de coagulante en el eje de las abscisas y los valores de parámetro de turbidez en el eje de las ordenadas.

Por último, como complemento de la investigación, se determinó la eficacia del tratamiento a escala laboratorio, tomando como base la muestra con la dosis óptima. La misma fue enviada a análisis en un laboratorio acreditado y con los resultados se realizó un comparativo con los obtenidos antes del tratamiento, calculando el porcentaje de reducción de parámetros, para verificar si es eficaz su implementación o no.

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 graduación se determinó, a escala laboratorio, una dosis óptima de coagulante como tratamiento primario para una descarga de agua residual en una industria manufacturera de alimentos de trigo, para que sirva como base en la implementación del tratamiento a escala real. Además, también se buscó 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.

Posterior al ensayo propuesto se determinó que mediante la dosis óptima establecida si se puede disminuir de una forma significativa la concentración de los parámetros del agua residual y que la implementación a escala real será eficiente y apoyará 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 utilizó fue el de la prueba de jarras y se llevó a cabo mediante el análisis de 3 corridas de una muestra de agua residual, con diferente concentración de sulfato de aluminio al 1%, determinando en cada una, con curvas de consumo, la dosis óptima con base en el parámetro de turbidez. También se midieron 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.

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 y también 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 2, se detalla el desarrollo de la investigación, presentando la metodología utilizada para determinar la dosis óptima y su eficiencia mediante el ensayo de jarras y el comparativo de parámetros iniciales y finales de la muestra.

En el capítulo 3, se plasman los resultados obtenidos, siendo estos los parámetros de descarga del agua sin tratamiento, la dosis óptima de coagulante, los parámetros de descarga después del tratamiento y la eficiencia de la dosis óptima. Posteriormente, en el capítulo 4 se realizó la discusión de los resultados obtenidos, para finalizar con las conclusiones obtenidas del ensayo y dar las recomendaciones pertinentes del mismo.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. 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), 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 simultáneo, 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, resultó 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 cáscara 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.

1.2. 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.

1.2.1. Agua residual de tipo especial

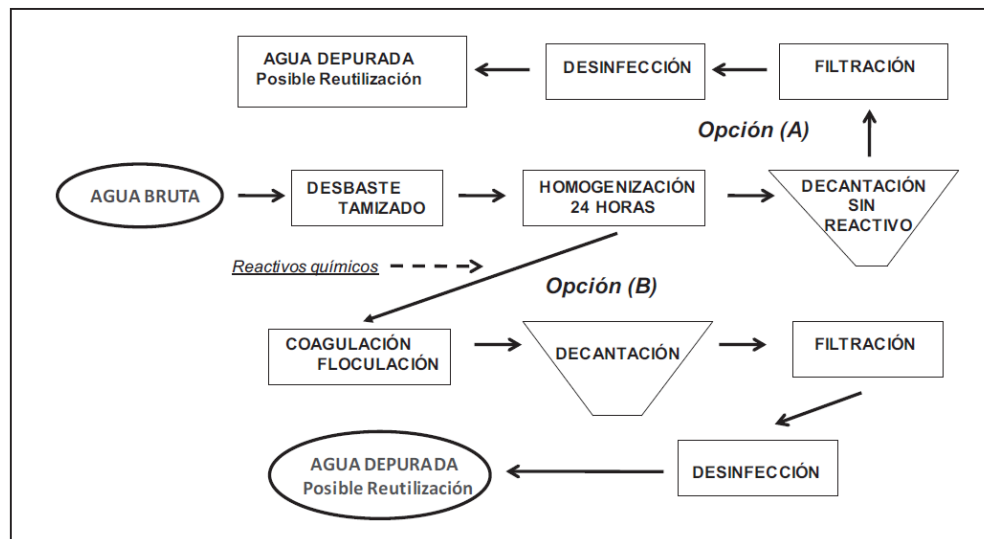
Se les llama aguas residuales especiales a las descargas por servicios públicos y municipales y a las vertidas como resultado de actividades derivadas con la agricultura, industria pecuaria, industria, hospitales y todas aquellas que no sean clasificadas de tipo ordinario, así como la mezcla entre vertidos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

1.2.2. 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 derivados 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 (2013). *Procesos fisicoquímicos en depuración de aguas.*

1.2.3. 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, Geyer y Okun, 1995).

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).

1.2.3.1. 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 del 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.

Continuación tabla I.

Característica	Procedencia
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 & Eddy, Inc. (1995). *Ingeniería de aguas residuales*.

1.2.3.2. 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.
Fósforo	Uso de detergentes industriales y agentes químicos utilizados en limpiezas.

Continuación tabla II.

Característica	Procedencia
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 & Eddy, Inc. (1995). *Ingeniería de aguas residuales*.

1.2.3.3. 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 & Eddy, Inc. (1995). *Ingeniería de aguas residuales*.

1.2.4. 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.

1.2.4.1. 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 & Eddy, Inc., 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

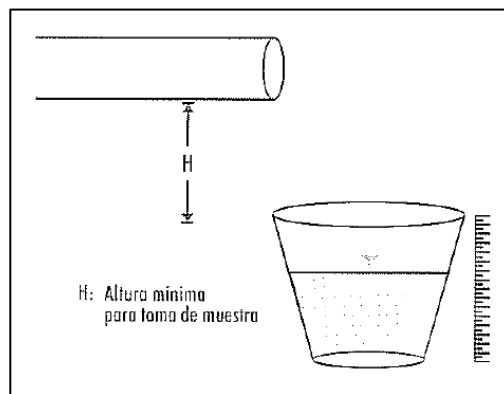
completamente se puede utilizar uno de referencia y hacer modificaciones (Asociación Nacional de Industriales, 1997).

1.2.4.1.1. Medición de caudal volumétrico manual

Con este tipo de técnica se utiliza un recipiente graduado o aforado y un cronómetro. 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. Donde el caudal Q se mide en (l/s), el volumen V en (L) y el tiempo en (s) (Asociación Nacional de Industriales, 1997).

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

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



Fuente: Asociación Nacional de Industriales (1997). *Manual de Caracterización de Aguas Residuales Industriales*.

1.2.4.2. 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).

1.2.4.2.1. Manipulación de muestras

Según Asociación Nacional de Industriales (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 Industriales (1997). *Manual de Caracterización de Aguas Residuales Industriales*.

1.2.5. 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 y Vasquez, 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).

1.3. 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 & Eddy, Inc., 1995).

1.3.1. 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 o biológicos.

1.3.1.1. 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 & Eddy, Inc., 1995).

1.3.1.2. 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 el desarrollo de reacciones químicas. Para realizar este tipo de tratamientos las operaciones más comunes son precipitación, adsorción y desinfección.

1.3.1.3. Tratamientos biológicos

La principal función de este tipo de tratamiento es 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 atmósfera. Otra aplicación importante es que mediante este tipo de tratamiento se puede eliminar el nitrógeno contenido en el agua residual.

1.3.2. 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.

1.3.2.1. 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).

1.3.2.2. 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 & Eddy, Inc., 1995).

1.3.2.3. Tratamiento terciario

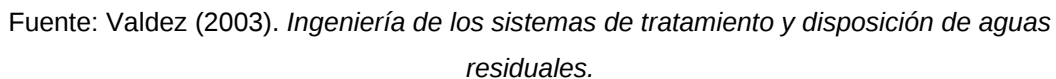
A esta tercera etapa del tratamiento de aguas se le conoce también como tratamiento avanzado, ya que puede incluir los tres tipos de tratamiento físico, químico y biológico para poder conseguir objetivos de remoción de contaminación más específicos en el agua tratada, que no se pueden lograr mediante tratamiento secundario (Ramalho, 1983).

Entre las técnicas utilizadas en este tipo de tratamiento podemos encontrar intercambio iónico, ósmosis inversa, adsorción y electrodiálisis.

1.3.2.4. 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).

