



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

**CARACTERIZACIÓN, EVALUACIÓN Y PROPUESTA DE TRATAMIENTO DE LAS AGUAS  
RESIDUALES DE UNA INDUSTRIA DE FABRICACIÓN DE ENVASES DE ALUMINIO**

**Gabriela Michele Acevedo Ocón**  
Asesorado por el Ing. Sergio Alejandro Recinos

Guatemala, abril de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARACTERIZACIÓN, EVALUACIÓN Y PROPUESTA DE TRATAMIENTO DE LAS  
AGUAS RESIDUALES DE UNA INDUSTRIA DE FABRICACIÓN DE ENVASES DE  
ALUMINIO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**GABRIELA MICHELE ACEVEDO OCÓN**  
ASESORADO POR EL ING. SERGIO ALEJANDRO RECINOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA QUÍMICA**

GUATEMALA, ABRIL DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martinez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
EXAMINADOR	Ing. Sergio Alejandro Recinos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Wong Davi
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

### **CARACTERIZACIÓN, EVALUACIÓN Y PROPUESTA DE TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DE UNA INDUSTRIA DE FABRICACIÓN DE ENVASES DE ALUMINIO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 25 de mayo de 2018.

  
**Gabriela Michele Acevedo Ocón**

Guatemala, 22 de agosto de 2018

Distinguido  
Ing. Carlos Salvador Wong Davi  
Director de la Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Le saludo deseándole éxito en sus labores diarias, el motivo de la presente es para comunicarle que yo, Ing. Qco. Sergio Alejandro Recinos identificado con el No. de colegiado 742 aprobé el informe final de trabajo de graduación de EPS titulado: **“CARACTERIZACIÓN, EVALUACIÓN Y PROPUESTA DE TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DE UNA INDUSTRIA DE FABRICACIÓN DE ENVASES DE ALUMINIO”**. Elaborado por **Gabriela Michele Acevedo Ocón**, quien es estudiante de **Ingeniería Química** y se identifica con el número de carné: **201313817** y el número de identificación personal **2820 88741 1904**.

Agradeciéndole de antemano.

Atentamente,

Ing. Quim. Sergio Alejandro Recinos  
Colegiado No. 742



Ing. Sergio Alejandro Recinos  
Colegiado 742



Guatemala, 30 de enero de 2019.  
Ref. EIQ.TG-IF.006.2019.

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

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **002-2018** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

**INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN**  
**-Modalidad Ejercicio Profesional Supervisado con Seminario de Investigación-**

Solicitado por la estudiante universitaria: **Gabriela Michele Acevedo Ocón.**  
Identificada con número de carné: **2820 88741 1904.**  
Identificada con registro académico: **2013-13817.**  
Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA.**

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

**CARACTERIZACIÓN, EVALUACIÓN Y PROPUESTA DE TRATAMIENTO DE  
LAS AGUAS RESIDUALES DE UNA INDUSTRIA DE FABRICACIÓN DE  
ENVASES DE ALUMINIO**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Sergio Alejandro Recinos.**

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

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"



*Jorge Mario Estrada Asturias*  
Ing. Jorge Mario Estrada Asturias  
COORDINADOR DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Ref.EIQ.TG.026.2019

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Ejercicio Profesional Supervisado (**EPS final**) de la **carrera de Ingeniería Química** del estudiante **GABRIELA MICHELE ACEVEDO OCÓN** titulado: **“CARACTERIZACIÓN, EVALUACIÓN Y PROPUESTA DE TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DE UNA INDUSTRIA DE FABRICACIÓN DE ENVASES DE ALUMINIO”** Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

*“Id y Enseñad a Todos”*

Ing. Carlos Salvador Wong Davi  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química

FACULTAD DE INGENIERIA USAC  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA  
DIRECTOR

Guatemala, marzo de 2019

Cc: Archivo  
CSWD/ale

Universidad de San Carlos  
De Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Decanato

Ref. DTG.196-2019

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química del trabajo de graduación titulado: **"CARACTERIZACIÓN, EVALUACIÓN Y PROPUESTA DE TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DE UNA INDUSTRIA DE FABRICACIÓN DE ENVASES DE ALUMINIO"**, presentado por la estudiante: **Gabriela Michele Acevedo Ocón** después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano



Guatemala, Abril de 2019

/echm



## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por bendecirme y ser mi guía a lo largo de mi vida.
<b>Mis padres</b>	Mario Roberto Acevedo y María de los Angeles Ocón, por ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad.
<b>Mis hermanas</b>	Grecia y Ximena Acevedo, por darme su cariño y apoyo incondicional.
<b>Mis abuelas</b>	Maria Esther Zambrano y Herminia Paz, por ser una importante influencia en mi vida.
<b>Mi familia</b>	A toda mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona.

## **AGRADECIMIENTOS:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser la sede de todo el conocimiento que he adquirido en estos años.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por ser mi segundo hogar y el centro de estudios que me ayudó a cumplir mis metas.
<b>Mis amigos de la Facultad</b>	Por su apoyo y amistad brindada en los momentos de estudio.
<b>Mis compañeros de trabajo</b>	Por brindarme el apoyo para aplicar mis conocimientos y poder desarrollarme profesionalmente.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XIII
GLOSARIO .....	XV
RESUMEN .....	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
HIPÓTESIS.....	XXIII
INTRODUCCIÓN .....	XXV
1. ANTECEDENTES .....	1
1.1. Datos generales de la empresa .....	1
1.1.1. Ubicación .....	1
1.1.2. Misión .....	2
1.1.3. Visión .....	2
1.1.4. Valores.....	2
1.1.5. Política integral .....	2
1.1.6. Historia.....	3
1.1.7. Proceso de manufactura.....	3
1.1.7.1. <i>Front end</i> .....	5
1.1.7.2. Área química.....	7
1.1.7.2.1. Prelavado.....	8
1.1.7.2.2. Lavado.....	8
1.1.7.2.3. <i>Drag out</i> .....	9
1.1.7.2.4. Primer enjuague .....	9
1.1.7.2.5. Tratamiento.....	9
1.1.7.2.6. <i>Drag out 2</i> .....	9

	1.1.7.2.7. Segundo enjuague .....	9
	1.1.7.2.8. Agua DI .....	10
	1.1.7.2.9. Movilidad .....	10
	1.1.7.2.10. Secado .....	10
	1.1.7.3. <i>Back end</i> .....	11
2.	MARCO TEÓRICO .....	17
2.1.	Aguas residuales .....	17
2.1.1.	Caracterización de aguas residuales industriales.....	17
2.1.1.1.	Parámetros físicos.....	18
2.1.1.1.1.	Color.....	18
2.1.1.2.	Parámetros químicos.....	18
2.1.1.2.1.	Potencial de hidrógeno.....	18
2.1.1.2.2.	Sólidos disueltos .....	19
2.1.1.2.3.	Sólidos en suspensión .....	19
2.1.1.2.4.	Sólidos totales.....	19
2.1.1.2.5.	Metales.....	19
2.1.1.2.6.	Grasas y aceites.....	20
2.1.1.2.7.	Demanda química de oxígeno .....	20
2.1.1.2.8.	Demanda biológica de oxígeno .....	21
2.1.2.	Operaciones unitarias en el proceso de tratamiento de aguas residuales .....	21
2.1.2.1.	Operaciones físicas unitarias.....	21
2.1.2.1.1.	Desbaste .....	21
2.1.2.1.2.	Sedimentación.....	22
2.1.2.1.3.	Filtración.....	23
2.1.2.1.4.	Flotación.....	24

2.1.2.1.5.	Ajuste de potencial de hidrógeno .....	24
2.1.2.1.6.	Homogenización de caudal.....	25
2.1.2.1.7.	Coagulación.....	25
2.1.2.1.8.	Floculación.....	25
2.1.2.1.9.	Extracción de grasas de aceite .....	26
2.1.2.2.	Operaciones químicas unitarias.....	27
2.1.2.2.1.	Precipitación química.....	27
2.1.2.2.2.	Procesos electroquímicos .....	28
2.1.2.2.3.	Adsorción.....	28
2.1.2.2.4.	Desinfección .....	29
2.1.2.3.	Procesos biológicos unitarios.....	30
2.1.2.3.1.	Procesos biológicos aerobios.....	30
2.1.2.3.2.	Procesos biológicos anaerobios.....	31
2.1.2.3.3.	Membranas.....	31
2.1.3.	Reglamento de las Descargas y Reúso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos de Guatemala. ....	31
2.1.3.1.	Estudio técnico.....	31
2.1.3.2.	Caracterización del afluente.....	32
2.1.3.3.	Metas de cumplimiento .....	32
3.	DISEÑO METODOLÓGICO .....	35
3.1.	Variables.....	36

3.2. Delimitación de campo de estudio.....	37
3.3. Recursos humanos disponibles.....	37
3.4. Recursos materiales disponibles (equipo, cristalería, reactivos) ....	37
3.4.1. Equipo de medición .....	37
3.4.2. Cristalería .....	38
3.4.2.1. Reactivos.....	38
3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa .....	39
3.5.1. Temperatura .....	39
3.5.1.1. Materiales y equipo .....	39
3.5.1.2. Recolección y almacenamiento de las muestras.....	39
3.5.1.3. Procedimiento.....	39
3.5.2. Conductividad.....	40
3.5.2.1. Materiales y equipo .....	40
3.5.2.2. Recolección y almacenamiento de las muestras.....	40
3.5.2.3. Procedimiento.....	40
3.5.3. Sólidos totales disueltos .....	40
3.5.3.1. Materiales y equipo .....	40
3.5.3.2. Recolección y almacenamiento de las muestras.....	41
3.5.3.3. Procedimiento.....	41
3.5.4. Potencial de hidrógeno .....	41
3.5.4.1. Materiales y equipo .....	41
3.5.4.2. Recolección y almacenamiento de las muestras.....	41
3.5.4.3. Procedimiento.....	42
3.5.5. Grasas y aceites.....	42
3.5.5.1. Materiales, equipo y reactivos .....	42

3.5.5.2.	Recolección y almacenamiento de las muestras.....	42
3.5.5.3.	Procedimiento .....	43
3.5.6.	Prueba de jarras .....	44
3.5.6.1.	Materiales, equipo y reactivos.....	44
3.5.6.2.	Recolección y almacenamiento de las muestras.....	45
3.5.6.3.	Procedimiento .....	45
3.5.7.	Prueba de sedimentación .....	46
3.5.7.1.	Materiales, equipo y reactivos.....	46
3.5.7.2.	Recolección y almacenamiento de las muestras.....	46
3.5.7.3.	Procedimiento .....	46
3.5.8.	Concentración de sólidos en lodos .....	47
3.5.8.1.	Materiales, equipo y reactivos.....	47
3.5.8.2.	Recolección y almacenamiento de las muestras.....	48
3.5.8.3.	Procedimiento .....	48
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información.....	48
3.7.	Tabulación y ordenamiento de la información .....	49
3.8.	Análisis estadístico .....	51
4.	RESULTADOS.....	53
4.1.	Caracterización de las aguas residuales de una industria de fabricación de envases de aluminio.....	53
4.2.	Procesos del tratamiento de las aguas residuales de una industria de fabricación de envases de aluminio .....	54
4.2.1.	Pretratamiento .....	57
4.2.1.1.	Separación de grasas y aceites.....	57

4.2.1.1.1.	Mantenimiento.....	60
4.2.1.2.	Homogenización de caudal .....	61
4.2.1.3.	Neutralización.....	64
4.2.2.	Tratamiento primario .....	65
4.2.2.1.	Coagulación.....	65
4.2.2.2.	Floculación .....	67
4.2.2.3.	Sedimentación primaria.....	70
4.2.3.	Tratamiento de lodos.....	72
4.2.3.1.	Espesamiento de lodos .....	72
4.2.3.2.	Deshidratación de lodos .....	73
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	75
5.1.	Caracterización de aguas residuales industriales.....	75
5.2.	Pretratamiento .....	76
5.2.1.	Tanque separador de grasas y aceites .....	76
5.2.2.	Homogenización de caudal .....	77
5.2.3.	Neutralización.....	78
5.2.4.	Coagulación.....	78
5.2.5.	Floculación .....	79
5.2.6.	Sedimentación.....	80
5.2.7.	Espesador de lodos.....	81
5.2.8.	Deshidratación de lodos .....	82
5.2.9.	Diagrama de equipo .....	82
	CONCLUSIONES.....	85
	RECOMENDACIONES .....	89
	BIBLIOGRAFÍA.....	91
	APÉNDICES.....	93



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Ubicación de planta de Envases de Centroamérica.....	1
2.	Bobina de aluminio.....	3
3.	Diagrama de flujo del proceso de elaboración de envases de aluminio.....	4
4.	Troqueladora de copas de aluminio .....	5
5.	Copa de aluminio .....	5
6.	Formadora de cuerpo y cortadora de envases de aluminio .....	6
7.	Envase formado .....	7
8.	Lavadora de envases de aluminio.....	7
9.	Aplicación de químicos dentro de la lavadora de envases.....	8
10.	Comparación envase antes y después de proceso de lavado .....	10
11.	Horno UV de envases de aluminio.....	11
12.	Decoradora exterior de envases de aluminio .....	12
13.	Horno de secado de tinta .....	12
14.	Espreadoras de barniz interior de envases de aluminio.....	13
15.	Horno de secado de barniz interior .....	13
16.	Formadora de cuello y pestaña de envases de aluminio .....	14
17.	Paletizadora de envases de aluminio.....	14
18.	<i>Pallet</i> de envases de aluminio.....	15
19.	Determinación de grasas y aceites .....	43
20.	Medición de tiempo de retención de grasas y aceites.....	44
21.	Agitador de paletas. ....	45
22.	Prueba de sedimentación.....	47

23.	Diagrama de equipo de un sistema de tratamiento de agua residual industrial de una industria de fabricación de envases de aluminio .....	55
24.	Vista superior de tanque separador de grasa y aceites .....	58
25.	Vista lateral de tanque separador de grasa y aceites .....	58
26.	Tanque separador de grasas y aceites.....	59
27.	Remoción de grasas y aceites de las aguas residuales industriales de una industria de fabricación de envases de aluminio en función del tiempo.....	59
28.	Curva de caudal de afluente de un sistema de tratamiento de agua residual industrial de una industria de fabricación de envases de aluminio .....	61
29.	Diferencia de alimentación y extracción de caudal medio de tanque de homogenización de caudal .....	62
30.	Tanque de homogenización de caudal. ....	63
31.	Curva de neutralización del afluente de un sistema de tratamiento de agua residual industrial de una industria de fabricación de envases de aluminio .....	64
32.	Reactor CSTR de neutralización.....	65
33.	Porcentaje de remoción de color en función de la concentración de coagulante: sulfato de aluminio, cloruro férrico y policloruro de aluminio .....	66
34.	Reactor CSTR de coagulación .....	67
35.	Porcentaje de remoción de color en función de la concentración de floculante utilizando como coagulante sulfato de aluminio .....	67
36.	Porcentaje de remoción de color en función de la concentración de floculante utilizando como coagulante cloruro férrico .....	68
37.	Porcentaje de remoción de color en función de la concentración de floculante utilizando como coagulante policloruro de aluminio .....	68
38.	Reactor CSTR de floculación.....	69

39.	Porcentaje de remoción de sólidos suspendidos de las aguas residuales industriales de una industria de envases de aluminio en función del tiempo retención .....	71
40.	Filtro de tornillo.....	73

## TABLAS

I.	Límites máximos permisibles para entes generadores nuevos.....	33
II.	Variables para la caracterización del efluente de la industria de fabricación de envases de aluminio .....	36
III.	Variables en prueba de jarras .....	36
IV.	Variables en el dimensionamiento de equipos .....	37
V.	Formato de toma de datos .....	49
VI.	Caracterización del agua residual industrial cruda de una industria de fabricación de envases de aluminio .....	50
VII.	Caracterización del agua residual industrial tratada de una industria de fabricación de envases de aluminio .....	50
VIII.	Caracterización de agua residual industrial cruda de una industria de fabricación de envases de aluminio .....	53
IX.	Caudal mínimo, medio y máximo de afluente de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales .....	54
X.	Resumen de operaciones unitarias y equipos determinados para el tratamiento de agua residual de una industria de fabricación de envases de aluminio.....	54
XI.	Simbología y descripción de diagrama de equipo de un sistema de tratamiento de agua residual industrial de una industria de fabricación de envases de aluminio .....	56

XII.	Simbología de fluidos de diagrama de equipo de un sistema de tratamiento de agua residual industrial de una industria de fabricación de envases de aluminio.....	57
XIII.	Parámetros de operación de tanque separador de grasas y aceites de un sistema de tratamiento de aguas residuales industriales de una industria de fabricación de envases de aluminio.....	58
XIV.	Parámetros de operación de tanque de homogenización de caudal de un sistema de tratamiento de aguas residuales industriales de una industria de fabricación de envases de aluminio.....	62
XV.	Parámetros de operación de reactor de neutralización de un sistema de tratamiento de aguas residuales industriales de una industria de fabricación de envases de aluminio.....	64
XVI.	Parámetros de operación de reactor de coagulación de un sistema de tratamiento de aguas residuales industriales de una industria de fabricación de envases de aluminio.....	66
XVII.	Dosis óptimas de coagulante y floculante determinados para el tratamiento de agua residual de una industria de fabricación de envases de aluminio.....	69
XVIII.	Parámetros de operación de reactor de floculación de un sistema de tratamiento de aguas residuales industriales de una industria de fabricación de envases de aluminio.....	69
XIX.	Parámetros de operación de tanque de sedimentación primaria de un sistema de tratamiento de aguas residuales industriales de una industria de fabricación de envases de aluminio.....	71
XX.	Parámetros de operación de tanque espesador de lodos de un sistema de tratamiento de aguas residuales industriales de una industria de fabricación de envases de aluminio.....	72

XXI.	Parámetros de operación de un filtro de tornillo de un sistema de tratamiento de aguas residuales industriales de una industria de fabricación de envases de aluminio .....	73
XXII.	Caracterización de agua residual industrial tratada de una industria de fabricación de envases de aluminio .....	74



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>S</b>	Desviación estándar
<b>kg/día</b>	Kilogramos por día
<b>L</b>	Litros
$\bar{X}$	Media aritmética
<b>m<sup>3</sup>/h</b>	Metros cúbicos por hora
<b>m<sup>3</sup>/min</b>	Metros cúbicos por minuto
<b>mg/L</b>	Miligramos por litro
<b>mL</b>	Mililitros
<b>mS/cm</b>	Milisiemens por centímetro
<b>min</b>	Minutos
<b>N</b>	Número total de datos
<b>ppm</b>	Partes por millón
<b>PTAR</b>	Planta de tratamiento de aguas residual
<b>%</b>	Porcentaje con base 100
<b>pH</b>	Potencial de hidrógeno
<b>rpm</b>	Revoluciones por minuto
<b>°C</b>	Temperatura en grados Celsius
<b>U Pt-Co</b>	Unidad platino-cobalto
<b>X</b>	Valor obtenido





## GLOSARIO

<b>Afluente</b>	Cuerpo de agua residual cruda que ingresa a la planta de tratamiento de agua residual.
<b>Agua desionizada</b>	Agua a la cual se le extrajeron cationes y aniones mediante un proceso de intercambio iónico.
<b>Aguas residuales industriales</b>	Es toda el agua que se generan como residuo de los procesos de manufactura.
<b>Anisótropo</b>	Sustancia en las cuales las propiedades varían con la dirección.
<b>Butirómetro</b>	Cristalería de laboratorio de cuello largo utilizado para determinar la concentración de grasas y aceites de una muestra.
<b>Caracterización</b>	Establecimiento de las características de un material determinado a partir del estudio de sus propiedades físicas y químicas.
<b>Carga contaminante</b>	Medida que representa la masa de contaminante por unidad de tiempo que es vertida por una corriente residual.

<b>Caudal</b>	Es la cantidad de volumen de un fluido que se mueve en una unidad de tiempo.
<b>Coagulante</b>	Compuesto químico que desestabiliza la materia suspendida en forma coloidal, a través de la alteración de la capa iónica cargada eléctricamente que rodea a las partículas coloidales.
<b>Conductividad</b>	Es la medida de la capacidad del agua para conducir electricidad. Medida en milisiemens por centímetro.
<b>Cuerpo receptor</b>	Curso de agua en donde se descarga un efluente de aguas residuales.
<b>Decantación</b>	Separación los componentes que forman una mezcla por diferencia de densidades.
<b>Demanda biológica de oxígeno</b>	Es el requerimiento de oxígeno para la degradación bioquímica de la materia orgánica en las aguas industriales.
<b>Demanda química de oxígeno</b>	Es el requerimiento de oxígeno para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua residual, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo.
<b>Efluente</b>	Cuerpo de agua residual tratada que sale de la planta de tratamiento de agua residual.

<b>Floculante</b>	Compuesto químico que agrupa sólidos en suspensión, una vez efectuada su coagulación, provocando su precipitación.
<b>Lodo</b>	Es una mezcla de agua y sólidos separada del agua residual, como resultado de procesos fisicoquímicos.
<b>Parámetro</b>	Es un valor orientativo para lograr evaluar o valorar una determinada situación.
<b>Planta de tratamiento de agua residual</b>	Grupo de equipos que trabajan simultáneamente para realizar un tratamiento de agua residual
<b>Potencial de hidrógeno</b>	Es una medida de la concentración de iones hidrógeno presentes en una solución acuosa.
<b>Precipitación</b>	Proceso mediante el cual se forma un sólido en una disolución, por efecto de una reacción química o bioquímica.
<b>Sedimentación</b>	Proceso por el cual se eliminan las partículas sólidas presentes en el agua, por medio de la gravedad.
<b>Temperatura del cuerpo receptor</b>	Temperatura del embalse natural, lago, laguna, río, quebrada, manantial, humedal, estuario, estero, manglar, pantano, aguas costeras y aguas subterráneas donde se descargan aguas residuales.

<b>Tratamiento</b>	Conjunto de acciones o procesos para reducir la carga contaminante de un afluente.
<b>Tratamiento primario</b>	Conjunto de acciones o procesos para reducir o eliminar la materia insoluble del agua residual industrial.
<b>Tratamiento secundario</b>	Remoción de material coloidal y en suspensión por medio de procesos biológicos.
<b>Tratamiento terciario</b>	Serie de procesos destinados a conseguir una calidad de efluente superior a la del tratamiento secundario.
<b>Sólidos disueltos totales</b>	Es la cantidad total de materia disuelta en el agua.

## RESUMEN

En este estudio se realiza una propuesta de tratamiento de aguas residuales industriales generadas por una industria de elaboración de envases de aluminio. Previamente se realizó una caracterización de las aguas residuales industriales obtenidas del proceso de manufactura. Los resultados obtenidos de dicha caracterización se compararon con los parámetros establecidos en el Reglamento de las Descargas y Reúso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos, Acuerdo Gubernativo 236-2006. Los parámetros que no cumplen con lo establecido por el reglamento son el potencial de hidrógeno, grasas y aceites, sólidos suspendidos y demanda biológica de oxígeno.

Se determinó el sistema de tratamiento adecuado formado por un pretratamiento, tratamiento primario y tratamiento de lodos. El pretratamiento está formado por un proceso de separación de grasas y aceites, homogenización de caudal y neutralización de efluentes. El tratamiento primario está formado por un proceso de coagulación, floculación y sedimentación; de esta etapa resultan dos productos, efluente tratado y lodos. Los lodos primarios que resultan del tratamiento anterior ingresan a la etapa de tratamiento de lodos, la cual está formada por un espesador por gravedad y un deshidratador de lodos, para finalmente ser desechados. Para cada etapa se determinaron los equipos, reactivos y capacidad del sistema para acondicionar el agua con los parámetros correspondientes, para su reincorporación en el medio ambiente.

Finalmente se estableció el diagrama de equipo de la planta de tratamiento de aguas residuales, así como sus respectivos parámetros de operación y

mantenimiento, para incrementar la eficiencia, el proceso y prolongar la vida de los equipos.

# OBJETIVOS

## General

Realizar una propuesta de tratamiento de las aguas residuales de una industria de fabricación de envases de aluminio.

## Específicos

1. Caracterizar las aguas residuales de una industria de fabricación de envases de aluminio.
2. Determinar las operaciones unitarias y equipos necesarios para el tratamiento y disposición de las aguas residuales de una industria de fabricación de envases de aluminio.
3. Establecer el diagrama de flujo de una planta de tratamiento de aguas residuales de una industria de fabricación de envases de aluminio.
4. Establecer los procedimientos de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento de aguas residuales de una industria de fabricación de envases de aluminio.





## **HIPÓTESIS**

### **Hipótesis de investigación (Hi)**

Los valores de los parámetros de medición físicos, químicos y bacteriológicos del agua residual industrial generada por una industria de fabricación de envases de aluminio en el río Michatoya, están dentro de los límites máximos permisibles para entes generadores nuevos, establecidos por el Reglamento de las Descargas y Reúso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos, Acuerdo Gubernativo 236-2006.

### **Hipótesis de investigación nula (Ho)**

Los valores de los parámetros de medición físicos, químicos y bacteriológicos del agua residual industrial generada por una industria de fabricación de envases de aluminio en el río Michatoya, están fuera de los límites máximos permisibles para entes generadores nuevos, establecidos por el Reglamento de las Descargas y Reúso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos, Acuerdo Gubernativo 236-2006.



## INTRODUCCIÓN

En el proceso de fabricación de envases de aluminio, uno de los más importantes elementos utilizados es el agua, la cual se emplea directamente en el proceso de manufactura.

El agua, después de ser utilizada, puede tener ciertas características que afecten el receptor hídrico en donde son dispuestas; es necesario proteger los recursos hídricos de la contaminación, ya sea por actividades industriales o domésticas. Altos niveles de contaminación pueden afectar la salud de los vecinos que consumen el agua produciendo enfermedades causadas por bacterias, virus y químicos; afecta la fauna y flora que interactúa con el cuerpo receptor del recurso hídrico. Con el fin de proteger este recurso se debe determinar y reducir los niveles de contaminación de cualquier causa o fuente de contaminación hídrica, con el fin de ejercer un control de la disposición de las aguas residuales industriales.

Por lo tanto, se realizó una caracterización de las aguas residuales industriales obtenidas del proceso de fabricación de envases de aluminio, para determinar el cumplimiento de estos parámetros con lo establecido en el Reglamento de las Descargas y Reúso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos, Acuerdo Gubernativo 236-2006. Algunos parámetros no cumplían con lo requerido por este reglamento, por lo que se propuso un sistema de tratamiento para reducir la carga contaminante presente en las aguas residuales industriales de dicho proceso.

El fin del tratamiento de las aguas residuales industriales es el garantizar que no existan efectos nocivos para el medio ambiente y la salud de las personas, así como promover la reutilización de este recurso.

# 1. ANTECEDENTES

## 1.1. Datos generales de la empresa

Envases de Centroamérica, conocido comercialmente como ECA, es una empresa que se dedica a la fabricación de envases de aluminio en formatos de 12 y 16 oz, satisfaciendo la demanda de envases para jugos, cervezas y refrescos en la región de Centroamérica.

### 1.1.1. Ubicación

La planta está ubicada en el Km. 32 Ruta al Pacífico, en el interior del parque industrial, Flor de Campo, Amatitlán.

Figura 1. Ubicación de planta de Envases de Centroamérica



Fuente: Google Maps Consulta: 10 de marzo de 2018.

### **1.1.2. Misión**

En ECA trabajamos para satisfacer a nuestros clientes, en condiciones laborales seguras y conservando el medio ambiente.

### **1.1.3. Visión**

Seguir siendo la mejor opción en envases de aluminio.

### **1.1.4. Valores**

- Trabajo en equipo: se reconoce que la mejor manera para alcanzar las metas y objetivos propuestos es el trabajo en equipo.
- Lealtad: la relación entre cada uno de los trabajadores debe estar cimentada en la lealtad para construir un ambiente de trabajo agradable con confianza.
- Compromiso: el compromiso personal de cada trabajador es fundamental para cada logro que se requiera alcanzar y para esto es importante el empoderamiento que se le da a todo el personal en sus puestos de trabajo.
- Mejora continua: para cumplir con la visión es necesario que todos los procesos se revisen continuamente para mejorarlos continuamente y seguir siendo la mejor opción de envases de aluminio.

### **1.1.5. Política integral**

Satisfacemos las necesidades de nuestros clientes, cuidando a nuestro equipo de trabajo, al medio ambiente y los intereses de los accionistas.

### **1.1.6. Historia**

Envases de Centroamérica inicio la construcción de la planta en noviembre del 2005, finalizando la construcción en Julio del 2006. En esta última fecha se da inicio a la instalación de los equipos de una línea de producción, finalizando el primer pallet de latas de 12 oz en el mes de diciembre de 2006. En mayo del 2016 se inicia la instalación de los equipos que conformarán la segunda línea de producción, la cual puede modificarse para producir latas en dos formatos, 12 y 16 oz; en noviembre del 2016 se inicia la producción de latas de 16 oz.

### **1.1.7. Proceso de manufactura**

La materia prima principal es el aluminio que se recibe en forma de bobinas. Las bobinas pesan alrededor de 9 toneladas, la lámina tiene 1 ½ m de ancho, 0,25 mm de espesor y una longitud entre 4 000 a 8 000 metros.

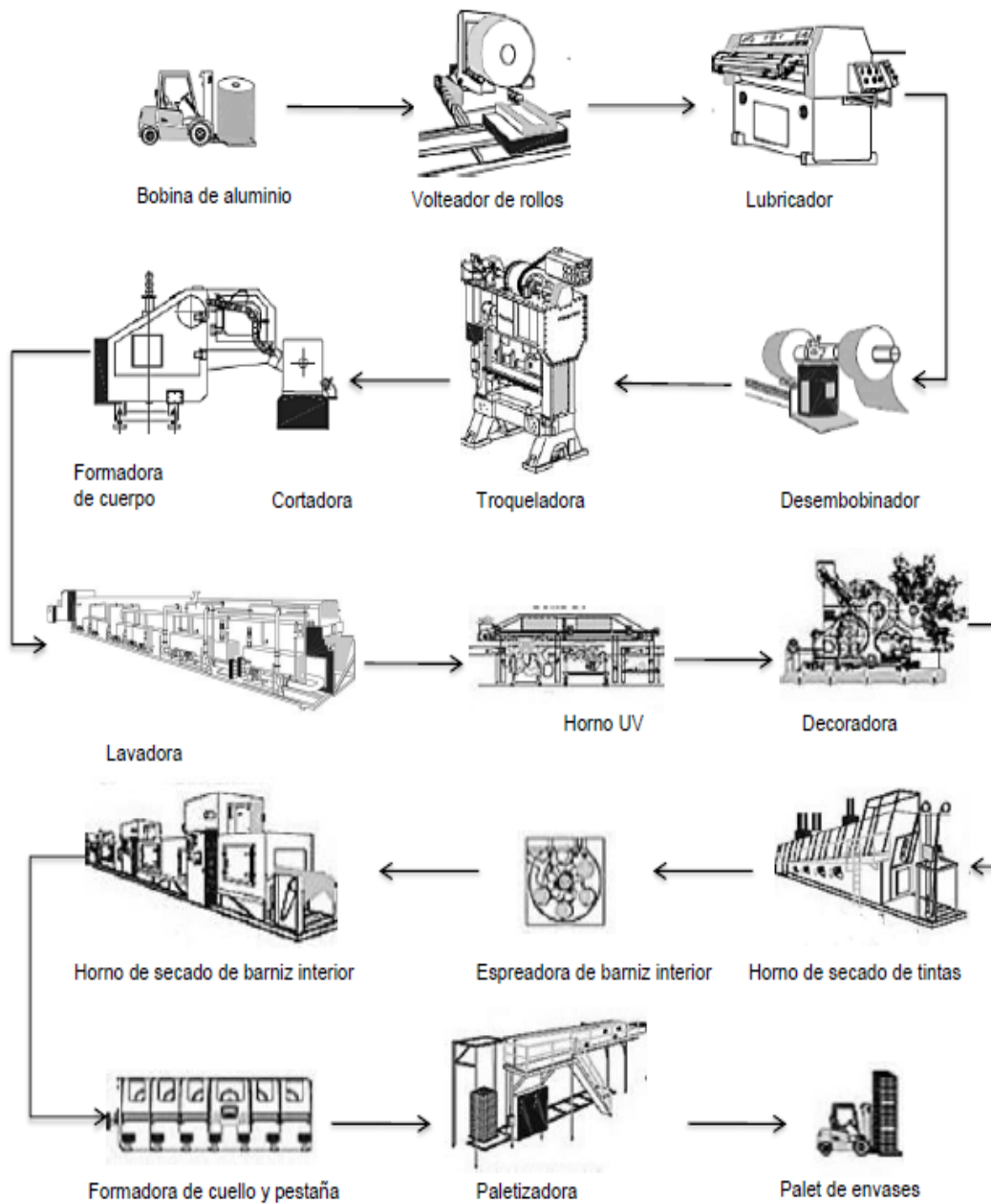
**Figura 2. Bobina de aluminio**



Fuente: <http://spanish.aluminiumdiscs.com/sale-4470899-al-foil-hydrophilic-aluminium-foil-manufacturing-process-for-heat-and-acoustic-insulation.html>. Consulta: 10 de marzo de 2018.

El proceso de elaboración de envases de aluminio consta de diferentes etapas, estas están divididas en tres áreas: *Front end*, Área Química y *Back end*.

Figura 3. **Diagrama de flujo del proceso de elaboración de envases de aluminio**



Fuente: Envases de Centroamérica. S.A.



### 1.1.7.1. **Front end**

La bobina se desenrolla, lubrica e ingresa a una prensa de troquelado y embutición, dentro de la cual, mediante el golpe vertical de un punzón, perfora la lámina formando copas cilíndricas. El desperdicio derivado de este proceso se retira mediante un sistema de vacío y se compacta para su reciclado.