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



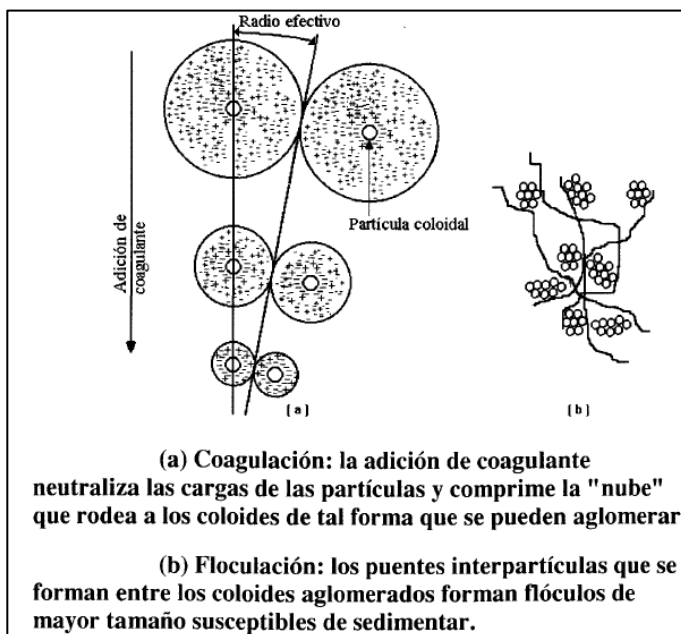
La coagulación - floculación es una de las técnicas más viables para tratamiento de aguas utilizada en la industria ya que presenta una alta eficiencia y aun siendo procesos naturalmente distintos, ya que la coagulación es un proceso puramente químico y la floculación es un proceso físico, es muy usual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

Según Noyola (2000), este tipo de combinación de procesos es aplicable en las siguientes situaciones específicas:

- 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 (2000). *Alternativas de tratamiento de aguas residuales*.

1.4.1. **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).

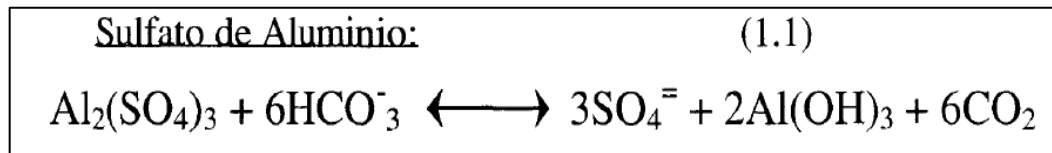
La coagulación entonces consiste en agregar reactivos químicos al agua residual para desestabilizar las cargas coloidales de las partículas mediante la disminución del potencial Z. Esta desestabilización sucede por el contacto que se establece entre las partículas coloidales suspendidas y las partículas 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 (2000). *Alternativas de tratamiento de aguas residuales*.

1.4.2. 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 flóculo resultante,

mientras más frágil el flóculo 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 $G \text{ (s}^{-1}\text{)}$
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 (2000). *Alternativas de tratamiento de aguas residuales*.

1.4.3. 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 flóculo 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 óptimo 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 hidrólisis 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).

1.4.4. 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).

1.4.4.1. 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 1 L 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•s) y V es el volumen del recipiente en (m^3).

$$P = G^2 \cdot \mu \cdot V \quad (\text{Ec. 2})$$

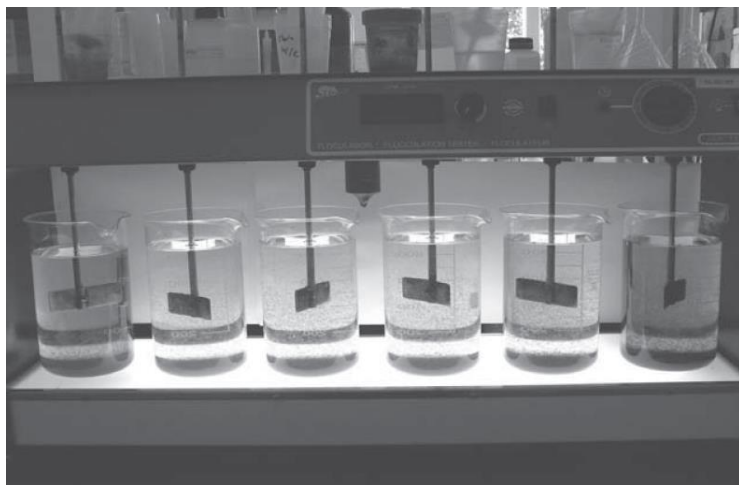
Ya con el dato conocido de potencia es necesario determinar la velocidad del agitador, la cual se calcula mediante la ecuación 3, donde n es la velocidad del agitador en (rev/s), P es la potencia del agitador en (W), N_p es el número de potencia, D_i es el diámetro del agitador en (m) y ρ es la densidad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

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

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

- Preparar la disolución del 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**



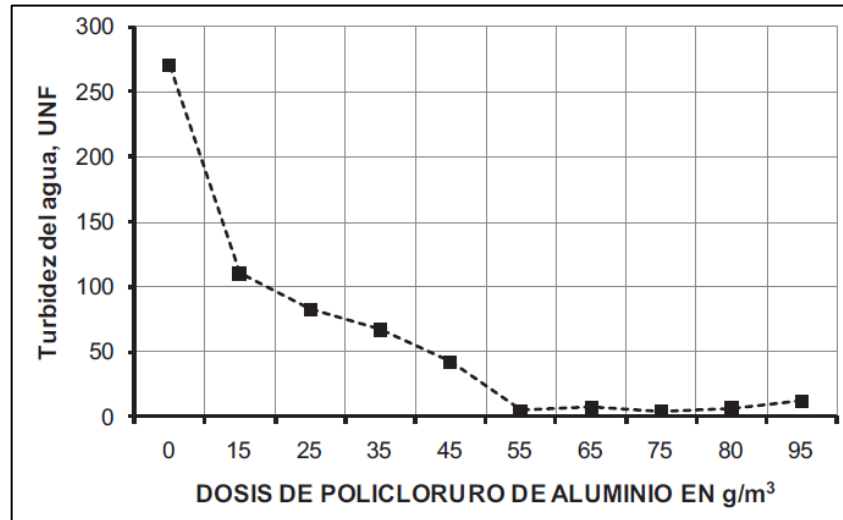
Fuente: Marín (2013). *Procesos fisicoquímicos en depuración de aguas*.

1.4.4.1.1. 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).

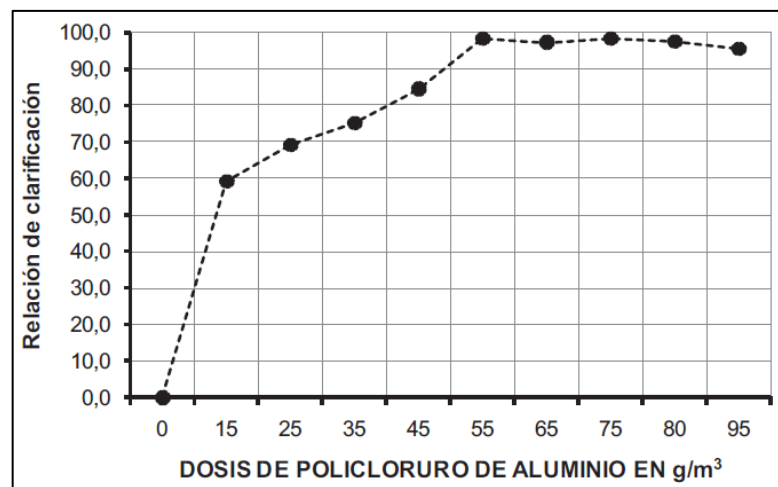
En las figuras 8 y 9 se pueden observar dos curvas de consumo de coagulante utilizando policloruro de aluminio y los parámetros turbidez y relación de clarificación.

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



Fuente: Marín (2013). *Procesos fisicoquímicos en depuración de aguas.*

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



Fuente: Marín (2013). *Procesos fisicoquímicos en depuración de aguas.*

1.5. 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.