Figura 4. **Troqueladora de copas de aluminio**



Fuente: <https://www.stollemachinery.com/en/products/cupping-systems> Consulta: 10 de marzo de 2018.

Figura 5. **Copa de aluminio**



Fuente: <https://www.stollemachinery.com/en/products/cupping-systems> Consulta: 18 de abril de 2018.

Las copas son conducidas mediante un transporte de bandas hacia las formadoras del cuerpo. La copa ingresa dentro del formador del cuerpo, es recibida por un punzón que la empuja a través de anillos, estirando el metal hasta

conseguir un cilindro de menor diámetro y mayor altura. En este proceso de estirado la lata alcanza el diámetro final y se forma el fondo abovedado. En este equipo las latas aun no tienen su altura final, ya que en el proceso de estirado se crea un borde ligeramente ondulado. Esto se debe a que los metales son anisótropos, por lo cual no se deforman exactamente lo mismo en todas las direcciones. Posteriormente ingresa en una cortadora en la cual se le da la altura correcta y uniforme a la lata.

Figura 6. **Formadora de cuerpo y cortadora de envases de aluminio**



Fuente: <https://www.stollemachinery.com/en/products/standun-bodymaker> Consulta: 10 de marzo de 2018.

Figura 7. **Envase formado**



Fuente: <https://www.stollemachinery.com/en/products/standun-bodymaker> Consulta: 10 de marzo de 2018.

### 1.1.7.2. **Área química**

En el área de *front end* se utilizan aceites lubricantes para realizar el formado del cuerpo del envase, por lo que, para poder continuar el proceso de manufactura, es preciso eliminarlos. El área química está compuesta por un equipo llamado Lavadora. Las latas ya formadas entran en la lavadora en la cual mediante chorros a alta presión (figura 9) se aplican reactivos químicos con el fin de eliminar los contaminantes orgánicos e inorgánicos y preparar la superficie de la lata para el proceso de decorado.

Figura 8. **Lavadora de envases de aluminio**



Fuente: <http://www.canwash.com/can-washers/> Consulta: 10 de marzo de 2018.

Figura 9. **Aplicación de químicos dentro de la lavadora de envases**



Fuente: <https://www.internationalthermalsystems.com/metal-packaging/can-washer/>  
Consulta: 18 de abril de 2018.

La lavadora está formada por 9 estaciones de lavado, las cuales son las siguientes:

#### **1.1.7.2.1. Prelavado**

En esta etapa de lavado se remueve el 60 % de los contaminantes orgánicos (aceites usados en la formación del bote) mediante la aplicación de una solución de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) al 98 %.

#### **1.1.7.2.2. Lavado**

En esta segunda etapa se remueve el 40 % restante de los contaminantes orgánicos (aceites utilizados en el formado del bote) y el 100 % de los contaminantes inorgánicos (finos de Al) utilizando dos ácidos: ácido fluorhídrico (HF) y ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ).

#### **1.1.7.2.3. Drag out**

En esta estación de lavado se captura la solución química utilizada en la estación anterior, así mismo previene la contaminación del siguiente tanque.

#### **1.1.7.2.4. Primer enjuague**

Se realiza una aplicación de agua para remover los rastros de químicos que pueda traer el envase de los lavados anteriores.

#### **1.1.7.2.5. Tratamiento**

En esta etapa del lavado se aplica una capa protectora en la parte exterior de la lata, que protege a la lata de procesos de envasado en las industrias cerveceras. Los químicos utilizados en esta etapa son: ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), fluorhídrico ( $\text{HF}$ ), ácido hexafluorozirconico ( $\text{H}_2\text{ZrF}_6$ ), nitrato de amonio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) y ácido fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ).

#### **1.1.7.2.6. Drag out 2**

En esta estación de lavado se captura la solución química utilizada en la estación anterior, así mismo previene la contaminación del siguiente tanque.

#### **1.1.7.2.7. Segundo enjuague**

Remueve rastros de los ácidos aplicados en la etapa de tratamiento.

#### **1.1.7.2.8. Agua DI**

Se utiliza agua desionizada para remover los restos de sales de los lavados químicos anteriormente mencionados y se realiza un enjuague con mayor calidad.

#### **1.1.7.2.9. Movilidad**

En esta última etapa de lavado se aplica ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ), el cual ayuda al secado de la lata, prepara la superficie para procesos posteriores y favorece a la movilidad de la lata en todo el proceso de manufactura.

#### **1.1.7.2.10. Secado**

Después de salir de la lavadora, pasa por un horno de secado por aire caliente para eliminar todo el resto de humedad presente en la lata.

Figura 10. **Comparación envase antes y después de proceso de lavado**



Fuente: elaboración propia.

### 1.1.7.3. **Back end**

Posterior al lavado y secado de los envases, estos ingresan al área de *Back end* mediante un transporte de bandas. El área de *Back end* comienza con un rodillo que recubre el domo del envase con un barniz, luego el envase ingresa a un horno de secado mediante rayos ultravioleta para protegerlo y facilitar su movilidad durante el resto del proceso.

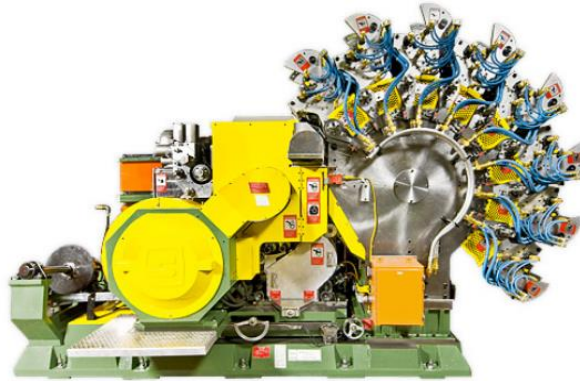
Figura 11. **Horno UV de envases de aluminio**



Fuente: [http://www.alluvkorea.com/en/uv\\_harden/?ckattempt=1](http://www.alluvkorea.com/en/uv_harden/?ckattempt=1) Consulta: 10 de marzo de 2018.

Posteriormente, la lata entra al proceso de decorado mediante una máquina rotativa con una impresión cilíndrica, imprimiendo hasta 8 colores a la vez. A continuación, al salir de este proceso, la lata pasa por un rodillo barnizador el cual le coloca el barniz exterior que protege la tinta; posteriormente pasa por un horno de curado que seca la tinta y el barniz aplicados previamente.

Figura 12. **Decoradora exterior de envases de aluminio**



Fuente: <https://www.stollemachinery.com/en/products/rutherford-decorator-and-basecoater> Consulta: 10 de marzo de 2018.

Figura 13. **Horno de secado de tinta**



Fuente: <https://www.internationalthermalsystems.com/metal-packaging/pin-oven/> Consulta: 10 de marzo de 2018.

Una vez decorada la lata, esta pasa a las esprayadoras; este equipo le coloca una capa de barniz interior mediante pistolas de atomizado. Este barniz protege la bebida, con la cual se llenará el envase, de una exposición de metal. Al salir el envase de las esprayadores, este ingresa en un horno de secado de barniz interior.



Figura 14. **Espreadoras de barniz interior de envases de aluminio**



Fuente: <https://www.stollemachinery.com/en/products/inside-spray-system> Consulta: 10 de marzo de 2018.

Figura 15. **Horno de secado de barniz interior**



Fuente: <https://www.internationalthermalsystems.com/metal-packaging/ibo/> Consulta: 10 de marzo de 2018.

La parte superior de la lata tiene un diámetro menor que el cuerpo, para ello una la lata pasa por una máquina encargada de la formación del cuello y pestaña, pasando por una serie de estrechamientos que reducen poco a poco el cuello hasta la medida especificada.

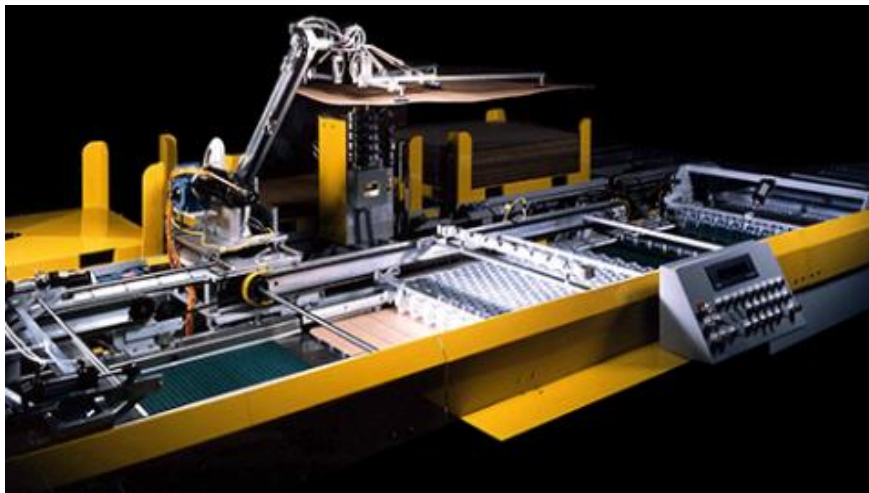
Figura 16. **Formadora de cuello y pestaña de envases de aluminio**



Fuente: <https://www.belvac.com/index.php/neckers/the-belvac> Consulta: 10 de marzo de 2018.

Las latas terminadas se transportan hacia el área de paletizado, el producto final es colocado en tarimas y envueltos por un plástico especial para proteger las latas de contaminación, cuando estas sean transportadas al lugar de envasado.

Figura 17. **Paletizadora de envases de aluminio**



Fuente: <https://www.bwcontainersystems.com/equipment-solutions/palletizers-and-depalletizers> Consulta: 10 marzo de 2018.

Figura 18. ***Pallet de envases de aluminio***



Fuente: <https://www.bwcontainersystems.com/equipment-solutions/palletizers-and-depalletizers> Consulta: 10 marzo de 2018.



## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Aguas residuales**

Se denominan aguas residuales industriales a aquellas aguas que resultan de los procesos de producción de diferentes industrias de manufactura. El tratamiento de aguas residuales consiste en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como objetivo eliminar los contaminantes físicos, químicos y biológicos presentes en el agua que es resultado de actividades industriales y domésticas.

Las aguas residuales son generadas por procesos que se llevan a cabo en residencias, instituciones y locales comerciales e industriales. Estas pueden ser tratadas dentro del sitio en el cual son generadas o bien pueden ser llevadas por medio de tubos hacia una planta de tratamiento municipal. Los esfuerzos para recolectar y tratar las aguas residuales de la descarga, están típicamente sujetos a regulaciones y estándares locales, estatales y federales (regulaciones y controles). A menudo, ciertos contaminantes de origen industrial presentes en las aguas residuales requieren procesos de tratamiento especializado.

#### **2.1.1. Caracterización de aguas residuales industriales**

El agua residual debe ser tratada, tanto para proteger la salud pública como para preservar el medio ambiente. Antes de tratar las aguas residuales debemos conocer su composición, esto es lo que se llama caracterización del agua. La caracterización del agua permite conocer qué elementos químicos y biológicos están presentes, posterior a ello diseñar una

planta apropiada al agua servida que se está produciendo. Los parámetros se pueden clasificar en tres grandes grupos: físicos, químicos y biológicos.

### **2.1.1.1. Parámetros físicos**

Son los que definen las características del agua que puede ser percibidas por lo sentidos de la vista, el tacto, el gusto y el olfato.

#### **2.1.1.1.1. Color**

El color es la cualidad de absorber ciertas radiaciones del espectro visible. El agua pura sólo es azulada en grandes espesores. En general presenta colores inducidos por materiales orgánicos, de los cuales algunos son vegetales, como el color amarillento debido a los ácidos húmicos. La presencia de hierro puede darle color rojizo, y la del manganeso un color negro. El color afecta estéticamente la potabilidad de las aguas, puede representar un potencial colorante de ciertos productos cuando se utiliza como material de proceso, y un potencial espumante en su uso en calderas.

### **2.1.1.2. Parámetros químicos**

Los análisis químicos constituyen uno de los principales requisitos para caracterizar el agua. Las determinaciones químicas más comunes son las siguientes:

#### **2.1.1.2.1. Potencial de hidrógeno**

El pH es una medida de la concentración de iones hidrógeno; es una medida de la naturaleza ácida o alcalina de la solución acuosa que puede afectar

a los usos específicos del agua. La mayoría de las aguas naturales tienen un pH entre 6 y 8.

#### **2.1.1.2.2. Sólidos disueltos**

Los sólidos disueltos o salinidad total, es una medida de la cantidad de materia disuelta en el agua. El origen puede ser múltiple, tanto en las aguas subterráneas como en las superficiales. Para las aguas potables se fija un valor máximo deseable de 500 ppm, este dato por sí sólo no es suficiente para catalogar la bondad del agua. El proceso de tratamiento, entre otros, es la ósmosis inversa.

#### **2.1.1.2.3. Sólidos en suspensión**

Se suelen separar por filtración y decantación. Son sólidos sedimentables, no disueltos, que pueden ser retenidos por filtración. Las aguas subterráneas suelen tener menos de 1 ppm, las superficiales pueden tener mucho más, dependiendo del origen y forma de captación.

#### **2.1.1.2.4. Sólidos totales**

Es la suma de los dos anteriores disueltos y en suspensión.

#### **2.1.1.2.5. Metales**

Como constituyentes importantes de muchas aguas, también se encuentran cantidades, a nivel de traza, de muchos metales. Entre ellos podemos destacar el níquel (Ni), el manganeso (Mn), el plomo (Pb), el cromo (Cr), el cadmio (Cd), el cinc (Zn), el cobre (Cu), el hierro (Fe) y el mercurio (Hg). Muchos de estos metales también están catalogados como contaminantes prioritarios. Debido a su toxicidad, la presencia de cualquiera de ellos en cantidades excesivas interferirá en gran número de los usos del agua. Es por ello por lo que,

a menudo, resulta conveniente medir y controlar las concentraciones de dichas sustancias. Los métodos para la determinación de las concentraciones de estas sustancias varían en complejidad, en función de las sustancias causantes de interferencias potencialmente presentes. Además, las cantidades de muchos de estos metales pueden determinarse a concentraciones muy bajas, empleando métodos instrumentales, entre los que cabe destacar la polarografía y la espectroscopía de absorción atómica.

#### **2.1.1.2.6. Grasas y aceites**

Las grasas y aceites son compuestos orgánicos constituidos principalmente por ácidos grasos de origen animal y vegetal, así como los hidrocarburos del petróleo. Su efecto en los sistemas de tratamiento de aguas residuales o en las aguas naturales se debe a que interfieren con el intercambio de gases entre el agua y la atmósfera. La determinación analítica de grasas y aceites no mide una sustancia específica, sino un grupo de sustancias susceptibles de disolverse en hexano, incluyendo ácidos grasos, jabones, grasas, ceras, hidrocarburos, aceites, entre otras.

#### **2.1.1.2.7. Demanda química de oxígeno**

La DQO corresponde a una oxidación química de las sustancias oxidables que contiene la muestra. Se determina por medio de una valoración redox de la muestra con un oxidante químico fuerte, como es el dicromato potásico o permanganato potásico en medio ácido. El valor de DQO es mayor que el correspondiente a la DBO, puesto que el oxidante utilizado en la determinación es más fuerte que el oxígeno y, por tanto, oxida a un mayor número de sustancias.



#### **2.1.1.2.8. Demanda biológica de oxígeno**

La DBO da una idea de la concentración de materia orgánica biodegradable, y se calcula a partir de la medida de la disminución de la concentración de oxígeno disuelto, después de incubar una muestra durante un determinado periodo.

#### **2.1.2. Operaciones unitarias en el proceso de tratamiento de aguas residuales**

Las operaciones unitarias es cualquier proceso o serie de operaciones que provocan un cambio físico o químico a un material o mezcla de materiales.

##### **2.1.2.1. Operaciones físicas unitarias**

Los métodos de tratamiento de aguas residuales en los cuales el tratamiento se realiza mediante la acción de fuerzas físicas, se conocen como operaciones físicas unitarias. Estas operaciones se utilizan para eliminar principalmente sólidos, las operaciones para eliminar este tipo de contaminación de aguas suelen ser las primeras en efectuarse, dado que la presencia de partículas en suspensión suele no ser indeseable en muchos otros procesos de tratamiento.

##### **2.1.2.1.1. Desbaste**

Es una operación en la que se trata de eliminar sólidos de mayor tamaño que el que habitualmente tienen las partículas que arrastran las aguas. El objetivo es eliminarlos y evitar que dañen equipos posteriores del resto de tratamientos.

Suele ser un tratamiento previo a cualquier otro. El equipo que se suele utilizar son rejillas por las que se hace circular el agua, construidas por barras metálicas de 6 o más mm, dispuestas paralelamente y espaciadas entre 10 y 100 mm. Se limpian con rastrillos que se accionan normalmente de forma mecánica. En otros casos, si el tipo de sólidos lo permite, se utilizan trituradoras, reduciendo el tamaño de sólidos y separándose posteriormente por sedimentación u otras operaciones.