1.5.1. Acuerdo Gubernativo 236-2006

Este acuerdo llamado Reglamento de las descargas y reúso 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, 2006).

Este acuerdo fue creado con el objeto de establecer lineamientos y criterios que deben cumplirse de forma obligatoria para la descarga y reúso 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 reúso.
- Las personas que reúsen en su totalidad o de forma parcial las aguas residuales.
- Las personas encargadas del manejo, tratamiento y disposición final de lodos.

1.5.1.1. Capítulo VI - Parámetros para aguas residuales y valores de descarga al alcantarillado público

Según Acuerdo Gubernativo 236-2006 (2006), 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:

- 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, 2006).

En la figura 10 se presentan dichos valores y la etapa de cumplimiento vigente.

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

Etapa	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: Acuerdo Gubernativo 236-2006 (2006). *Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos.*

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, 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 público 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**

			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			
Parámetro	Dimensional	Valor inicial	Uno	Dos	Tres	Cuatro
Demanda bioquímica de oxígeno	Miligramos por litro	3500	1500	750	450	200

Fuente: Acuerdo Gubernativo 236-2006 (2006). *Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos.*

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, 2006).

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

			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			
Parámetros	Dimensionales	Valores iniciales	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: Acuerdo Gubernativo 236-2006 (2006). *Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos.*

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, 2006).

1.5.1.2. Capítulo IX - Seguimiento y evaluación

Se establece, mediante el artículo 49, que todos los entes generadores deberán realizar obligatoriamente 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.

1.5.1.3. 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.

1.5.2. Compromisos de resolución de licencia ambiental

De acuerdo con el instrumento de diagnóstico 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.

1.5.3. 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.

2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Datos históricos de agua residual

Se determinaron los parámetros a considerar en el presente estudio y se consolidó el histórico del análisis del agua residual a tratar de los últimos tres análisis realizados. Esto con el fin de tener una referencia de cuáles son las condiciones de la descarga. El análisis de este histórico de datos se resume en la tabla V.

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

Parámetro	Dimensionales	Histórico 1	Histórico 2	Histórico 3	Promedio
DBO	mg/L	804	765	793	787
DQO	mg/L	1423	1327	1256	1335
Sólidos sedimentables	mg/L	5	5.5	5.86	5.45
Sólidos suspendidos	mg/L	210	210	210	210
Turbidez	NTU	130.	127	96	118

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

2.2. Toma de muestra

El muestreo realizado consistió en la toma de una muestra simple, por el método volumétrico manual. La muestra fue tomada el primer lunes del mes por

la mañana con el fin de igualar las condiciones de toma de muestra del análisis histórico, momento en el cual se está descargando el agua de lavado en la planta.

Para la toma de muestra se eligió un punto ubicado en el tanque de paso temporal, previo a la descarga del agua residual. Se utilizaron recipientes plásticos para recolectar las muestras; para su almacenaje temporal y transporte dos recipientes de plástico no traslucido con capacidad de 20 litros cada uno. En total se muestreó un volumen de 40 litros de agua residual.

Las condiciones para la toma de muestra y el manejo de estas se realizaron de acuerdo con lo indicado en la tabla VI.

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

Condición	Cumple (Si/No)	Observaciones
Recipiente de vidrio o plástico	Si	Recipiente plástico.
Muestras refrigeradas después de tomadas	No	Debido a que no se tomarán parámetros microbiológicos no necesita refrigerarse.
Almacenamiento y traslado en oscuridad	Si	Plástico no traslucido, almacenado en baúl de carro.
Tiempo máximo entre toma de muestra y análisis debe ser de 48h.	Si	Entre la toma de muestra y el análisis pasaron 24 horas.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

En las figuras 13, 14 y 15 se plasma lo descrito anteriormente del procedimiento de toma de muestra.

Figura 13. **Punto de muestreo del agua residual**



Fuente: [Fotografía de Angel Hernández]. (Guatemala, Guatemala. 2021). Colección particular.
Guatemala.

Figura 14. **Proceso de muestreo**



Fuente: [Fotografía de Angel Hernández]. (Guatemala, Guatemala. 2021). Colección particular.
Guatemala.

Figura 15. **Transporte y almacenaje temporal de muestras**



Fuente: [Fotografía de Angel Hernández]. (Guatemala, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

2.3. Medición de condiciones iniciales

Para determinar los parámetros a los cuales se descarga el agua, previo al tratamiento de jarras se envió una muestra de las recolectadas a un análisis en laboratorio acreditado. El volumen requerido del laboratorio para realizar el análisis fue de 2.5 L.

2.4. Ensayo de prueba de jarras

Como prueba de tratabilidad del agua residual fue utilizada la metodología de ensayo de prueba de jarras, esta nos sirve para simular el tratamiento a escala laboratorio y determinar la dosis óptima de coagulante y floculante.

Por la naturaleza del agua residual en cuestión, con la medición de los parámetros iniciales, se determinó que no sería necesario el uso de floculante, este criterio se comprobó al tener una sedimentación efectiva durante el tiempo de sedimentación establecido. Para determinar la dosis óptima fue necesario

realizar 3 pruebas, variando entre cada una de ellas las condiciones de operación hasta llegar a la dosis óptima, posterior se realizó una cuarta prueba tomando en cuenta las condiciones de la jarra con la dosis óptima para corroborar la misma. El desarrollo de estas pruebas se describe a continuación.

2.4.1. Prueba de tratabilidad 1

Para realizar una prueba de jarras efectiva se debe fijar los parámetros a utilizar en el equipo, tomando en cuenta la naturaleza del agua y el tipo de químicos que se utilizaran. En esta primera prueba se utilizaron condiciones de operación encontradas en bibliografías referentes al tema las cuales se plasman en la tabla VII.

Tabla VII. Condiciones de operación ensayo de prueba de jarras 1

Condición	Dato
pH	5.5
Turbidez (NTU)	331
Alcalinidad (mg/L)	170
Coagulante	Sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) al 1 %
Velocidad (RPM)	Mezcla rápida: 75 Mezcla lenta: 30
Tiempo (min)	Mezcla rápida: 1 Mezcla lenta: 10 Sedimentación: 10
Volumen jarras (L)	1
Número de jarras	6

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

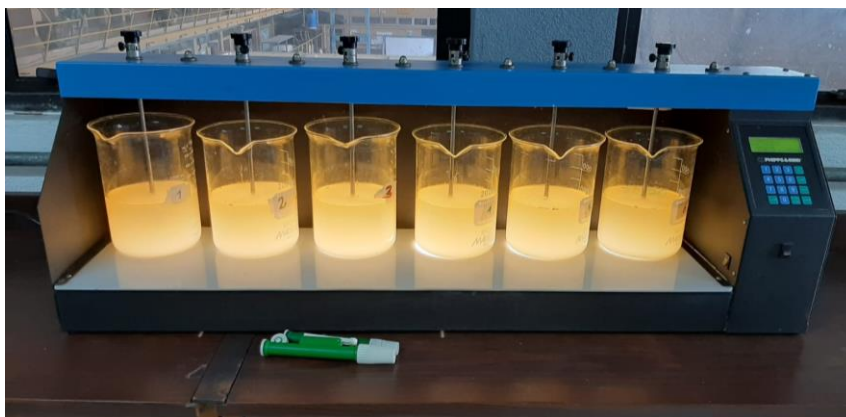
Fijados los parámetros para la prueba inicial se procedió a realizar la prueba en el equipo de jarras (figura 16). Por cada jarra con un litro de muestra se agregó la dosis de sulfato de aluminio variando la concentración en un rango de 150 – 200 mg/L. Las concentraciones utilizadas en cada jarra se muestran en la tabla VIII.

Tabla VIII. **Concentración de coagulante prueba 1**

No. de jarra	Coagulante (mg/L)
1	150
2	160
3	170
4	180
5	190
6	200

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 16. **Ensayo de jarras prueba 1**



Fuente: [Fotografía de Angel Hernández]. (Guatemala, Guatemala. 2021). Colección particular.
Guatemala.