#### **2.1.2.1.2. Sedimentación**

Operación física en la que se aprovecha la fuerza de la gravedad que hace que una partícula más densa que el agua tenga una trayectoria descendente, depositándose en el fondo del sedimentador. Esta operación será más eficaz cuanto mayor sea el tamaño y la densidad de las partículas a separar del agua; es decir, cuanto mayor sea su velocidad de sedimentación, siendo el principal parámetro de diseño para estos equipos. A esta operación de sedimentación se le suele denominar también decantación.

- Sedimentadores rectangulares

La velocidad de desplazamiento horizontal del agua es constante y se suelen utilizar para separar partículas densas y grandes (arenas). Este tipo de sedimentación se denomina discreta, dado que las partículas no varían sus propiedades físicas a lo largo del desplazamiento hacia el fondo del sedimentador.

- Sedimentadores circulares

Son más habituales. En ellos el flujo de agua suele ser radial desde el centro hacia el exterior, por lo que la velocidad de desplazamiento del agua disminuye al alejarnos del centro del sedimentador. Esta forma de operar es adecuada cuando la sedimentación va acompañada de una floculación de las partículas, en las que el tamaño de flóculo aumenta al descender las partículas, y por lo tanto aumenta su velocidad de sedimentación.

### **2.1.2.1.3. Filtración**

La filtración es una operación en la que se hace pasar el agua a través de un medio poroso, con el objetivo de retener la mayor cantidad posible de materia en suspensión. El medio poroso tradicionalmente utilizado es un lecho de arena, de altura variable, dispuesta en distintas capas de distinto tamaño de partícula, siendo la superior la más pequeña y de entre 0,15 y 0,3 mm. Es una operación muy utilizada en el tratamiento de aguas potables, así como en el tratamiento de aguas para reutilización, para eliminar la materia en suspensión que no se ha eliminado en anteriores operaciones (sedimentación).

- Filtración por gravedad

El agua circula verticalmente y en descenso a través del filtro, por simple gravedad. Dentro de este tipo podemos hablar de dos formas de operar, que nos lleva a tener una filtración lenta, apenas utilizados actualmente, o una filtración rápida. El mecanismo de la separación de sólidos es una combinación de asentamiento, retención, adhesión y atracción. Es un sistema muy utilizado en tratamiento para aguas potables.

- Filtración por presión

Normalmente están contenidos en recipientes y el agua se ve forzada a atravesar el medio filtrante sometido a presión. También en este caso puede haber filtración lenta, en la que en la superficie del filtro se desarrolla una torta filtrante donde la filtración, a través de esa superficie, es por mecanismos físicos y biológicos. Por otro lado, en la filtración rápida se habla de filtración en profundidad, es decir, cuando la mayor parte de espesor de medio filtrante está activo para el proceso de filtración y la calidad del filtrado mejora con la profundidad. Esta filtración a presión se suele utilizar más en aguas industriales.

#### **2.1.2.1.4. Flotación**

Operación física que consiste en generar pequeñas burbujas de gas (aire), que se asocian a las partículas presentes en el agua y son elevadas hasta la superficie, de donde son arrastradas y sacadas del sistema.

#### **2.1.2.1.5. Ajuste de potencial de hidrógeno**

El valor de pH es importante al momento de aplicar ciertos tratamientos de aguas residuales o antes de verter las aguas residuales industriales en cualquier receptor hídrico, por lo que es necesario ajustar su valor de pH. En este último caso los valores de pH deben estar comprendidos entre los límites marcados por el Acuerdo Gubernativo 236-2006: REGLAMENTO DE LAS DESCARGAS Y REUSO DE AGUAS RESIDUALES Y DE LA DISPOSICIÓN DE LODOS. Dependiendo del valor de pH esta se puede ajustar agregando un ácido o una base.

#### **2.1.2.1.6. Homogenización de caudal**

La homogenización consiste en amortiguar por laminación las variaciones de caudal, con el fin de obtener un efluente con características constantes. Es un método utilizado para reducir problemas operacionales, mejorar el rendimiento de las operaciones unitarias posteriores, reducir el tamaño y los costos de las instalaciones mismas de tratamiento.

#### **2.1.2.1.7. Coagulación**

La separación de gran parte de impurezas que se encuentran presentes en las aguas residuales industriales se extrae mediante la sedimentación. Muchas de estas partículas son demasiado pequeñas para ser separadas mediante sedimentación, por lo que es preciso llevar a cabo la unión de estas partículas en agregados de mayor tamaño y más fácilmente decantables. La coagulación es el proceso por el que los componentes de una suspensión o disolución estable son desestabilizados por superación de las fuerzas que mantienen su estabilidad. Los coagulantes más utilizados son: sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ) y policloruro de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ ).

#### **2.1.2.1.8. Floculación**

Floculación es el proceso por el cual las partículas desestabilizadas se unen para formar grandes partículas estables o aglomeradas. Los más utilizados son polímeros con carga eléctrica, catiónicos o aniónicos.

#### **2.1.2.1.9. Extracción de grasas de aceite**

La separación de grasas y aceites en estos procesos, se basan en la diferencia de peso específico entre el agua y el aceite. Equipos utilizados en separación de grasas y aceites son:

- Trampa de grasas y aceites

Las trampas de grasa son dispositivos diseñados para evitar que las grasas y aceites presentes en el afluente disminuyan la eficiencia de los procesos posteriores. El modelo tradicional de trampa de grasa consiste en una cámara donde se almacena el agua, la cual contiene desviaciones que fuerzan el agua a viajar en dirección vertical durante una o más etapas. Cuando el agua viaja en dirección vertical, y de forma lenta, la grasa que contiene tiende a flotar y de esta forma es separada.

El parámetro más importante a definir en estos equipos es el volumen que requieren. El volumen de la trampa debe calcularse para un tiempo de retención mínimo de 30 minutos a caudal máximo.

- Separador tipo API

Este tipo de separadores consiste en un canal de sección rectangular, trabajando en régimen de flujo laminar y con un tiempo de retención que permita a las gotas de aceite a separar alcanzar la superficie donde serán eliminadas.

- Tanques gravimétricos

Es un tanque vertical de forma cilíndrica, construido en acero al carbono, cerrado por su parte superior mediante techo fijo o flotante. Tiene un *skimmer* flotante sobre boyas para separación de la capa de aceite separada en superficie, unido al exterior del tanque mediante una línea flexible o bien con tubería metálica provista de una rótula, que permita el movimiento del *skimmer* cuando haya variaciones en el nivel de líquido en el tanque. También cuenta con un sistema de evacuación de los gases desprendidos hasta la antorcha de la instalación.

#### **2.1.2.2. Operaciones químicas unitarias**

Las operaciones químicas unitarias son los procesos de tratamiento en los cuales la eliminación o conversión de los contaminantes se lleva a cabo con la adición de productos químicos o gracias al desarrollo de ciertas reacciones químicas.

##### **2.1.2.2.1. Precipitación química**

Consiste en la eliminación de una sustancia disuelta indeseable, por adición de un reactivo que forme un compuesto insoluble con el mismo, facilitando así su eliminación por cualquiera de los métodos descritos en la eliminación de la materia en suspensión. En algunos casos, la alteración es pequeña, y la eliminación se logra al quedar atrapados dentro de un precipitado voluminoso constituido por el coagulante previamente aplicado.

#### **2.1.2.2.2. Procesos electroquímicos**

Están basados en la utilización de técnicas electroquímicas, haciendo pasar una corriente eléctrica a través del agua provocando reacciones de oxidación-reducción, tanto en el cátodo como en el ánodo. Sin embargo, como ventajas cabe destacar la versatilidad de los equipos, la ausencia tanto de la utilización de reactivos como de la presencia de fangos y la selectividad, pues controlar el potencial de electrodo permite seleccionar la reacción electroquímica dominante deseada.

#### **2.1.2.2.3. Adsorción**

El proceso de adsorción consiste en la captación de sustancias solubles en la superficie de un sólido. Un parámetro fundamental en este caso es la superficie específica del sólido, dado que el compuesto soluble a eliminar se ha de concentrar en la superficie de este. Hay dos formas clásicas de utilización de carbón activo, con propiedades diferentes y utilizadas en diferentes aplicaciones:

- Carbón activado granular (GAC)

Se suele utilizar una columna como medio de contacto entre el agua a tratar y el carbón activado, en la que el agua entra por la parte inferior y asciende hacia la superior. El tamaño de partícula en este caso es mayor que en el otro. Se suele utilizar para eliminar elementos traza, especialmente orgánicos, que pueden estar presentes en el agua, y que habitualmente han resistido un tratamiento biológico. Son elementos, que, a pesar de su pequeña concentración, en muchas ocasiones proporcionan mal olor, color o sabor al agua.



- Carbón activo en polvo (CAP)

Este tipo de carbón se suele utilizar en procesos biológicos, cuando el agua contiene elementos orgánicos que pueden resultar tóxicos. También se suele añadir al agua a tratar y pasado un tiempo de contacto, normalmente con agitación, se deja sedimentar las partículas para su separación previa. Suelen ser operaciones llevadas a cabo en discontinuo.

#### **2.1.2.2.4. Desinfección**

La desinfección pretende la destrucción o inactivación de los microorganismos que puedan causarnos enfermedades, dado que el agua es uno de los principales medios por el que se transmiten. Los organismos causantes de enfermedades pueden ser bacterias, virus, protozoos y algunos otros. La desinfección se hace imprescindible para la protección de la salud pública, si el agua a tratar tiene como finalidad el consumo humano. En el caso de aguas residuales industriales, el objetivo puede ser no solo desactivar patógenos, sino cualquier otro organismo vivo, si lo que se pretende es reutilizar el agua.

La utilización de desinfectantes persigue tres finalidades: producir agua libre de patógenos u organismos vivos, evitar la producción de subproductos indeseables de la desinfección y mantener la calidad bacteriológica en la red de conducción posterior. Los compuestos químicos más utilizados para la desinfección del agua son: hipoclorito de sodio ( $\text{NaClO}$ ), ácido hipocloroso ( $\text{HClO}$ ), clorito de sodio ( $\text{NaClO}_2$ ).

### **2.1.2.3. Procesos biológicos unitarios**

Constituyen una serie de importantes procesos de tratamiento que tienen en común la utilización de microorganismos (entre las que destacan las bacterias) para llevar a cabo la eliminación de componentes indeseables del agua, aprovechando la actividad metabólica de los mismos sobre esos componentes. La aplicación tradicional consiste en la eliminación de materia orgánica biodegradable, tanto soluble como coloidal, así como la eliminación de compuestos que contienen elementos nutrientes. Es uno de los tratamientos más habituales, no solo en el caso de aguas residuales urbanas, sino en buena parte de las aguas industriales.

#### **2.1.2.3.1. Procesos biológicos aerobios**

- Cultivos en suspensión

Proceso de fangos activados (lodos activados), y modificaciones en la forma de operar: aireación prolongada, contacto-estabilización, reactor discontinuo secuencial (SBR).

- Cultivos fijos

Los microorganismos se pueden inmovilizar en la superficie de sólidos (biomasa soportada), destacando los filtros percoladores (también conocido como lechos bacterianos o filtros biológicos).

#### **2.1.2.3.2. Procesos biológicos anaerobios**

El tratamiento anaerobio es un proceso biológico ampliamente utilizado en el tratamiento de aguas residuales. Cuando éstas tienen una alta carga orgánica, se presenta como única alternativa frente al que sería un costoso tratamiento aerobio, debido al suministro de oxígeno.

#### **2.1.2.3.3. Membranas**

Las membranas son barreras físicas semipermeables que separan dos fases, impidiendo su íntimo contacto y restringiendo el movimiento de las moléculas a través de ella, de forma selectiva. Este hecho permite la separación de las sustancias contaminantes del agua, generando un efluente acuoso depurado.

### **2.1.3. Reglamento de las Descargas y Reúso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos de Guatemala.**

El objeto del Manual General del Acuerdo Gubernativo 236-2006, Reglamento de las Descargas y Reúso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos es establecer los criterios y requisitos que deben cumplirse para la descarga y reúso de aguas residuales, así como para la disposición de lodos en Guatemala.

#### **2.1.3.1. Estudio técnico**

El estudio técnico permite la evaluación, control y seguimiento del desempeño ambiental entre el ente generador y la persona que descarga al alcantarillado público; de su adecuada formulación dependerá que los entes

generadores y las personas que descargan al alcantarillado público logren alcanzar las metas de cumplimiento y los límites máximos permisibles establecidos.

La metodología para la caracterización del efluente de aguas residuales utilizada es la establecida por la referencia bibliográfica *Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water* el análisis de los parámetros se realizará en base a este acuerdo gubernativo.

#### **2.1.3.2. Caracterización del afluente**

La persona individual o jurídica, pública o privada, responsable de generar lodos, deberá realizar la caracterización de los mismos e incluir el resultado en el estudio técnico.

Las muestras se tomarán directamente de la fosa de las lavadoras, se colectará 1 L de muestra en un frasco de vidrio de boca ancha y tapa cubierta de PVC polietileno. La muestra se debe tomar de 20 cm a 30 cm de profundidad, cuando no haya mucha turbulencia para asegurar una mayor representatividad.

#### **2.1.3.3. Metas de cumplimiento**

La meta de cumplimiento, al finalizar las etapas del modelo de reducción progresiva de cargas, se establece en tres mil kilogramos por día de demanda bioquímica de oxígeno, con un parámetro de calidad asociado igual o menor que doscientos miligramos por litro de demanda bioquímica de oxígeno. Los límites máximos permisibles de los parámetros para las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores son:

Tabla I. **Límites máximos permisibles para entes generadores nuevos**

<b>Parámetro</b>	<b>Dimensional</b>	<b>Limites máximo permisible</b>
Temperatura	°C	TCR +/- 7
Grasas y aceites	mg/L	10
Materia Flotante	Ausencia/Presencia	Ausente
Sólidos Suspendidos	mg/L	100
Nitrógeno total	mg/L	20
Fósforo Total	mg/L	10
Potencial de hidrógeno	Unidades de potencial de hidrógeno	6 a 9
Coliformes fecales	Número más probable en cien mililitros	< 1 x 10 <sup>4</sup>
Arsénico	mg/L	0,1
Cadmio	mg/L	0,1
Cianuro total	mg/L	1
Cobre	mg/L	3
Cromo hexavalente	mg/L	0,1
Mercurio	mg/L	0,01
Níquel	mg/L	2
Plomo	mg/L	0,4
Zinc	mg/L	10
Color	Unidades platino cobalto	500

Fuente: Artículo 20, Capítulo IV, ACUERDO GUBERNATIVO No. 236-2006.



### **3. DISEÑO METODOLÓGICO**

Inicialmente se llevó la recolección de 5 muestras del efluente a la salida de la fosa de captación de aguas residuales industriales que vienen de los diferentes procesos que conforman las dos líneas de producción. Se llevaron a cabo los ensayos fisicoquímicos y microbiológicos necesarios para la caracterización del agua residual industrial. Se determinaron los parámetros físicos, químicos y biológicos de los efluentes residuales industriales, así como el flujo volumétrico, con el fin de poder determinar la capacidad que los equipos de la planta de tratamiento debieran tener.

Se compararon los resultados obtenidos en la caracterización del agua residual industrial con lo establecido por el Reglamento de las Descargas y Reúso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos, Acuerdo Gubernativo 236-2006 y se determinaron los parámetros que no cumplían con el mismo.

Se determinaron las operaciones unitarias y equipos necesarios para llevar a cabo un tratamiento de aguas residuales industrial con flujo continuo, se realizó la propuesta de la planta de tratamiento de aguas en el cual se presentaron la ubicación de los equipos con su respectivo sistema de tuberías. Finalmente se establecieron los procedimientos de operación y mantenimiento de los equipos que componen la planta de tratamiento de aguas residuales industriales propuesta.

### 3.1. Variables

Las variables que influyen en el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales industriales son las siguientes:

Tabla II. **Variables para la caracterización del efluente de la industria de fabricación de envases de aluminio**

Variable	Dimensional
Temperatura	°C
Materia flotante	-
Color	u Pt-Co
Conductividad	mS/cm
Sólidos disueltos	mg/L
Materia flotante	Presente/ Ausente
DQO	mg/L
Olor	-
pH	-
Grasas y aceite	mg/L
Sólidos suspendidos	mg/L
DBO	mg/L
Relación DQO/DBO	-

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Variables en prueba de jarras**

Variable	Dimensional
Dosis	mg/L
Color	u Pt-Co
pH	-

Fuente: elaboración propia.



Tabla IV. **Variables en el dimensionamiento de equipos**

<b>Variable</b>	<b>Dimensional</b>
Volumen	m <sup>3</sup>
Área	m <sup>2</sup>
Altura	m
Diámetro	m
Tiempo de retención	h
Caudal	m <sup>3</sup> /h

Fuente: elaboración propia.