Posterior a los 10 minutos de sedimentación se separó el agua tratada del sedimento para medir la turbidez en cada una de las muestras (figura 17). Este valor fue medido en el laboratorio utilizando un turbidímetro. Los valores de turbidez para cada muestra se plasman en la tabla IX.

Tabla IX. **Turbidez por jarra prueba 1**

No. de jarra	Coagulante (mg/L)	Turbidez (NTU)
1	150	26.2
2	160	26.35
3	170	26.38
4	180	26.4
5	190	27.5
6	200	29.7

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 17. **Muestras después de la prueba 1**



Fuente: [Fotografía de Angel Hernández]. (Guatemala, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

2.4.2. Prueba de tratabilidad 2

Posterior a analizar las muestras de la prueba 1 se observó que el agua se notaba un poco blanquecina después del tratamiento, por lo cual para la prueba 2 se mantuvieron las mismas condiciones de operación, disminuyendo la concentración de sulfato de aluminio al 1 %. Las condiciones de operación para esta prueba se detallan en la tabla X.

Tabla X. Condiciones de operación ensayo de prueba de jarras 2

Condición	Dato
pH	5.5
Turbidez (NTU)	331
Alcalinidad (mg/L)	170
Coagulante	Sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) al 1 %
Velocidad (RPM)	Mezcla rápida: 75 Mezcla lenta: 30
Tiempo (min)	Mezcla rápida: 1 Mezcla lenta: 10 Sedimentación: 10
Volumen jarras (L)	1
Número de jarras	6

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

El rango de concentración de coagulante para esta prueba (figura 18) se aplicó entre 90 – 140 mg/L. Los datos por cada jarra se indican en la tabla XI.

Tabla XI. **Concentración de coagulante prueba 2**

No. de jarra	Coagulante (mg/L)
1	90
2	100
3	110
4	120
5	130
6	140

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 18. **Ensayo de jarras prueba 2**



Fuente: [Fotografía de Angel Hernández]. (Guatemala, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

Luego de sedimentar durante el tiempo establecido nuevamente se separó el agua tratada de los sólidos (figura 19) para medir la turbidez posterior a la prueba. Los valores reflejados se encuentran en la tabla XII.

Tabla XII. **Turbidez por jarra prueba 2**

No. de jarra	Coagulante (mg/L)	Turbidez (NTU)
1	90	28
2	100	28.1
3	110	28
4	120	28.25
5	130	28.4
6	140	29.3

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 19. **Muestras después de la prueba 2**



Fuente: [Fotografía de Angel Hernández]. (Guatemala, Guatemala. 2021). Colección particular.
Guatemala.

2.4.3. **Prueba de tratabilidad 3**

Analizando las pruebas y las muestras finales de los ensayos anteriores se evidencia que en ambas ocasiones el agua después del tratamiento se presenta levemente blanquecina. Por lo cual para esta prueba se optó por elevar el pH inicial de la muestra y cambiar las condiciones de operación para aumentar la velocidad de mezcla rápida y lenta. El pH se aumentó aplicando 30 mL de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) a cada muestra de 1 litro de agua. Las condiciones fijadas se indican en la tabla XIII.

Tabla XIII. **Condiciones de operación ensayo de prueba de jarras 3**

Condición	Dato
pH	8
Turbidez (NTU)	331
Alcalinidad (mg/L)	170
Coagulante	Sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) al 1 %
Regulador de pH	Hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) al 0.05 %
Velocidad (RPM)	Mezcla rápida: 100 Mezcla lenta: 60
Tiempo (min)	Mezcla rápida: 2 Mezcla lenta: 10 Sedimentación: 10
Volumen jarras (L)	1
Número de jarras	6

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

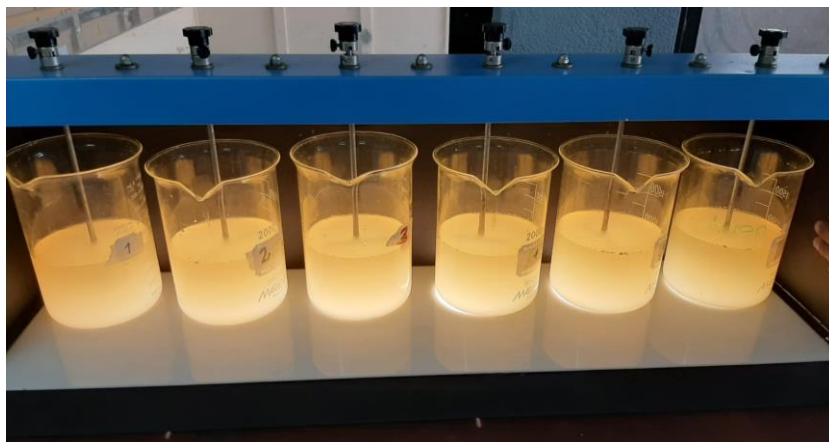
Para la concentración de coagulante utilizado en esta prueba (figura 20) se tomó un rango de concentraciones que estuviera dentro de los utilizados en las pruebas anteriores, siendo este entre 100 – 150 mg/L. Los datos para cada jarra se plasman en la tabla XIV.

Tabla XIV. **Concentración de coagulante prueba 3**

No. de jarra	Coagulante (mg/L)
1	100
2	110
3	120
4	130
5	140
6	150

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 20. **Ensayo de prueba de jarras 3**



Fuente: [Fotografía de Angel Hernández]. (Guatemala, Guatemala. 2021). Colección particular.
Guatemala.

Posterior a esta prueba y a cumplirse el tiempo de sedimentación se separó nuevamente el agua tratada del sedimento para medir la turbidez (figura 21). Los datos para turbidez después de la prueba 3 se reflejan en la tabla XV.

Tabla XV. **Turbidez por jarra prueba 3**

No. de jarra	Coagulante (mg/L)	Turbidez (NTU)
1	100	5.97
2	110	5.99
3	120	6.12
4	130	6.17
5	140	6.25
6	150	6.60

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 21. **Muestras después de la prueba 3**



Fuente: [Fotografía de Angel Hernández]. (Guatemala, Guatemala. 2021). Colección particular.
Guatemala.

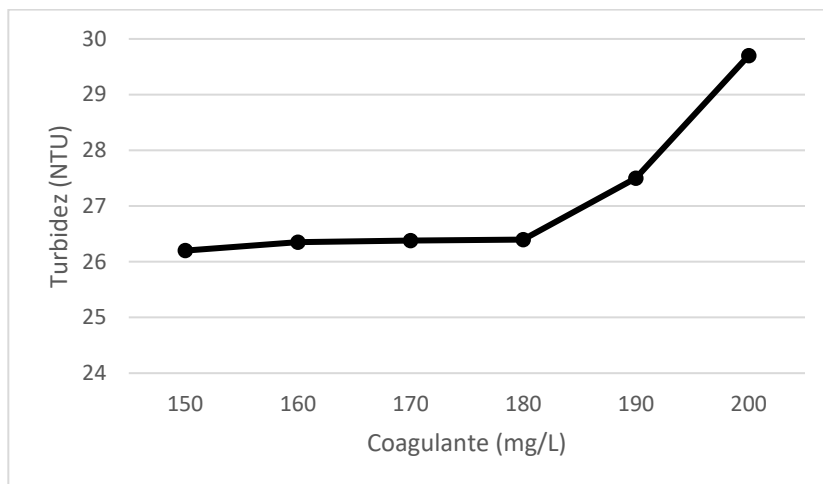
2.5. Determinación de la dosis óptima de coagulante

Para determinar la dosis óptima de coagulante se tomaron en cuenta los datos de turbidez para las tres pruebas, elaborando con ellos las curvas de consumo.

2.5.1. Curvas de consumo de coagulante

El valor mínimo de turbidez de estas curvas de consumo será el seleccionado como la dosis óptima. Para el floculante no se establece dosis óptima pues se logró comprobar con las 3 pruebas realizadas que el proceso de sedimentación se da de forma efectiva sin necesidad de este químico. Los datos para elaborar la curva de consumo para la prueba 1 (figura 22) se pueden consultar en la tabla IX.

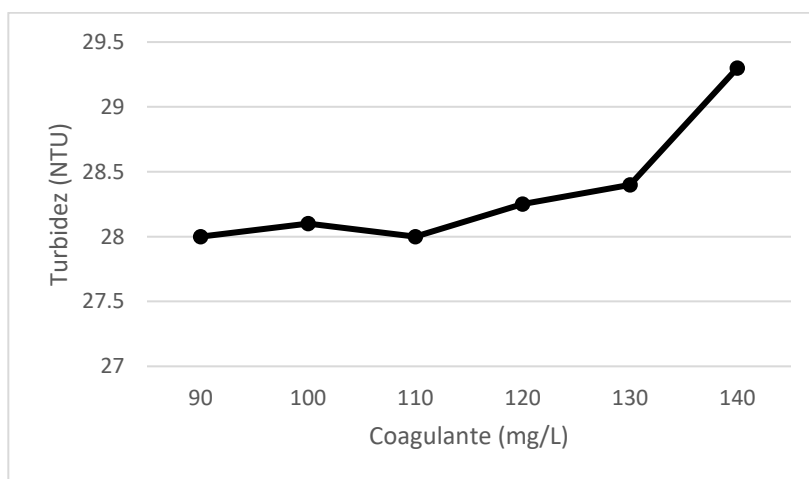
Figura 22. **Curva de consumo de coagulante prueba 1**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

La curva de consumo de coagulante para la prueba 2 se realizó a partir de la tabla XII. Esta la podemos visualizar en la figura 23.

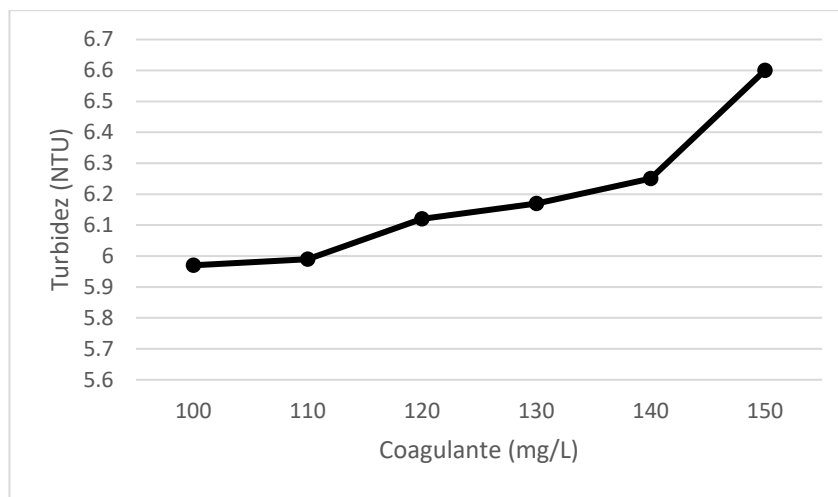
Figura 23. **Curva de consumo de coagulante prueba 2**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Para la prueba 3, la curva de consumo (figura 24), se esbozó a partir de la tabla XV, la cual se muestra a continuación.

Figura 24. **Curva de consumo de coagulante prueba 3**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Finalmente, para poder visualizar de una mejor forma los resultados de las tres pruebas se realizó una curva de consumo de coagulante integrando todos los datos, y así poder visualizar de una mejor forma la dosis óptima con el mínimo de turbidez. Los datos para esta curva de consumo se plasman en la tabla XVI.

Tabla XVI. **Datos curva de consumo de coagulante integrada**

Coagulante (mg/L)	Turbidez 1 (NTU)	Turbidez 2 (NTU)	Turbidez 3 (NTU)
90	-	28	-
100	-	28.1	5.97
110	-	28	5.99

Continuación tabla XVI.

Coagulante (mg/L)	Turbidez 1 (NTU)	Turbidez 2 (NTU)	Turbidez 3 (NTU)
120	-	28.25	6.12
130	-	28.4	6.17
140	-	29.3	6.25
150	26.2	-	6.60
160	26.35	-	-
170	26.38	-	-
180	26.4	-	-
190	27.5	-	-
200	29.7	-	-

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

En la figura 25 se plasma un comparativo entre las muestras con la turbidez más baja para las 3 pruebas, siendo la tercera muestra de izquierda a derecha la que tiene la dosis óptima.

Figura 25. **Comparativo muestras finales de las 3 pruebas**



Fuente: [Fotografía de Angel Hernández]. (Guatemala, Guatemala. 2021). Colección particular.
Guatemala.

2.5.2. Confirmación de dosis óptima

Para confirmar el dato de la dosis óptima se realizó una cuarta prueba de tratabilidad, en la cual se replicó en 4 jarras las condiciones de operación de la muestra con la dosis óptima, esto con el fin de obtener datos de turbidez para una misma condición y verificar que los mismos tengan una desviación no significativa. Las condiciones de operación para esta última prueba se detallan en la tabla XVII.

Tabla XVII. **Condiciones de operación ensayo de prueba de jarras 4**

Condición	Dato
pH	8
Turbidez (NTU)	331
Alcalinidad (mg/L)	170
Coagulante	Sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) al 1 %
Regulador de pH	Hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) al 0.05 %
Velocidad (RPM)	Mezcla rápida: 100 Mezcla lenta: 60
Tiempo (min)	Mezcla rápida: 2 Mezcla lenta: 10 Sedimentación: 10
Volumen jarras (L)	1
Número de jarras	4

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

La concentración de coagulante en las 4 jarras fue de 100 mg/L de coagulante, siendo esta la dosis óptima (figura 26). Los datos de turbidez obtenidos para esta prueba se muestran en la tabla XVIII.

Tabla XVIII. **Turbidez por jarra prueba 4**

No. de jarra	Coagulante (mg/L)	Turbidez (NTU)
1	100	5.87
2	100	5.80
3	100	5.91
4	100	5.96

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 26. **Prueba de confirmación de dosis óptima**



Fuente: [Fotografía de Angel Hernández]. (Guatemala, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

2.6. **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 utilizó la siguiente ecuación:

$$\%R = \frac{P_o - P_1}{P_o} \times 100 \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

%R = Porcentaje de reducción de la concentración.

P₀ = Concentración del parámetro antes del tratamiento.

P₁ = Concentración del parámetro después del tratamiento a escala laboratorio.

Ejemplo para el parámetro DBO:

- P₀ = 779 mg/L
- P₁ = 127.8 mg/L

$$\%R = \frac{779 \frac{mg}{L} - 127.8 \frac{mg}{L}}{779 \frac{mg}{L}} \times 100$$

$$\%R = 84 \%$$

Los datos calculados a partir de la ecuación 2 se muestran en la tabla XIX.

Tabla XIX. **Cálculo porcentaje de reducción de concentraciones**

Parámetro	P ₀	P ₁	%R
DBO (mg/L)	779	127.8	84 %
DQO (mg/L)	1375	201	85 %
Sólidos sedimentables (mg/L)	9.56	1.66	83 %
Sólidos suspendidos (mg/L)	199	17	91 %
Turbidez (UTN)	331	3.1	99 %

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

2.7. Eficacia del tratamiento a escala laboratorio

La eficacia del tratamiento a escala laboratorio, tomando en cuenta los resultados de la dosis óptima, se determinaron a partir del porcentaje de reducción de parámetros, comparando con los parámetros de reducción recomendados en la bibliografía.

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

En este trabajo de graduación se estableció como objetivo determinar la dosis óptima de coagulante y floculante mediante un tratamiento de prueba de jarras para agua residual. A continuación, se detallan los resultados obtenidos de este tratamiento a escala laboratorio.