### **3.2. Delimitación de campo de estudio**

Las aguas residuales provenientes de las dos líneas de producción de una industria de fabricación de envases de aluminio ubicada en Km. 32 Ruta al Pacífico, Parque Industrial Flor de Campo Guatemala, Guatemala.

### **3.3. Recursos humanos disponibles**

- Investigadora: Gabriela Michele Acevedo Ocón
- Asesor: Ing. Sergio Alejandro Recinos

### **3.4. Recursos materiales disponibles (equipo, cristalería, reactivos)**

Los equipos, cristalería y reactivos necesarios para llevar a cabo este proyecto de investigación son los siguientes:

#### **3.4.1. Equipo de medición**

- Conductímetro
- Potenciómetro

- Papel medidor de pH
- Turbidímetro
- Agitador magnético
- Agitador de paletas
- Balanza analítica
- Termómetro
- Medidor de TDS
- Butirómetro
- Centrífuga
- Equipo de baño maría
- Cronómetro

#### **3.4.2. Cristalería**

- *Beaker*
- *Erlenmeyer*
- Probeta
- Pipeta volumétrica
- Varilla de vidrio
- Pipeta aforada
- Jeringas desechables

#### **3.4.2.1. Reactivos**

- Ácido sulfúrico
- Alcohol amílico
- Sulfato de aluminio
- Cloruro férrico

- Policloruro de aluminio
- Polímero aniónico

### **3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa**

A continuación, se presentan las técnicas cualitativa y cuantitativa utilizadas para determinar las variables de caracterización de las aguas residuales industriales.

#### **3.5.1. Temperatura**

El procedimiento para la determinación de temperatura se describe a continuación:

##### **3.5.1.1. Materiales y equipo**

- Termómetro de mercurio en vidrio de inmersión parcial
- *Beaker* de 500 mL.

##### **3.5.1.2. Recolección y almacenamiento de las muestras**

Las determinaciones de temperatura se efectúan de inmediato en el lugar de muestreo.

##### **3.5.1.3. Procedimiento**

Se tomó un volumen de muestra tal, que el termómetro quedó debidamente sumergido.

### **3.5.2. Conductividad**

El procedimiento para la determinación de conductividad se describe a continuación:

#### **3.5.2.1. Materiales y equipo**

- *Beaker* de 50 mL
- Conductímetro

#### **3.5.2.2. Recolección y almacenamiento de las muestras**

Las determinaciones de conductividad se efectúan en el lugar de muestreo.

#### **3.5.2.3. Procedimiento**

Se enjuagó la celda con varias porciones de la muestra, se colocó la muestra en un *beaker* y se introdujo la celda en la muestra. Se tomó la lectura que mostró la pantalla del equipo.

### **3.5.3. Sólidos totales disueltos**

El procedimiento para la determinación de los sólidos totales disueltos se describe a continuación:

#### **3.5.3.1. Materiales y equipo**

- *Beaker* de 500 mL

- Medidor de TDS

#### **3.5.3.2. Recolección y almacenamiento de las muestras**

Las determinaciones de sólidos totales disueltos se efectuaron en el lugar de muestro.

#### **3.5.3.3. Procedimiento**

Se colocó el medidor en modo TDS y se enjuagó la celda con varias porciones de la muestra, se colocó la muestra en un *beaker* y se introdujo la celda en la muestra. Se tomó la lectura que muestra la pantalla del equipo.

### **3.5.4. Potencial de hidrógeno**

El procedimiento de determinación del potencial de hidrógeno se describe a continuación:

#### **3.5.4.1. Materiales y equipo**

- *Beaker* de 50 mL
- Potenciómetro

#### **3.5.4.2. Recolección y almacenamiento de las muestras**

Las determinaciones de potencial de hidrógeno se efectuaron de inmediato en el lugar de muestreo.

### **3.5.4.3. Procedimiento**

Se calibró el equipo con las soluciones *buffer* de acuerdo con las indicaciones del fabricante. Se sumergió el bulbo del electrodo en un *beaker* que contenía la muestra y se esperó a que la lectura del equipo se estabilizara. Se tomó el pH de la lectura que indicó el equipo.

### **3.5.5. Grasas y aceites**

El procedimiento de determinación de grasas y aceites se describe a continuación:

#### **3.5.5.1. Materiales, equipo y reactivos**

- *Beaker* de 50 mL
- Probeta
- Butirometro
- Pipeta aforada
- Centrífuga
- Equipo de baño maría
- Ácido sulfúrico al 98 % (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)
- Alcohol amílico C<sub>5</sub>H<sub>11</sub>OH

#### **3.5.5.2. Recolección y almacenamiento de las muestras**

Las muestras que se tomaron para la determinación de grasa y aceites son del tipo simple. Se colectaron 1 L de muestra en un frasco de vidrio de boca

ancha y tapa cubierta de PVC polietileno. La muestra se tomó de 20 cm a 30 cm de profundidad, cuando no había mucha turbulencia para asegurar una mayor representatividad.

### 3.5.5.3. Procedimiento

Se midieron 10 mL de ácido sulfúrico al 98 % y se colocaron dentro del butirómetro, una vez preparada la muestra, se tomaron 11 mL de muestra y se introdujeron en el butirómetro. En este paso, el butirómetro se calentó considerablemente y los productos que se formaron tiñeron la disolución de color marrón. La grasa liberada en este proceso fue separada posteriormente por centrifugación. Se añadió 1 mL de alcohol amílico al butirómetro y se cerró. Se agitó bien la mezcla. Los butirómetros se introdujeron en la centrifugadora y se centrifugaron durante unos cinco minutos. En la escala del butirómetro se leyó el contenido en grasas y aceites de la muestra como contenido de masa en tanto por ciento.

Figura 19. **Determinación de grasas y aceites**



Fuente: Laboratorio químico de envases de Centroamérica.

Figura 20. **Medición de tiempo de retención de grasas y aceites**



Fuente: Laboratorio químico de envases de Centroamérica.

### 3.5.6. Prueba de jarras

Los materiales para llevar a cabo una prueba de jarras son los siguientes:

#### 3.5.6.1. Materiales, equipo y reactivos

- Agitador de paletas
- Cronómetro
- *Beakers* de 1000 mL
- Probeta de 500 mL
- Balanza analítica
- Jeringas desechables
- Pipetas
- Sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ )
- Cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ )
- Policloruro de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ )



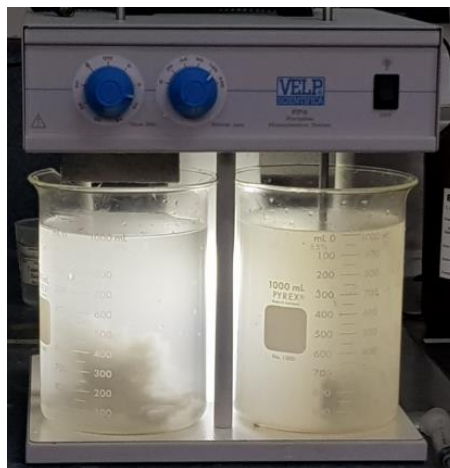
### 3.5.6.2. Recolección y almacenamiento de las muestras

Previamente a tomar la muestra, se lavaron las buretas con el agua cruda. Se midió en una probeta 1 L de agua cruda; posteriormente se llevó al laboratorio para su medición.

### 3.5.6.3. Procedimiento

Se colocaron los baffles deflectores, se introdujeron las paletas del aparato mezclador de jarras, de manera que estuvieran bien centradas. Se añadió coagulante en cantidades crecientes en vasos sucesivos. Se agitó rápidamente hasta que aparecieron los flóculos. Se tomó el tiempo y se detuvo el mezclador. Se determinó el color y pH con los métodos mencionados anteriormente. Posteriormente se agregó floculante en cantidades crecientes en vasos crecientes en vasos sucesivos. Se agitó lentamente hasta que aparecieron los flóculos. Se tomó el tiempo y se detuvo el mezclador. Se determinó el color y pH con los métodos mencionados anteriormente.

Figura 21. **Agitador de paletas.**



Fuente: Laboratorio químico de envases de Centroamérica.

### **3.5.7. Prueba de sedimentación**

Se realizó una prueba de sedimentación para determinar el tiempo de retención necesario en un sedimentador para una eficiente separación de agua clara y lodos.

#### **3.5.7.1. Materiales, equipo y reactivos**

- *Beaker* de 1L.
- Probeta de 100 mL.
- Probeta de 1L
- Pipeta volumétrica de 25 mL.
- Cronómetro
- Agitador magnético
- Hidróxido de sodio (NaOH)
- Policloruro de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ )

#### **3.5.7.2. Recolección y almacenamiento de las muestras**

Previamente a tomar la muestra se lavaron las buretas con el agua cruda. Se midió en una probeta 1 000 mililitros de agua cruda, posteriormente se llevó al laboratorio para su medición.

#### **3.5.7.3. Procedimiento**

Inicialmente se determinó los sólidos suspendidos de la muestra sin tratar. Se agregó el agua residual al *beaker*, se neutralizó con hidróxido de sodio hasta llegar a un pH de 7. Se agregaron la dosis óptima de coagulante, según la prueba

de jarras; se mezcló rápidamente durante 2 min. Posteriormente se agregó la dosis optima de floculante y se mezcló durante 20 min. Se pasó la muestra a una probeta de 1L evitando que los flóculos se rompieran. Se dejó reposar para permitir una sedimentación, se midió la altura de la interface y el contenido se sólidos suspendidos cada 5 minutos hasta que ya no se observó ninguna variación. Se eliminó el sobrenadante para no perder lodos, se midió el volumen de lodos, humedad y concentración de sólidos.

**Figura 22. Prueba de sedimentación**



Fuente: Laboratorio químico de envases de Centroamérica.

### **3.5.8. Concentración de sólidos en lodos**

El procedimiento de determinación de la concentración de sólidos en lodos se describe a continuación:

#### **3.5.8.1. Materiales, equipo y reactivos**

- Balanza analítica
- Espátula
- Mufla

- Crisol de porcelana
- Guantes de asbesto
- Desecador

### **3.5.8.2. Recolección y almacenamiento de las muestras**

La muestra de lodos se tomó luego de la prueba de sedimentación, se extrajo el agua clara, dejando los lodos.

### **3.5.8.3. Procedimiento**

Se pesó la muestra de lodos utilizando la balanza en el crisol. Se colocó en la estufa y se secó hasta obtener una masa constante.

## **3.6. Recolección y ordenamiento de la información**

Se recolectaron las muestras en los puntos de medición anteriormente establecidos. Se utilizó el siguiente formato para recolectar la información necesaria:

Tabla V. **Formato de toma de datos**

Muestra No.	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Fecha										
Hora										
Punto de inspección	Entrada PTAR					Salida PTAR				
Parámetros de Medición										
Volumen										
Tiempo										
Caudal										
pH										
Temperatura										
Color										
Olor										
Conductividad										
Grasas y aceites										
Materia flotante										
solidos suspendidos										
DQO										
DBO										

Fuente: elaboración propia.

### 3.7. Tabulación y ordenamiento de la información

Se elaboraron tablas y gráficas en donde el investigador depuró la información y organizó para su interpretación y análisis. Se ordenó la información mediante el uso de tablas de forma particular para cada variable de investigación.

Tabla VI. **Caracterización del agua residual industrial cruda de una industria de fabricación de envases de aluminio**

Parámetros de Medición	Dimensionales	Muestra No.					$\bar{X}$
		1	2	3	4	5	
pH	-	3,69	4,00	4,30	3,80	4,00	3,95
Temperatura	°C	37	38	35	36	37	36,6
Color	u Pt-Co	429	656	456	645	550	547
Olor	-	Aceite	Aceite	Aceite	Aceite	Aceite	Aceite
Conductividad	mS/cm	1 821	1 721	1 798	1 933	1 763	1 807
Grasas y aceites	mg/L	380	320	337	373	340	350
Materia flotante	presente/ ausente	ausente	ausente	Ausente	ausente	ausente	ausente
Sólidos suspendidos	mg/L	1 476	1 432	1 498	1 457	1 517	1 476
DQO	mg/L	4 250	4 193	4 200	3 998	4 109	4 150
DBO	mg/L	1 680	1 656	1 676	1 668	1 620	1 660

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Caracterización del agua residual industrial tratada de una industria de fabricación de envases de aluminio**

Parámetros de Medición	Dimensionales	Muestra No.					$\bar{X}$
		1	2	3	4	5	
pH	-	7	7,5	8	7,2	7,6	7,46
Temperatura	°C	29,9	32	34	32	33	32,18
Color	u Pt-Co	245	268	256	235	276	256
Olor	-	sin olor	sin olor	sin olor	sin olor	sin olor	sin olor
Conductividad	mS/cm	1 624	1 720	1 682	1 812	1 685	1 754
Grasas y aceites	mg/L	5	7	5	8	9	5
Materia flotante	presente/ausente	ausente	ausente	ausente	Ausente	ausente	ausente
Sólidos suspendidos	mg/L	328	367	352	314	354	343
DQO	mg/L	520	531	510	549	545	531
DBO	mg/L	356	340	320	390	319	345

Fuente: elaboración propia.

### 3.8. Análisis estadístico

Media

Ecuación #1

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 \dots + X_n}{n}$$

Donde:

$\bar{X}$  = valor promedio de los datos

$X$  = valor obtenido

$n$  = número de datos

Desviación Estándar

Ecuación #2

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i^2 - (\sum_{i=1}^N x_i)^2 / N)}{N - 1}}$$

Donde:

$S$  = desviación estándar entre las corridas

$N$  = cantidad total de corridas

$X$  = valor obtenido

Número óptimo de muestras

$$N \geq \left(t * \frac{s}{U}\right)^2$$

Ecuación #3

Donde:

$N$  = Número de muestras a tomar

$t$  = Prueba *t* de *Student* para un nivel de confianza dado

$s$  = Desviación estándar global

$U$  = Nivel aceptable de incertidumbre

Utilizando una desviación estándar global de 0,52 y un nivel aceptable de 0,5 se procedió a determinar la *t* de *student* para un nivel de confianza del 95 % dando como resultado 5 muestras como número óptimo.



## 4. RESULTADOS

### 4.1. Caracterización de las aguas residuales de una industria de fabricación de envases de aluminio

La caracterización de las aguas residuales industriales realizada con los procedimientos descritos en la sección de análisis cuantitativo y cualitativo se presenta a continuación.

Tabla VIII. **Caracterización de agua residual industrial cruda de una industria de fabricación de envases de aluminio**

Parámetro	Dimensional	Resultados	Límites máximos permisibles según Decreto 236-2006	Cumplimiento Límites máximos permisibles según Decreto 236-2006
Temperatura	°C	37,2	TCR +/- 7	Cumple
Materia flotante	Presente/ Ausente	Ausente	Ausente	Cumple
Color	u Pt-Co	547	500	No Cumple
Conductividad	mS/cm	2,16	-	No aplica
Sólidos disueltos	mg/L	1 200	-	No aplica
DQO	mg/L	4 150	-	No aplica
Olor	-	Aceitoso	-	No aplica
pH	Unidades de potencial de hidrogeno	3,69	6 a 9	No cumple
Grasas y Aceites	mg/L	350	10	No cumple
Sólidos suspendidos	mg/L	1 476	100	No cumple
DBO	mg/L	1 660	200	No cumple

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Caudal mínimo, medio y máximo de afluente de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales**

Caudal Mínimo (m <sup>3</sup> /h)	Caudal Medio (m <sup>3</sup> /h)	Caudal Máximo (m <sup>3</sup> /h)
2,77	12,70	26,87

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2. Procesos del tratamiento de las aguas residuales de una industria de fabricación de envases de aluminio

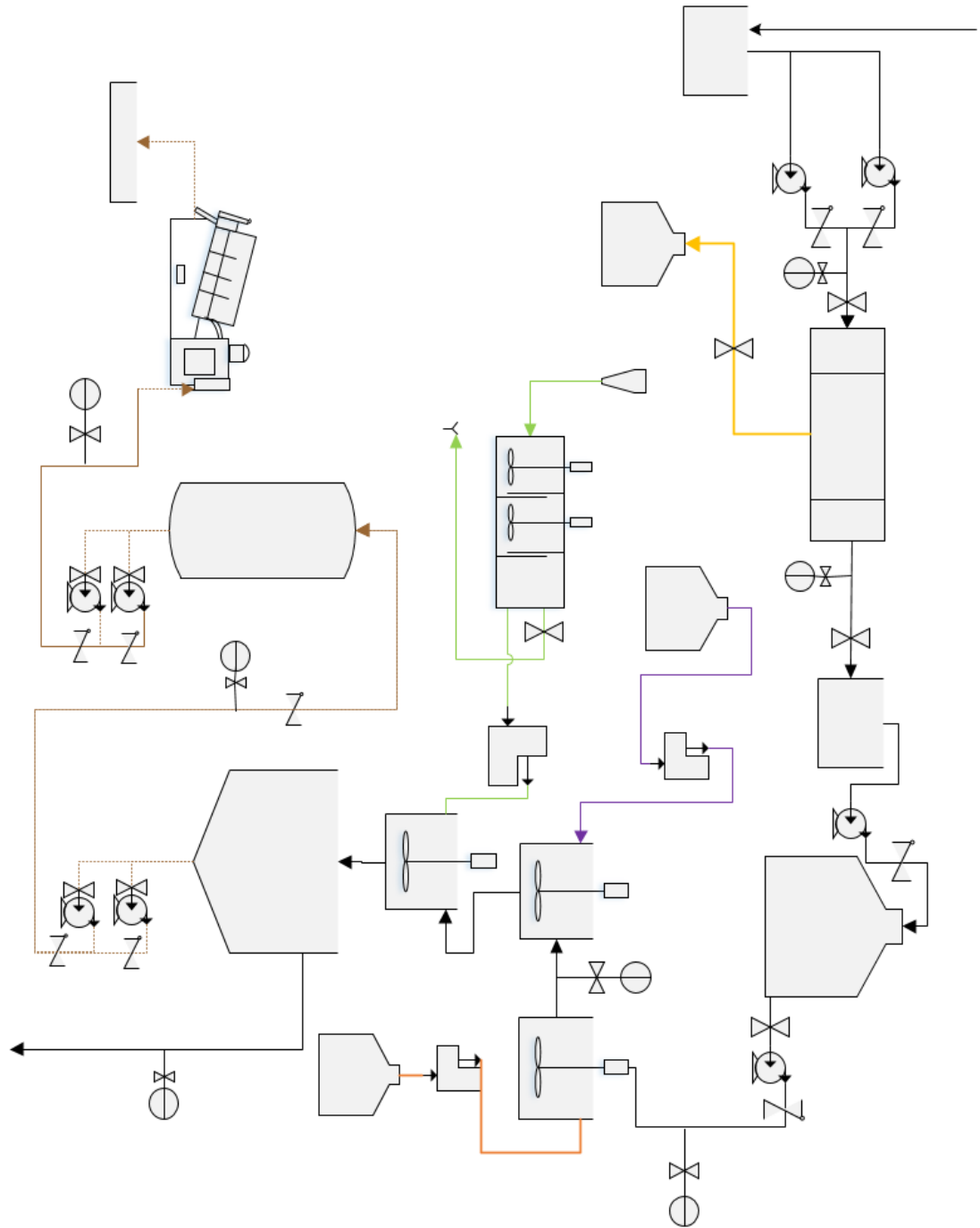
El proceso de tratamiento de aguas residuales esta compuesto por varias etapas las cuales dependen una de otras para su correcto funcionamiento.