3.1. Parámetros de descarga del agua sin tratamiento

Para ello fue necesario caracterizar el agua inicialmente y así conocer los parámetros de la descarga en cuestión. Los resultados del análisis de laboratorio para la muestra inicial se plasman en la tabla XX.

Tabla XX. Concentraciones iniciales de muestra

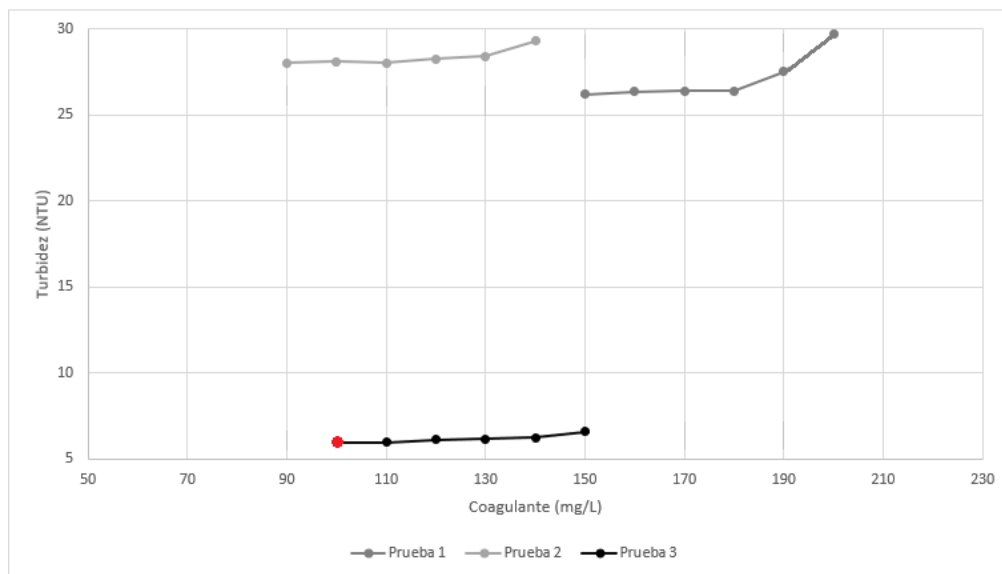
Parámetro	Dato
DBO (mg/L)	779
DQO (mg/L)	1375
Sólidos sedimentables (mg/L)	9.56
Sólidos suspendidos (mg/L)	199
Turbidez (NTU)	331
pH	8

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

3.2. Dosis óptima de coagulante

Para determinar la dosis óptima de coagulante se realizaron 3 pruebas de jaras, variando entre ellas la concentración de coagulante y el pH de la muestra. Para el floculante después de la primera prueba se estableció que no era necesaria su aplicación ya que la muestra sedimentó de forma efectiva en el tiempo establecido. La dosis óptima se determinó mediante curvas de consumo, del parámetro turbidez en función de la concentración de coagulante utilizado. Las curvas de consumo se presentan en la figura 27.

Figura 27. Curva de consumo de coagulante integrada



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

La dosis óptima se estableció con el valor mínimo de turbidez entre las 3 pruebas, este se ubica gráficamente en el punto rojo de la figura 27. Los datos que corresponden a este punto se detallan en la tabla XXI.

Tabla XXI. **Dosis óptima de coagulante**

Tipo	Sustancia	Dosis óptima (mg/L)	Turbidez (NTU)
Coagulante	(Al ₂ (SO ₄) ₃) al 1 %	100	5.97

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

3.3. **Confirmación de dosis óptima de coagulante**

Posterior a determinar la dosis óptima de coagulante se realizó una última prueba con 4 jarras, en las mismas condiciones, para confirmar el dato de turbidez obtenido y evaluar la variabilidad de este. Los resultados obtenidos de esta confirmación se presentan en la tabla XXII.

Tabla XXII. **Desviación estándar turbidez de dosis óptima**

No. de jarra	Turbidez (NTU)	Turbidez (media)	Desviación estándar
1	5.87	5.88	0.058
2	5.80		
3	5.91		
4	5.96		

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

3.4. **Parámetros del agua residual después del tratamiento**

Al tener la confirmación de la dosis óptima fueron analizadas las muestras para establecer los parámetros después del ensayo a escala laboratorio. Con los resultados obtenidos del laboratorio externo se evidencia que los parámetros

después del tratamiento de jarras cumplen con el requisito legal nacional para descarga de agua residual.

Los datos para la muestra de agua con la dosis óptima se detallan en la tabla XXIII.

Tabla XXIII. **Concentraciones finales de muestra**

Parámetro	Dato
DBO (mg/L)	127.8
DQO (mg/L)	201
Sólidos sedimentables (mg/L)	1.66
Sólidos suspendidos (mg/L)	17
Turbidez (NTU)	3.1
pH	6.32

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

3.5. Eficiencia del tratamiento con la dosis óptima

Para corroborar que el tratamiento con esta dosis óptima es viable se determinó el porcentaje de reducción de parámetros, con las condiciones iniciales y finales de muestra. Estos porcentajes se plasman en la tabla XXIV.

Tabla XXIV. **Porcentaje de reducción de concentraciones**

Parámetro	% R
DBO (mg/L)	84 %
DQO (mg/L)	85 %
Sólidos sedimentables (mg/L)	83 %
Sólidos suspendidos (mg/L)	91 %
Turbidez (UTN)	99 %

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Con el porcentaje de reducción y basados en los criterios bibliográficos se determinó si el tratamiento es eficiente para cada parámetro de descarga. A continuación, en la tabla XXV se visualizan estos datos.

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

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

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

3.6. Muestra inicial y muestra final

De forma visual también se pueden comprobar los resultados al apreciar el cambio en el aspecto entre la muestra inicial y la muestra con la dosis óptima después del ensayo de jarras. El comparativo entre las muestras se plasma en la figura 28.

Figura 28. **Comparativo muestra inicial y final**



Fuente: [Fotografía de Angel Hernández]. (Guatemala, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

3.7. Costo del agua tratada

Tomando en cuenta el caudal diario de la empresa se proyectó el costo del agua tratada en un mes. El mismo se detalla en la tabla XXVI.

Tabla XXVI. Costos del agua tratada por mes

Parámetro	Dato
Caudal diario (m ³ /día)	253.3
Caudal mensual (m ³ /mes)	5,066
Costo sulfato de aluminio (Q/kg)	5.50
Cantidad necesaria (kg/mes)	759.9
Costo mensual para tratar el agua (Q/mes)	4,179.45

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

3.8. Gradiente de velocidad para flujo laminar y turbulento

El gradiente de velocidad para cada tipo de flujo utilizado en el tiempo de mezclado se calculó a partir de la ecuación 2 y se detalla en la tabla XXVII.

Tabla XXVII. Gradiente de velocidad por tipo de flujo

Tipo de flujo	Gradiente de Velocidad (s-1)
Laminar (60 rpm)	149
Turbulento (100 rpm)	183

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

3.9. Porcentaje de lodos en la muestra con dosis óptima

Tomando en cuenta los sólidos sedimentados a los 30 minutos y los sólidos suspendidos en la muestra inicial se calcula el porcentaje de lodos de la muestra con la dosis óptima, el cual se especifica en la tabla XXVIII.

Tabla XXVIII. **Porcentaje de lodos**

Sólidos	Dato (mg/L)
Sedimentados finales	5
Suspendidos inicial	17
Porcentaje de lodos	29 %

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

3.10. Comparativo de parámetros de trabajo con Acuerdo Gubernativo 236-2006

Como referencia legal para cumplimiento se tomó de referencia el Acuerdo Gubernativo 236-2006, por lo cual se compararon los parámetros finales del estudio para verificar si existe cumplimiento. Este comparativo se plasma en la tabla XXIX.

Tabla XXIX. **Comparativo de parámetros**

Parámetro	Dato dosis óptima	AG 236-2006	Cumple (Si/No)
DBO (mg/L)	127.8	200	Si
DQO (mg/L)	201	150	Si
Sólidos sedimentables (mg/L)	1.66	100	Si

Continuación tabla XXIX.