Tabla X. **Resumen de operaciones unitarias y equipos determinados para el tratamiento de agua residual de una industria de fabricación de envases de aluminio**

Etapa	Operación unitaria	Equipo
Pretratamiento	Decantación y sedimentación	Tanque separador de grasas y aceites
	Homogenización de caudal	Tanques de almacenamiento
	Neutralización	Reactor CSTR
Tratamiento primario	Coagulación	Reactor CSTR
	Floculación	Reactor CSTR
	Sedimentación	Tanque sedimentador
Tratamiento de lodos	Espesamiento	Espesador de lodos
	Deshidratación	Filtro

Fuente: elaboración propia.

Figura 23. Diagrama de equipo de un sistema de tratamiento de agua residual industrial de una industria de fabricación de envases de aluminio




Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Simbología y descripción de diagrama de equipo de un sistema de tratamiento de agua residual industrial de una industria de fabricación de envases de aluminio**

Símbolo	Descripción
	Bomba neumática
	Bomba dosificadora de químicos
	Filtro tornillo
	Fosa de captación de agua residual
	Punto de toma de muestra
	Reactor CSTR
	Tanque clarificador
	Tanque de coagulante
	Tanque de hidróxido de sodio
	Tanque de lodos
	Tanque de preparación de floculante
	Tanque separador de lodos
	Tanque homogenizador
	Tanque separador de grasas y aceite
	Tolva de floculante
	Válvula
	Válvula antirretorno

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Simbología de fluidos de diagrama de equipo de un sistema de tratamiento de agua residual industrial de una industria de fabricación de envases de aluminio**

Simbolo	Fluido
	Agua residual
	Coagulante
	Floculante
	Hidróxido de Sodio
	Grasas y aceites
	Lodos

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.1. Pretratamiento

La etapa inicial del sistema de tratamiento de aguas residuales es conocida como pretratamiento debido a que es la etapa de preparación del tratamiento fisicoquímico.

##### 4.2.1.1. Separación de grasas y aceites

El primer proceso del tratamiento de aguas residuales industriales es la separación de grasas y aceites.

Tabla XIII. **Parámetros de operación de tanque separador de grasas y aceites de un sistema de tratamiento de aguas residuales industriales de una industria de fabricación de envases de aluminio**

Equipo	Tanque separador de grasas y aceites
Caudal Máximo (m <sup>3</sup> /h)	26,87
Volumen (m <sup>3</sup> )	15,67
Tiempo de retención (min)	35
Grasas y aceites entrada (mg/L)	350
Grasas y aceites salida (mg/L)	9,6
% Remoción	97 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Vista superior de tanque separador de grasa y aceites**



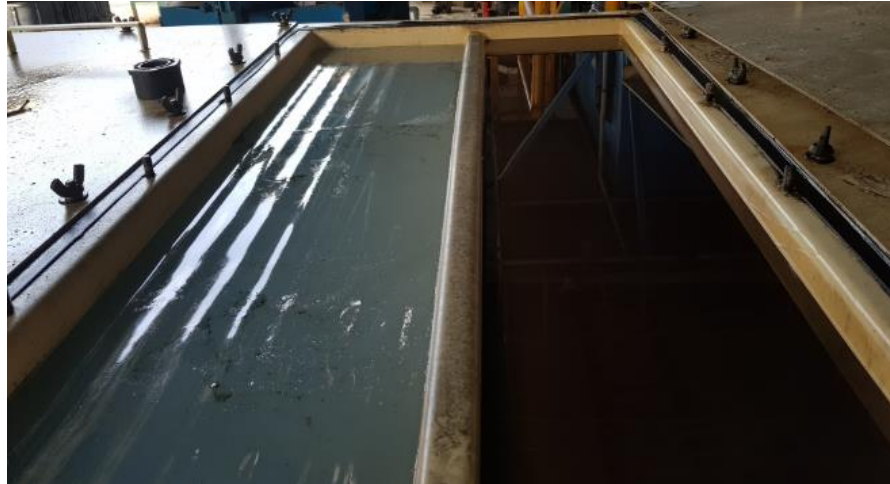
Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Vista lateral de tanque separador de grasa y aceites**



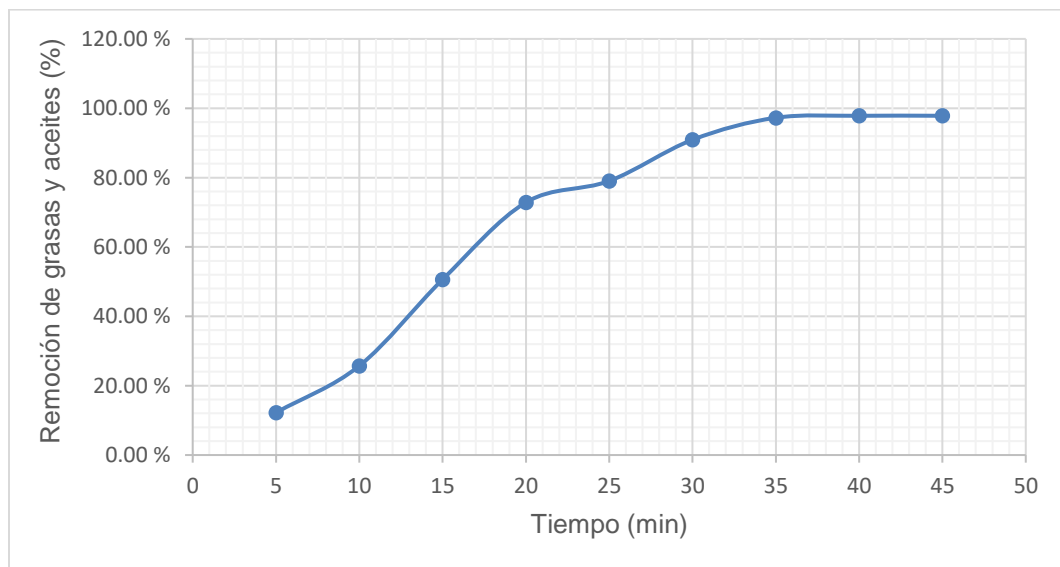
Fuente: elaboración propia.

**Figura 26. Tanque separador de grasas y aceites**



Fuente: Envases de Centroamérica.

**Figura 27. Remoción de grasas y aceites de las aguas residuales industriales de una industria de fabricación de envases de aluminio en función del tiempo**



Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.1.1.1. Mantenimiento

- Mantenimiento semanal

Objetivo: Drenar las grasas y aceites separados del afluente para evitar que se sature y a así ser desechados adecuadamente.

Procedimiento:

- Cerrar válvula de salida del tanque separador de grasas y aceites.
- Esperar a que el nivel de la trampa aumente hasta el orificio de extracción.
- Drenar la grasa y aceite acumulado en la parte superior del tanque hacia el tanque de recepción de grasas y aceites.
- Abrir la válvula de salida del tanque separador de grasas y aceites.
- Retirar el tanque de recepción de grasas y aceites y eliminar a través de gestor de residuos autorizado.

- Mantenimiento anual

Objetivo: Limpiar interna y externamente la trampa de grasas y aceites para evitar obstrucciones en tuberías.

Procedimiento:

- Apagar bomba de alimentación del tanque separador de grasas y aceites.
- Esperar a que el tanque separador de grasas y aceites se vacíe completamente.

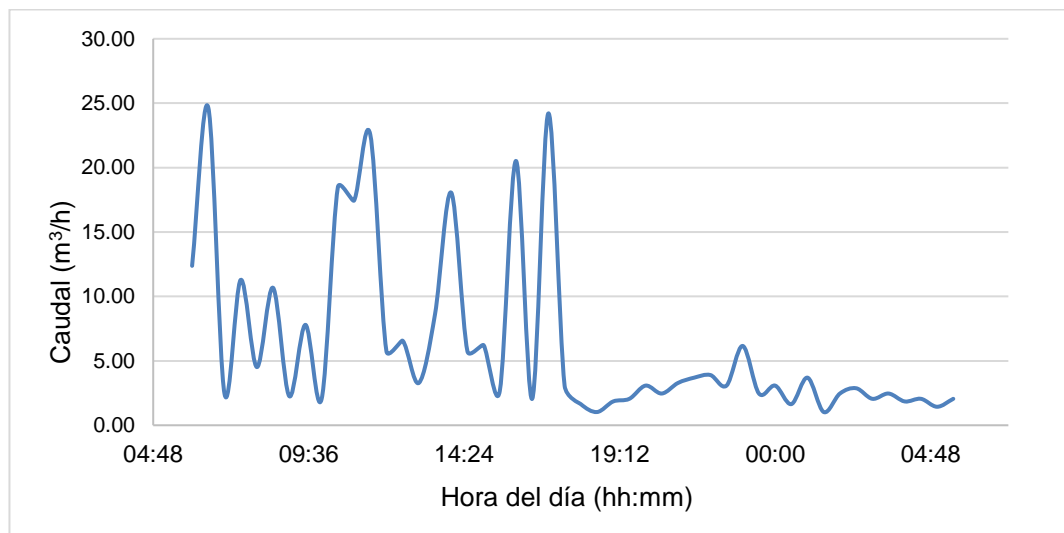


- Utilizando trapos con desengrasante limpiar el exterior e interior del tanque separador de grasas y aceites.
- Al finalizar la limpieza retirar todos los trapos utilizados.
- Encender bomba de alimentación del tanque separador de grasas y aceites.

#### 4.2.1.2. Homogenización de caudal

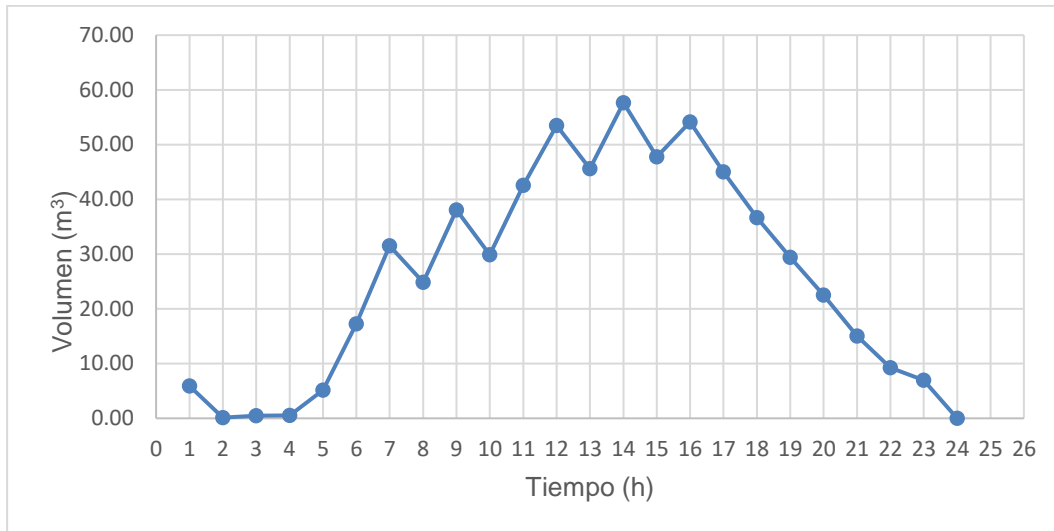
Se determinó el caudal de generación de agua residual industrial cruda en un periodo de tiempo de 24 horas.

Figura 28. **Curva de caudal de afluente de un sistema de tratamiento de agua residual industrial de una industria de fabricación de envases de aluminio**



Fuente: elaboración propia.

Figura 29. **Diferencia de alimentación y extracción de caudal medio de tanque de homogenización de caudal**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Parámetros de operación de tanque de homogenización de caudal de un sistema de tratamiento de aguas residuales industriales de una industria de fabricación de envases de aluminio**

Equipo	Tanque homogenización de caudal
Caudal Medio (m³/h)	12,70
Volumen (m³)	57,65

Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Tanque de homogenización de caudal.**



Fuente: Envases de Centroamérica.

- Mantenimiento anual

Objetivo: Limpiar externamente el tanque de homogenización de caudal.

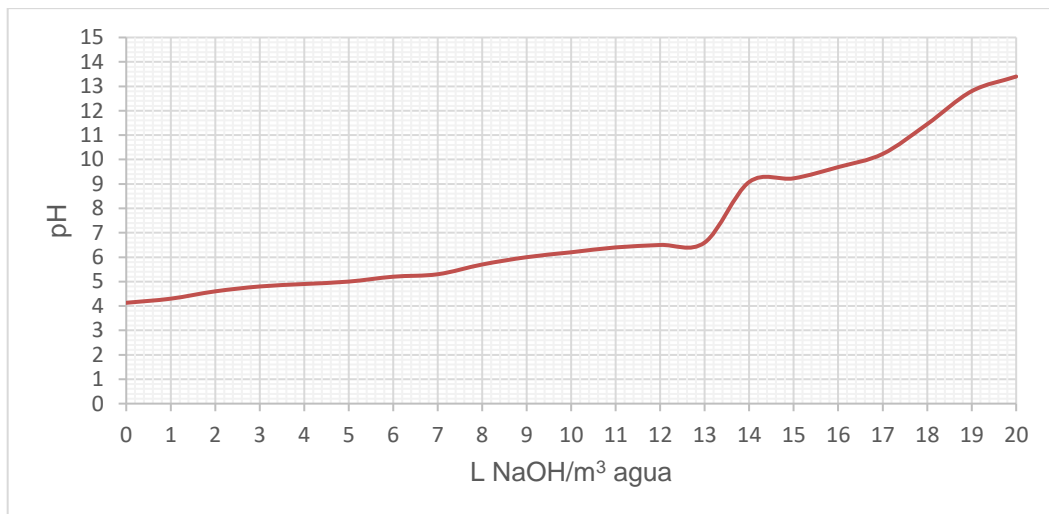
Procedimiento:

- Apagar bomba de alimentación del tanque de homogenización de caudal.
- Esperar a que el tanque de homogenización de caudal se vacíe completamente.
- Utilizando trapos limpiar el exterior del tanque.
- Al finalizar la limpieza retirar todos los trapos utilizados.
- Encender bomba de alimentación del tanque de homogenización de caudal.

### 4.2.1.3. Neutralización

El agua residual industrial para ser descartada en el cuerpo receptor establecido debe tener un pH neutro, por lo cual se tiene una etapa de neutralización.

Figura 31. **Curva de neutralización del afluente de un sistema de tratamiento de agua residual industrial de una industria de fabricación de envases de aluminio**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Parámetros de operación de reactor de neutralización de un sistema de tratamiento de aguas residuales industriales de una industria de fabricación de envases de aluminio**

Equipo	Reactor CSTR de neutralización
Caudal Medio (m³/h)	12,70
Volumen (m³)	1,06
Tiempo de retención (min)	5
Reactivo	Hidróxido de sodio (NaOH)
Dosificación de reactivo (L/h)	165,1

Fuente: elaboración propia.