Sólidos suspendidos (mg/L)	17	150	Si
Turbidez (UTN)	3.1	5	Si
pH	6.32	6-9	Si

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el presente trabajo de investigación se propuso un ensayo de tratamiento primario de aguas residuales, a escala laboratorio utilizando una prueba de jarras, con el objetivo de evaluar la eficiencia de la técnica de coagulación y floculación como tratamiento de agua residual en una industria de alimentos, determinando la dosis óptima de los químicos a utilizar que hagan que este sea viable para implementar.

La industria de alimentos en cuestión procesa productos utilizando principalmente harina de trigo y materias primas secundarias como levaduras, leudantes, saborizantes y colorantes. Como resultado de los procesos y operación de la empresa se descargan aguas ordinarias, de los servicios básicos de higiene y aguas industriales derivadas del proceso de producción y limpieza. Por lo cual se identifica la necesidad de tener un tratamiento de agua residual en sus descargas, que sea eficaz para poder cumplir con las políticas ambientales internas y con los requisitos legales nacionales que apliquen.

De acuerdo con el historial de los análisis realizados a la descarga por parte de la empresa, se evidencia que el agua tiene principalmente sólidos y materia orgánica en suspensión, por lo cual se propone inicialmente hacer pruebas con un tratamiento primario, por coagulación y floculación y así verificar si este es eficiente y viable para su implementación a escala real.

La técnica de coagulación y floculación fue seleccionada ya que para tratamiento de aguas residuales presenta una alta efectividad eliminando materia coloidal, sólidos suspendidos y una mejora considerable en los parámetros como

turbidez y color. Además de ser también viable económicamente por utilizar químicos de costo accesible y poco tiempo de retención y sedimentación de las descargas.

Para poder realizar el ensayo propuesto a escala laboratorio fue necesario realizar una toma de muestra, esta se tomó bajo las mismas condiciones en las cuales se había tomado las muestras del historial; para ello fue necesario tomar únicamente una muestra puntual, mediante el método volumétrico manual, ya que las aguas residuales descargadas vienen de distintos puntos, pero son recolectadas en un tanque, el cual tiene una compuerta de acceso que permite tomar la muestra sin ningún problema.

Las condiciones para resguardo de las muestras incluían utilizar recipientes plásticos esterilizados y que no fueran traslúcidos para evitar la alteración del parámetro turbidez. En este caso las muestras no necesitaron refrigeración ya que no se iban a considerar parámetros microbiológicos dentro del estudio y se cumplió con el tiempo de resguardo de las muestras, transcurriendo únicamente 24 horas entre la toma de muestra y el tratamiento en el laboratorio.

Previo al ensayo a escala laboratorio fue necesario separar 2.5 L de muestra para enviar a analizar, estos datos iniciales fueron útiles para poder tener un comparativo de la muestra antes y después de la prueba. Los parámetros considerados en el estudio fueron DBO, DQO, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos y turbidez.

Para la realización del ensayo se utilizó un equipo de jarras y fue necesario realizar 3 pruebas hasta llegar a la dosis óptima, en cada prueba se iban evaluando los resultados obtenidos y proponiendo distintas condiciones para mejorar los mismos.

Para la primera prueba se midió la turbidez inicial del agua, el pH y la alcalinidad. Al analizar el parámetro inicial de turbidez y alcalinidad se propuso que en esta corrida no se iba a aplicar floculante, ya que se comprobaría si en el tiempo de sedimentación establecido se lograba un proceso efectivo. Las condiciones para esta prueba inicial se detallan en la tabla VII, utilizando una concentración de sulfato de aluminio en un rango de 150 – 200 mg/L.

Como resultado se obtuvo una dosis óptima de sulfato de aluminio, siendo la concentración más baja utilizada la que logró disminuir al mínimo el parámetro turbidez (26.2 NTU), pero dicha muestra presentaba una coloración blanquecina por la formación de hidróxidos de aluminio, derivado de la reacción con agua, esto apoyado por la alcalinidad de la muestra que al ser alta mantiene partículas en suspensión y a las bajas velocidades que se utilizaron de mezcla rápida y lenta, la cual permite la formación de este compuesto. Los *flocs* formados pudieron sedimentar al 100 % en el tiempo establecido, por lo cual uno de los primeros resultados concluyentes de esta primera prueba fue que no se necesitaba la presencia de un agente floculante para lograr un tratamiento eficiente.

Tomada la decisión de no utilizar un agente floculante y analizando lo sucedido en la prueba 1, se procedió a realizar la segunda prueba manteniendo las mismas condiciones iniciales de muestra y velocidades de mezcla rápida y lenta, pero disminuyendo la concentración de sulfato de aluminio utilizado (90 - 140 mg/L), esto con el fin de evaluar si a menor concentración disminuye la reacción con agua y se evitaba la formación del color blanquecino en la muestra con la dosis óptima.

Las condiciones establecidas para esta prueba se detallan en la tabla X y como resultado se obtuvo una turbidez relativamente constante (28 NTU)

variando únicamente entre ellas como máximo 1.3 NTU, pero muy parecida al rango de turbidez de la prueba anterior y nuevamente se presentó el aspecto blanquecino en todas las muestras. Por lo cual de esta prueba se concluye que este aspecto en las muestras después del tratamiento de jarras no depende de la concentración del coagulante.

Para la tercera prueba tomando como base los resultados concluyentes de los dos ensayos anteriores y considerando que el pH y la alcalinidad afectan la solubilidad del coagulante e influyen considerablemente en la formación del *floc* y la reacción del químico con agua, se decidió mantener la concentración de coagulante combinando los rangos utilizados en las pruebas anteriores (100-150 mg/L) pero aumentando la velocidad de mezcla lenta y rápida con el objetivo de crear una reacción más rápida y una formación óptima del *floc*.

También se aumentó el pH de 5.5 a 8 en todas las muestras, agregando 30 mL de hidróxido de calcio al 0.05 %. Posterior a la realización de esta prueba, con las condiciones dadas en la tabla XIII, se obtuvo como resultado una disminución de la turbidez dando un rango de entre 5.97 – 6.60 NTU. En estas muestras ya no se observó el color blanquecino del agua, por lo cual se concluye que entre ellas se encontraba la dosis óptima para este ensayo.

La determinación de la dosis óptima se realizó mediante el análisis comparativo de curvas de consumo de coagulante para las 3 pruebas, en las cuales se relaciona el parámetro turbidez en función de la concentración de sulfato de aluminio. Siendo la dosis óptima el punto mínimo de las 3 curvas, correspondiendo a los valores de 5.97 NTU con una concentración de 100 mg/L de sulfato de aluminio. Este valor de turbidez se acerca a los parámetros establecidos internacionalmente en donde el agua es aceptable con una turbidez de 5 NTU.

Analizando la tendencia de las tres curvas de consumo diagramadas a partir de las 3 pruebas, se evidencia una tendencia marcada relacionada al aumento de la turbidez con el aumento de la concentración de coagulante utilizado, por lo cual se infiere que existe un punto de equilibrio en el cual la concentración del químico utilizado actúa inversamente al objetivo propuesto, aportando color al agua y así aumentando la turbidez.

Posterior a determinar la dosis óptima se realizó una última prueba para comprobar la confiabilidad de esta, mediante la desviación estándar del parámetro de turbidez para 4 muestras ensayadas en las mismas condiciones en las que se estableció la dosis óptima. Como resultado se obtuvo un rango de turbidez entre 5.87 – 5.96 NTU reflejando una desviación estándar de 0.058, la cual para un grado de confiabilidad del 95 % es aceptable y nos indica que no hay variabilidad significativa en los datos.