Figura 32. **Reactor CSTR de neutralización**



Fuente: Envases de Centroamérica.

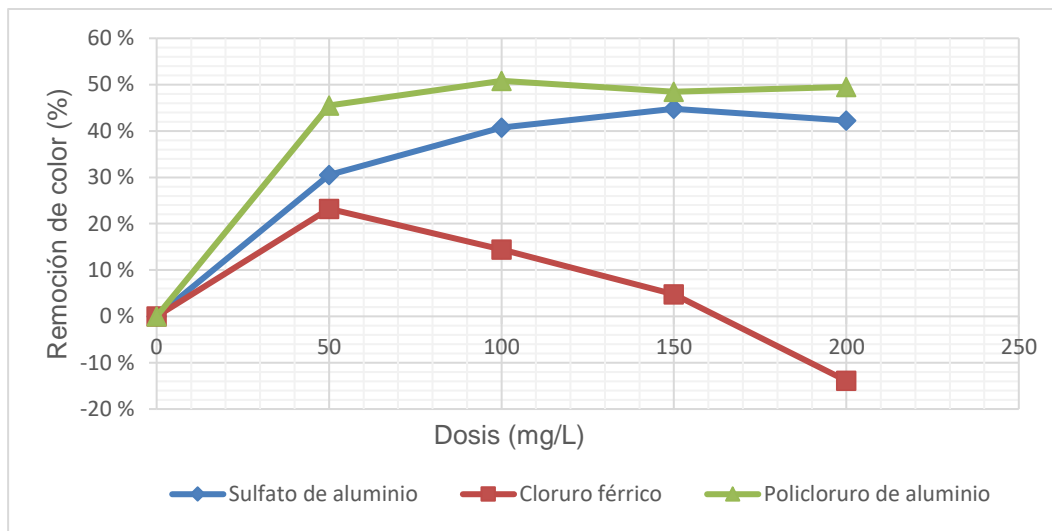
#### **4.2.2. Tratamiento primario**

El tratamiento primario, el cual reduce principalmente los sólidos en suspensión, se desarrolla en dos etapas: coagulación y floculación. Estas dos etapas se logran a través de la adición de sustancias químicas y aplicando energía de mezclado.

##### **4.2.2.1. Coagulación**

La etapa inicial del tratamiento primario es la coagulación, en esta etapa se desestabilizan las partículas coloidales para favorecer la agrupación de los sólidos.

Figura 33. **Porcentaje de remoción de color en función de la concentración de coagulante: sulfato de aluminio, cloruro férrico y policloruro de aluminio**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Parámetros de operación de reactor de coagulación de un sistema de tratamiento de aguas residuales industriales de una industria de fabricación de envases de aluminio**

<b>Equipo</b>	Reactor CSTR de coagulación
<b>Caudal Medio (m<sup>3</sup>/h)</b>	12,70
<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	1,06
<b>Tiempo de retención (min)</b>	5
<b>Reactivo</b>	Policloruro de aluminio
<b>Dosificación de reactivo</b>	100 mg/L

Fuente: elaboración propia.

Figura 34. **Reactor CSTR de coagulación**

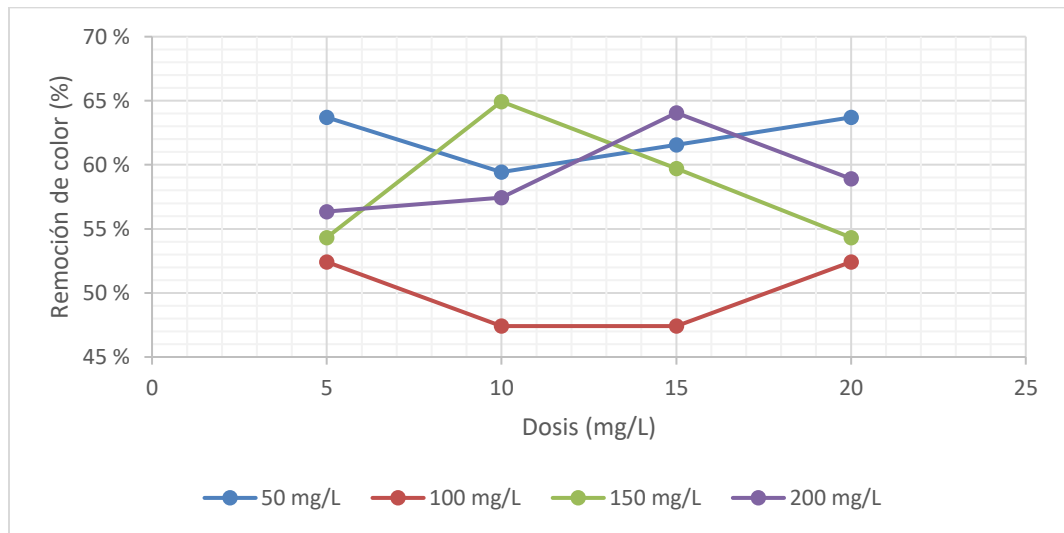


Fuente: Envases de Centroamérica.

#### 4.2.2.2. **Floculación**

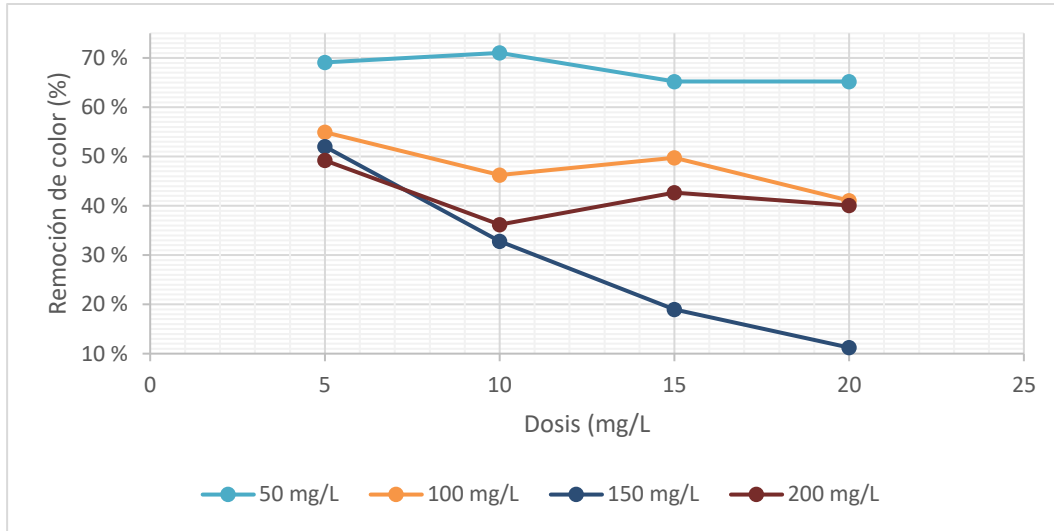
La floculación reduce principalmente el color presente en el agua residual industrial, por lo cual se gráfica la remoción de color en función de las concentraciones de floculante utilizadas en combinación con un coagulante.

Figura 35. **Porcentaje de remoción de color en función de la concentración de floculante utilizando como coagulante sulfato de aluminio**



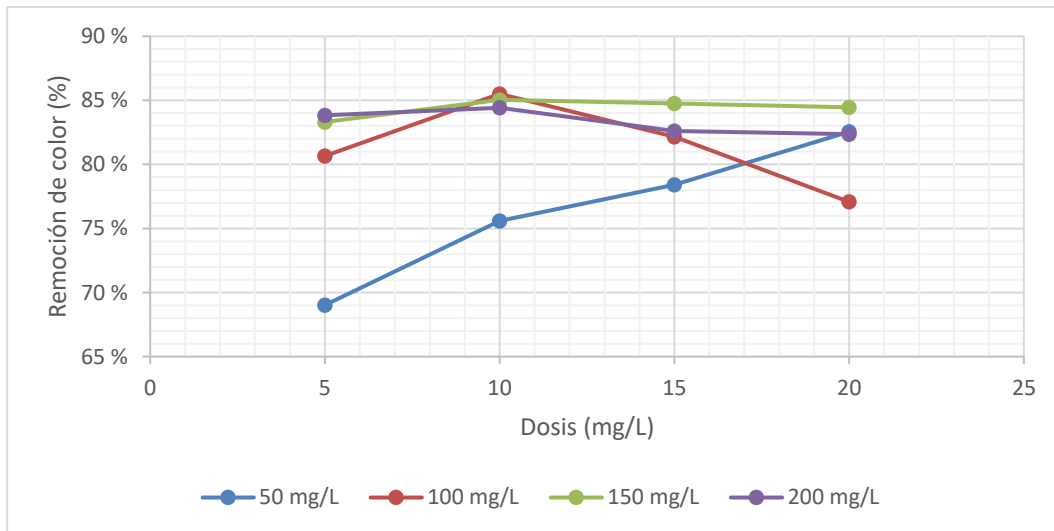
Fuente: elaboración propia.

**Figura 36. Porcentaje de remoción de color en función de la concentración de floculante utilizando como coagulante cloruro férrico**



Fuente: elaboración propia.

**Figura 37. Porcentaje de remoción de color en función de la concentración de floculante utilizando como coagulante policloruro de aluminio**



Fuente: elaboración propia.



Tabla XVII. **Dosis óptimas de coagulante y floculante determinados para el tratamiento de agua residual de una industria de fabricación de envases de aluminio**

Coagulante	Concentración (mg/L)	Floculante	Concentración (mg/L)	Remoción de Color (%)
Policloruro de aluminio	100	Polímero aniónico	10	86

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Parámetros de operación de reactor de floculación de un sistema de tratamiento de aguas residuales industriales de una industria de fabricación de envases de aluminio**

Equipo	Reactor CSTR de floculación
Caudal Medio (m <sup>3</sup> /h)	12,70
Volumen (m <sup>3</sup> )	4,23
Tiempo de retención (min)	20
Reactivo	Polímero aniónico
Dosificación de reactivo	10 mg/L

Fuente: elaboración propia.

Figura 38. **Reactor CSTR de floculación**



Fuente: elaboración propia.

- Mantenimiento anual

Objetivo: Limpiar interna y externamente los reactores de neutralización, coagulación y floculación.

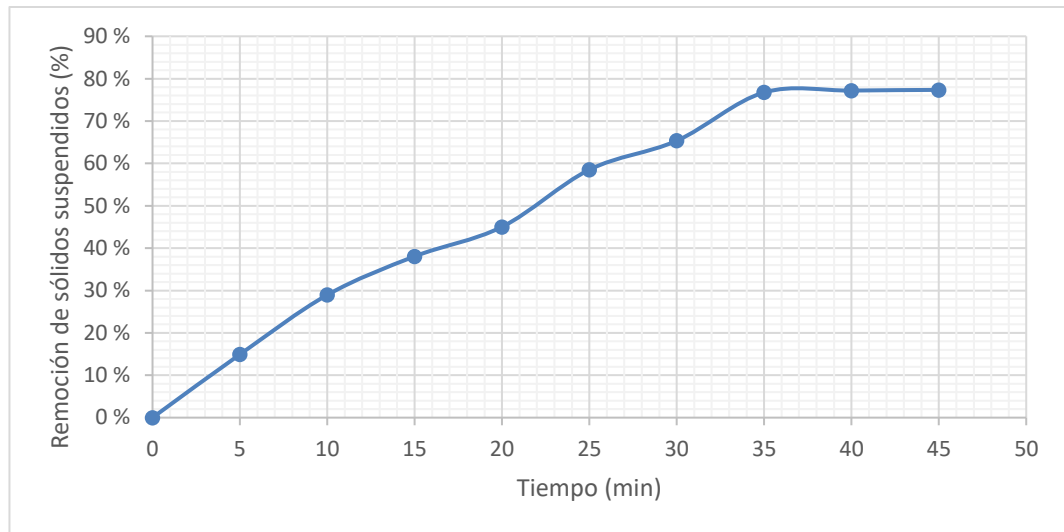
Procedimiento:

- Apagar bomba de salida del tanque de homogenización de caudal.
- Esperar a que los reactores CSTR se vacíen completamente.
- Utilizando trapos limpiar el exterior e interior del tanque.
- Al finalizar la limpieza retirar todos los trapos utilizados.
- Encender bomba de salida del tanque de homogenización de caudal.

#### **4.2.2.3. Sedimentación primaria**

La sedimentación primaria se evalúa mediante el comportamiento de los sólidos suspendidos presentes en las aguas residuales industriales en función del tiempo.

**Figura 39. Porcentaje de remoción de sólidos suspendidos de las aguas residuales industriales de una industria de envases de aluminio en función del tiempo retención**



Fuente: elaboración propia.

**Tabla XIX. Parámetros de operación de tanque de sedimentación primaria de un sistema de tratamiento de aguas residuales industriales de una industria de fabricación de envases de aluminio**

Equipo	Tanque de sedimentación primaria
Caudal Medio (m <sup>3</sup> /h)	12,70
Volumen (m <sup>3</sup> )	6,35
Tiempo de retención (min)	35

Fuente: elaboración propia.

- Mantenimiento anual

Objetivo: Limpiar interna y externamente el tanque de sedimentación.

Procedimiento:

- Apagar bomba de salida del tanque de homogenización de caudal.
- Esperar a que los reactores CSTR se vacíen completamente.
- Esperar a que el tanque sedimentador se vacíe completamente.
- Utilizando trapos limpiar el exterior e interior del tanque.
- Al finalizar la limpieza retirar todos los trapos utilizados.
- Encender bomba de salida del tanque de homogenización de caudal.

#### **4.2.3. Tratamiento de lodos**

A los lodos que se obtienen como resultado de la clarificación del agua residuales industrial se les debe realizar un tratamiento previo a su desecho.

##### **4.2.3.1. Espesamiento de lodos**

Antes de iniciar con el proceso de deshidratación de lodos se debe realizar un espesamiento de los mismos.

Tabla XX. **Parámetros de operación de tanque espesador de lodos de un sistema de tratamiento de aguas residuales industriales de una industria de fabricación de envases de aluminio**

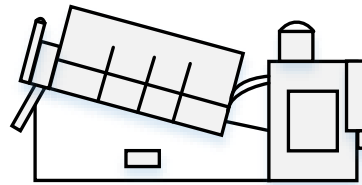
<b>Equipo</b>	Tanque espesador de lodos
<b>Caudal medio (m<sup>3</sup>/h)</b>	5,1
<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	124,8
<b>Tiempo de retención (h)</b>	24

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.3.2. Deshidratación de lodos

Para la deshidratación de lodos se seleccionó un equipo fabricado que opera de manera automática y de forma continua:

Figura 40. **Filtro de tornillo**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Parámetros de operación de un filtro de tornillo de un sistema de tratamiento de aguas residuales industriales de una industria de fabricación de envases de aluminio**

Equipo	Tanque espesador de lodos
Caudal medio (m <sup>3</sup> /h)	5,2
Concentración de sólidos (kg/m <sup>3</sup> )	5

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Caracterización de agua residual industrial tratada de una industria de fabricación de envases de aluminio**

<b>Parámetro</b>	<b>Dimensional</b>	<b>Resultados</b>	<b>Límites máximos permisibles según Decreto 236-2006</b>	<b>Cumplimiento límites máximos permisibles según Decreto 236-2006</b>
Temperatura	°C	32,18	TCR +/- 7	Cumple
Materia flotante	Presente/ Ausente	Ausente	Ausente	Cumple
Color	u Pt-Co	256	500	Cumple
Conductividad	mS/cm		-	No aplica
Sólidos disueltos	mg/L		-	No aplica
DQO	mg/L	531	-	No aplica
Olor	-	Sin olor	-	No aplica
pH	Unidades de potencial de hidrógeno	7,46	6 a 9	Cumple
Grasas y aceites	mg/L	5	10	Cumple
Sólidos suspendidos	mg/L	343	100	No Cumple
DBO	mg/L	345	200	No cumple

Fuente: elaboración propia.

## **5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

Los procesos y operaciones unitarias se combinan y complementan con el fin de realizar un tratamiento de agua residual adecuado. En cada proceso o etapa se reducen o transforman los componentes del agua residual con el fin de que el efluente final cumpla con los parámetros establecidos en el Reglamento de las Descargas y Reúso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos, Acuerdo Gubernativo 236-2006 (Referencia Bibliográfica No.1), así sea permitida para realizar el vertido al cuerpo receptor o para ser reutilizada.

El agua residual industrial que genera el proceso de manufactura de envases de aluminio procede de los equipos de lavado de línea 1 y línea 2, específicamente de la fosa de recolección de ambas lavadoras. El lavado de latas se realiza para extraer los aceites utilizados en el formado y estirado de las mismas. En el lavado de latas participan principalmente el ácido sulfúrico, nítrico, fluorhídrico y fosfórico, por lo que la composición principal de las aguas residuales son aceites y una mezcla de ácidos. Esto se ve reflejado en los resultados de la caracterización de las aguas residuales en la tabla VIII, 350 mg/L de grasas y aceites y un pH ácido de 3,69.