Estas muestras con la dosis óptima fueron enviadas a analizar a un laboratorio para determinar los parámetros posteriores al tratamiento. Los resultados se reflejan en la tabla XXIII y al compararlos con los resultados previos al tratamiento nos dan un porcentaje de reducción de parámetros de 84 % para DBO, 85 % para DQO, 91 % para sólidos suspendidos y 99 % para turbidez. Tomando como base los porcentajes de remoción aceptados en este tipo de tratamiento se interpreta que si es eficiente para su implementación pues se logra remover arriba del 80 % para los parámetros en cuestión y también logra reducirlos de forma que cumplan con la legislación nacional y con las políticas internas de la empresa.

También se determina que es una opción viable económicamente ya que no es necesario utilizar un agente floculante sino solo el coagulante, siendo el sulfato de aluminio uno de los químicos más accesibles en el mercado. Lo que

hace que el costo mensual del agua tratada para un caudal de 5066 m³/mes sea de Q. 4,179.45. También se determina un porcentaje de lodos cercano al 30 % por lo cual el costo de tratamiento de estos no representará un impacto alto a la empresa.

CONCLUSIONES

1. Se determinó que los parámetros de descarga del agua sin tratamiento son 779 mg/L para DBO, 1375 mg/L para DQO, 9.56 mg/L para sólidos sedimentables, 199 mg/L para sólidos suspendidos y 331 NTU para turbidez.
2. Se definió, mediante el ensayo de prueba de jarras, que para este tipo de agua residual no es necesario utilizar un agente floculante para el tratamiento debido a que solo con el coagulante utilizado (sulfato de aluminio), la muestra se sedimenta en el tiempo establecido.
3. La dosis óptima de sulfato de aluminio al 1 %, utilizado como agente coagulante, es de 100 mg/L para el agua residual en cuestión con condiciones iniciales de pH = 8, alcalinidad = 170 mg/L y turbidez = 331 NTU.
4. Los parámetros del agua residual después del tratamiento a escala laboratorio, presentan un alto porcentaje de remoción, siendo estos 84 % para DBO, 85 % para DQO, 83 % para sólidos sedimentables, 91 % para sólidos suspendidos y 99 % para turbidez.
5. El procedimiento propuesto a escala laboratorio, con las condiciones de operación dadas, es eficiente para tratar el agua residual de la industria de alimentos en cuestión ya que los porcentajes de remoción de los parámetros después del tratamiento son mayores a los establecidos para que el tratamiento se considere eficaz.

RECOMENDACIONES

1. Considerar implementar la propuesta a escala real en la industria de alimentos en donde fue tomada la muestra para poder tratar las descargas de agua residual ya que el tratamiento es efectivo.
2. Evaluar previamente al tratamiento a escala laboratorio las propiedades iniciales del agua residual (pH, alcalinidad y turbidez), para definir los parámetros óptimos a utilizar en la prueba de jarras.
3. Evaluar el tiempo de sedimentación, después de correr un ensayo de jarras aplicando solo coagulante, para definir si es necesario aplicar floculante. En caso sea necesario aplicar un floculante este debería ser de tipo catiónico.
4. Considerar la técnica de coagulación, utilizando sulfato de aluminio, como tratamiento de agua residual en otros tipos de industria que tengan características de descarga similares a las de la industria de alimentos en cuestión, debido a que este estudio presentó una factibilidad técnica al no utilizar floculante para sedimentar y altos porcentajes de remoción de contaminantes en el agua.
5. Realizar el ensayo de prueba de jarras utilizando otros tipos de coagulantes como sales, polímeros o coagulantes naturales.

REFERENCIAS

1. Acuerdo Gubernativo 236-2006. Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos. Diario de Centroamérica. Guatemala. 5 de mayo de 2006.
2. Asociación Nacional de Industriales (1997). *Manual de caracterización de aguas residuales industriales*. Medellín, Colombia: Ideas Gráficas Ltda.
3. Asturias, J., y Sagastume, A. (marzo, 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), 11-15.
4. Azabache, Y., Murrieta, E., García, P., Ayala, M., Cáceres, G., y Garcia, M. (julio, 2020). Tratamiento del agua residual de un matadero: Eficiencia del proceso de coagulación-floculación. *Agroindustrial Science*, 10(1), 23-27.
5. Cárdenas, Y. (enero, 2000). Tratamiento de agua: Coagulación y floculación. *Evaluación de plantas y desarrollo tecnológico SEDAPAL*, 1(1), 44.
6. Devesa-Rey, R., Rodríguez, F., y Madriñan, S. (marzo, 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*. Ciudad de México, México: Limusa S.A.
8. Lorenzo, E., Ocaña, J., García, L., y Venta, M. (abril, 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*. Madrid, España: Díaz de Santos, S.A.
10. Martínez, S. (1999). *Parámetros de diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales*. Ciudad de México, México: Universidad Autónoma Metropolitana.
11. Metcalf & Eddy, Inc. (1995). *Ingeniería de las aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización*. Madrid, España: McGraw-Hill.
12. Miranda, R., Oliet, M., Pérez-Corona, T., Alonso, M., Madrid, Y., Domínguez, J. y García, P. (2018). *Tratamiento de aguas residuales*. Madrid, España: Dextra Editorial, S. L.
13. Ramalho, R. (1996). *Tratamiento de aguas residuales*. Barcelona, España: Editorial Reverté, S.A.

14. Romero, J. (2002). *Calidad del agua*. Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
15. Sierra, C. (2011). *Calidad del agua: evaluación y tratamiento*. Medellín, Colombia: Universidad de Medellín.
16. Torres, L., De la Peña, L., Gallegos, J., Rodríguez, M., y Hernández, F. (mayo, 2017). Evaluación experimental del poder coagulante de extractos naturales empleados en la clarificación de aguas. *AMIDIQ*, 23(1), 1-5.
17. Turcios, E. (2017). *Uso de semilla de moringa oleifera 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*. Ciudad de México, México: Fundación ICA, A. C.

APÉNDICES

Apéndice 1. **Solución de sulfato de aluminio utilizada como coagulante**



Fuente: [Fotografía de Angel Hernández]. (Guatemala, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

Apéndice 2. **Solución de hidróxido de calcio utilizada como regulador de pH**



Fuente: [Fotografía de Angel Hernández]. (Guatemala, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

Apéndice 3. **Equipo utilizado para medir turbidez in situ**



Fuente: [Fotografía de Angel Hernández]. (Guatemala, Guatemala. 2021). Colección particular.
Guatemala.

ANEXOS

Anexo 1. Resultados finales de análisis de laboratorio

INFORME DE RESULTADOS NO. 2021-0043

16/09/2021

Cliente: Ángel Hernández	Lugar de muestreo: Tomada por el cliente
Dirección: Ciudad	Fecha y hora de muestreo: 08/09/2021 11:00 h
Fecha de ingreso: 08/09/2021	Responsable del muestreo: Tomada por el cliente
Hora de ingreso: 12:00h	

Muestra: Agua residual					
Código	Referencia	Tipo de muestra		Lote	Observaciones
134	1	Agua Residual		NA	NA
Análisis	Resultado	Unidad de medida	LD/LC	Metodología	Fecha de análisis
Demanda Bioquímica de Oxígeno	127.8	mg/L	10	Espectrofotometría, Merck análogo UNE-EN 1899	8/09/2021
Demanda Química de Oxígeno	201.0	mg/L	25	Reflujo Cerrado, Merck Análogo SMWW 5220D	8/09/2021
Sólidos suspendidos totales	17.0	mg/L	10	SMWW 2540D	8/09/2021
Sólidos sedimentables	5.0	UNT	NA	NMX-AA-004-SCFI-2000	8/09/2021
Turbidez	3.1	UNT	NA	Espectrofotometría	8/09/2021

Última Línea


 Firma Director Técnico
 Colaborado
 Licda. Ana Rosa Zamora Martínez
 QUIMICO BIOLOGO
 CCI- No. 4353

*Estos resultados corresponden únicamente a las muestras recibidas por el personal del laboratorio. Se prohíbe la reproducción parcial o total de este informe sin la autorización del laboratorio.

Fuente: Laboratorio de análisis fisicoquímico VIDM (2021). Resultados.