### **5.1. Caracterización de aguas residuales industriales**

En la tabla VIII. se encuentra el resultado de la caracterización de aguas residuales industriales crudas, es decir sin darles ningún tratamiento, como salen del proceso. Se realizó la comparación de dicha caracterización con los límites máximos permisibles por el Reglamento de las Descargas y Reúso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos, Acuerdo Gubernativo 236-2006, con el

fin de establecer los procesos unitarios que conformarán el tratamiento de aguas residuales. Los parámetros que no cumplen los límites máximos permisibles son: el color, pH, grasas y aceites, sólidos suspendidos y DBO. A continuación, se discutirán los procesos unitarios para disminuir las concentraciones de dichos parámetros y poder así, cumplir con lo establecido por el acuerdo.

## **5.2. Pretratamiento**

En el pretratamiento se extraen líquidos inmiscibles y materia flotante, de igual manera se elimina los constituyentes de las aguas residuales industriales cuya presencia pueda provocar problemas de mantenimiento y funcionamiento de los diferentes procesos, operaciones y sistemas auxiliares posteriores.

### **5.2.1. Tanque separador de grasas y aceites**

El primer equipo en el proceso de tratamiento de aguas residuales es un tanque separador de grasas y aceites. La función de esta etapa es separar mediante densidad toda aquella sustancia cuyo peso específico sea menor que el del agua. Esta etapa se lleva a cabo mediante condiciones de reposo, para que los sólidos cuya densidad es menor que la del agua, asciendan a la superficie de la unidad de donde son retirados por desnatado para darle una disposición final adecuada. Dentro del tanque se colocan mamparas para evitar la turbulencia dentro del mismo.

La entrada del líquido en el equipo debe encontrarse entre 15-20 cm por debajo del nivel del agua, con el fin de no producir emulsiones de las grasas ya separadas que se encuentran en la superficie de la unidad, y la salida próxima al fondo por el lado opuesto; de tal forma que el recorrido del agua sea de arriba



hacia abajo, mientras que las gotas de grasa y aceite, al ser menos densas que el agua, se desplazarán hacia arriba, quedando retenidas en la superficie.

En la figura 27 se observa el porcentaje de remoción de grasas y aceites en función del tiempo con un comportamiento ascendente hasta mantenerse constante a partir de los 35 min. Para el dimensionamiento del tanque separador de grasas y aceites se utilizó como base el caudal máximo  $26,87 \text{ m}^3/\text{h}$ , el tiempo de retención obtenido en los ensayos de laboratorio, dando como resultado un volumen de  $15,67 \text{ m}^3$ .

Se deberá realizar un mantenimiento semanal y anualmente. En el mantenimiento semanal se deberán drenar las grasas y aceites acumulados en la parte superior del tanque. En el mantenimiento anual se realizará una limpieza interna y externa del tanque para evitar un deterioro del mismo.

### **5.2.2. Homogenización de caudal**

La regulación del flujo de agua que llega a la planta depuradora consiste en la laminación de los picos de caudal, de tal forma que la instalación de depuración trabaje con un caudal constante, lo que lleva consigo un incremento de la eficiencia de los diferentes procesos y operaciones unitarias que la componen. Básicamente, el proceso de regulación del caudal consiste en un tanque de volumen adecuado donde tiene lugar la acumulación del exceso de agua cuando el caudal de llegada es mayor que el caudal medio, y de donde se extrae cuando el caudal de llegada a la planta es menor que el medio

En la figura 28 se observa la curva de caudal de afluente del proceso de manufactura de envases de aluminio, se midieron horas de alto y bajo caudal, este no era constante. Se identificó el caudal mínimo  $2,77 \text{ m}^3/\text{h}$ , medio  $12,70$

m<sup>3</sup>/h, máximo 26,87 m<sup>3</sup>/h. En la figura 29 se representó la diferencia entre el volumen alimentado en cada hora, menos el volumen medio extraído cada hora, con el fin de determinar la capacidad máxima de almacenamiento del tanque.

Se deberá realizar un mantenimiento anual para realizar una limpieza externa del tanque para evitar el deterioro del mismo.

### **5.2.3. Neutralización**

Se debe ajustar los valores del pH del agua residual industrial para mejorar la eficiencia de los procesos posteriores y para poder ser vertidos en el cuerpo receptor. En la tabla VIII se observa el valor de pH del afluente el cual es de 3,69, un pH ácido por lo cual se neutralizará con una base fuerte. En la figura 31 se observa la curva de neutralización del afluente, el pH del agua en función de los litros de NaOH aplicado por m<sup>3</sup> de agua tratada. El intervalo de pH de 7 a 8 se obtiene con 13 L NaOH/m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O. A partir de ello se estableció el volumen mínimo del reactor CSTR de 1,06 m<sup>3</sup>, un tiempo de retención de 5 min, reactivo utilizado hidróxido de sodio al 40 % dosificando 165,1 L/h.

Por tratarse la neutralización de una reacción química, el proceso tiene lugar de forma muy rápida, precisándose unos tiempos de retención mínimos, ahora y siempre que se disponga de una agitación enérgica que permita que el reactivo y el agua residual entren en contacto en el menor tiempo posible.

### **5.2.4. Coagulación**

El proceso de coagulación es la reacción química que tiene lugar por la adición de determinados productos químicos a una dispersión coloidal, produciendo una desestabilización de las partículas coloidales o emulsionadas,

mediante la neutralización de las cargas eléctricas que tienden a mantenerlas separadas.

Se realizó una prueba de jarras para determinar el reactivo y dosis óptimas para obtener el mayor porcentaje de remoción de color. En la figura 33 se observa la comparación entre 3 coagulantes: sulfato de aluminio, cloruro férrico y policloruro de aluminio. Con el que se obtuvo mayor remoción de color fue con el policloruro de aluminio obteniendo un 51 % aplicando 100 mg/L de reactivo. El tiempo de retención óptimo obtenido a partir de la prueba de jarras es de 5 min, para lo cual se determinó un volumen del reactor mínimo de 1,06m<sup>3</sup>.

Debido a que las partículas formadas en el proceso de coagulación son de un tamaño muy pequeño, su decantación va a ser muy difícil debido a las bajas velocidades de decantación que necesitan y a la resistencia que se origina a su paso a través de la masa de agua, siendo necesario su reagrupación en otras de mayor tamaño.

#### **5.2.5. Floculación**

Para mejorar de forma notable la formación de flóculos se realiza la dosificación de floculante, siendo estos polielectrolitos orgánicos, consistentes en polímeros de alto peso molecular y larga cadena que fijan las partículas sólidas, formando unas nuevas partículas de mayor tamaño, compactas y fácilmente decantables. La floculación, al no ser una reacción química, tiene lugar en una agitación moderada que no destruye los flóculos ya formados, pero que ponga en contacto las partículas con el reactivo y mantenga los sólidos en suspensión.

Se realizó una prueba de jarras para determinar el reactivo y dosis óptimas para obtener el mayor porcentaje de remoción de color. Para ellos se utilizaron

combinaciones de dosis de los 3 coagulantes con variaciones de dosis de floculante.

En la figura 35 se observa el porcentaje de remoción de color utilizando el floculante con el sulfato de aluminio, los valores máximos se obtuvieron con 150 mg/L de coagulante y 10 mg/L de floculante, el cual fue de 65 %. En la figura 36 se observa el porcentaje de remoción de color, utilizando el floculante con el cloruro férrico, los valores máximos se obtuvieron con 50 mg/L de coagulante y 10 mg/L de floculante el cual fue de 71 %. En la figura 37 se observa el porcentaje de remoción de color utilizando el floculante con el policloruro de aluminio como coagulante, los valores máximos se obtuvieron con 100 mg/L de coagulante y 10 mg/L de floculante el cual fue 86 %.

En la tabla XVII se encuentra establecido el mejor resultado obtenido de remoción de color, esto es con la combinación de policloruro de aluminio (100 mg/L) y el polímero aniónico (10 mg/L). El tiempo de retención óptimo obtenido a partir de la prueba de jarras es de 20 min, para lo cual se determinó un volumen del reactor mínimo de 4,23 m<sup>3</sup>.

Se debe realizar un mantenimiento anual de limpieza externa e interna de los reactores de neutralización coagulación y floculación para evitar el deterioro de los mismos.

#### **5.2.6. Sedimentación**

El objetivo del proceso de decantación es la eliminación de los sólidos en suspensión presentes en un agua residual, obteniéndose un líquido claro sobrenadante en la superficie del equipo y unos sólidos que son extraídos en

forma de fangos o lodos. Las purgas de lodos suelen realizarse intermitentemente.

A partir de la figura 39 se observa el comportamiento de la remoción de sólidos suspendidos en el agua residual en función del tiempo de residencia del agua en el tanque. El gráfico tiene un comportamiento ascendente hasta llegar a 35 minutos en donde los sólidos suspendidos no variaron en función del tiempo, obteniendo como resultado una remoción de sólidos del 77 %. A partir de ello se estableció el volumen mínimo del tanque sedimentador de  $6,35 \text{ m}^3$ , un tiempo de retención de 35 min.

La entrada de líquido a tratar debe realizarse transversalmente al tanque por medio de vertedero, para que se distribuya el agua de forma regular a lo largo de toda la sección, con el fin de no producir zonas muertas de trabajo, lo que llevaría consigo una disminución en el rendimiento de la unidad.

Se debe realizar un mantenimiento anual de limpieza externa e interna del tanque sedimentador por la solidificación de lodos en el fondo del tanque.

### **5.2.7. Espesador de lodos**

De la sedimentación llevada a cabo en el proceso anterior se obtienen lodos primarios con gran contenido de humedad, por lo cual para descartar estos lodos se debe reducir la humedad para ser transportada al ente encargado de su desecho. A partir de las pruebas de sedimentación se determinó que del agua tratada se obtiene un 40 % de lodos por lo cual el caudal se reduce  $5,1 \text{ m}^3/\text{h}$ . Para un tiempo de retención de 24 horas se debe dimensionar el tanque con una capacidad de  $124,8 \text{ m}^3$ .

### **5.2.8. Deshidratación de lodos**

En la figura 40 se encuentra descrito un filtro tornillo el cual trabaja en continuo. Este filtro deshidrata lodos que fueron espesados previamente en el tanque espesador de lodos, con una concentración de sólidos en la entrada de  $5 \text{ kg/m}^3$ .

### **5.2.9. Diagrama de equipo**

El afluente proviene de las estaciones de lavado e ingresa en la fosa de captación de agua residual industrial cruda. Esta agua es bombeada hacia el tanque separador de grasas y aceites, pasa por el tanque y es depositada en una fosa de captación de agua residual sin grasas y aceites. El agua es bombeada hacia el tanque de homogenización de caudal. El tanque separador de grasas y aceites es previo al tanque de homogenización de caudal para prevenir la separación de fases en este tanque. Posteriormente el agua es bombeada hacia el tren de reactores, iniciando por el reactor de neutralización, coagulación y floculación. El desplazamiento del agua entre estos reactores es por gravedad. Posteriormente, el agua ingresa al sedimentador en el cual se divide en dos flujos, agua clara y lodos. El agua clara es vertida en el cuerpo receptor correspondiente. Por otro lado, los lodos ingresan a un tanque espesado por gravedad, luego son deshidratados por un filtro tornillo y finalmente son descartados por un depurador externo.

En el diagrama de equipo así mismo se establecen los equipos auxiliares para el correcto funcionamiento del proceso de tratamiento. Al inicio del proceso en el tanque separador de grasas y aceites se estableció una descarga secundaria de las grasas y aceites extraídos del agua. En la etapa de tratamiento se encuentran los tanques de reactivos utilizados en el reactor de neutralización

y coagulación, estos reactivos son dosificados mediante una bomba dosificadora de químicos. El tanque para la preparación de floculante es un tren de reactores ya que debe tener constante agitación para su correcto funcionamiento al momento de ser dosificado en el tanque de floculación.

En los equipos en los cuales se utiliza una bomba a la entrada o salida para desplazar el agua se tienen dos bombas. Una de ellas funciona y la otra está en modo de espera para entrar en funcionamiento cuando la primera se pone de fuera de línea para realizarle su respectivo mantenimiento.





## CONCLUSIONES

1. El pH de las aguas residuales industriales descargadas por una industria de fabricación de envases de aluminio es de 3,69 por lo que está fuera de los límites máximos permisibles según el decreto 236-2006.
2. La concentración de grasas y aceites de las aguas residuales industriales descargadas por una industria de fabricación de envases de aluminio es de 350mg/L por lo que está fuera de los límites máximos permisibles según el decreto 236-2006.
3. La concentración de sólidos suspendidos de las aguas residuales industriales descargadas por una industria de fabricación de envases de aluminio es de 1 476 mg/L por lo que está fuera de los límites máximos permisibles según el decreto 236-2006.
4. La concentración de la demanda bioquímica de oxígeno de las aguas residuales industriales descargadas por una industria de fabricación de envases de aluminio es de 1 660 mg/L por lo que está fuera de los límites máximos permisibles según el decreto 236-2006.
5. El caudal del afluente de las aguas residuales industriales descargadas por una industria de fabricación de envases de aluminio es mínimo 2,77 m<sup>3</sup>/h, medio 12,70 m<sup>3</sup>/h, máximo 26,87 m<sup>3</sup>/h.
6. El mayor porcentaje de remoción de grasas y aceites en el tanque de separación de grasas y aceites es de 82,22 % con un tiempo de retención

de 35 minutos para un proceso de tratamiento de aguas residuales de una industria de fabricación de envases de aluminio.

7. El volumen del tanque separador de grasas y aceites debe ser de  $15,67 \text{ m}^3$  para un caudal máximo de  $26,87 \text{ m}^3/\text{h}$  y un tiempo de retención de 35 minutos para un proceso de tratamiento de aguas residuales de una industria de fabricación de envases de aluminio.
8. El volumen mínimo del tanque de homogenización de caudal debe ser de  $57,65 \text{ m}^3$  para un caudal medio de salida de  $12,70 \text{ m}^3/\text{h}$  para un proceso de tratamiento de aguas residuales de una industria de fabricación de envases de aluminio.
9. El volumen mínimo del reactor de neutralización debe ser de  $1,06 \text{ m}^3$  para un caudal de  $12,70 \text{ m}^3/\text{h}$  y un tiempo de retención de 5 min para un proceso de tratamiento de aguas residuales de una industria de fabricación de envases de aluminio.
10. El mayor porcentaje de remoción de color en el proceso de coagulación fue de 51 % utilizando como coagulante policloruro de aluminio con una dosis de  $100 \text{ mg/L}$ .
11. El volumen mínimo del reactor de coagulación debe ser de  $1,06 \text{ m}^3$  para un caudal de  $12,70 \text{ m}^3/\text{h}$  y un tiempo de retención de 5 min para un proceso de tratamiento de aguas residuales de una industria de fabricación de envases de aluminio.

12. El mayor porcentaje de remoción de color en el proceso de floculación fue de 86 % utilizando como coagulante policloruro de aluminio con una dosis de 100 mg/L para y un floculante aniónico aplicando una dosis de 10 mg/L.
13. El volumen mínimo del reactor de floculación debe ser de 4,23 m<sup>3</sup> para un caudal de 12,70 m<sup>3</sup>/h y un tiempo de retención de 20 min para un proceso de tratamiento de aguas residuales de una industria de fabricación de envases de aluminio.
14. El volumen mínimo del tanque de sedimentación debe ser de 6,35 m<sup>3</sup> para un caudal de 12,70 m<sup>3</sup>/h y un tiempo de retención de 35 min para un proceso de tratamiento de aguas residuales de una industria de fabricación de envases de aluminio.
15. El volumen mínimo del tanque espesador de lodos debe ser de 124,8 m<sup>3</sup> para un caudal de 5,20 m<sup>3</sup>/h y un tiempo de retención de 24 horas min para un proceso de tratamiento de aguas residuales de una industria de fabricación de envases de aluminio.



## RECOMENDACIONES

1. Según los resultados de la tabla XXII, los parámetros de sólidos suspendidos y DBO no cumplen; por lo tanto, es conveniente colocar un filtro a la salida del sedimentador primario para eliminar los sólidos suspendidos que puedan salir de este proceso.
2. Sobredimensionar los equipos un 15 % del volumen teórico obtenido por cálculo como margen de seguridad por aumento en el caudal del efluente.
3. Las alimentaciones y salidas de todos los tanques deben situarse en posiciones opuestas para obtener mezclas homogéneas dentro de ellos.
4. Realizar las tareas de mantenimiento en tiempo y forma a los equipos con el fin de asegurar su buen funcionamiento y aumentar su vida de uso.
5. Medir constantemente la dosificación de reactivos de las bombas para eficientizar el proceso de tratamiento de aguas residuales.
6. Realizar análisis de las aguas residuales como mínimo 2 veces al año para determinar el cumplimiento con los parámetros establecidos en el Reglamento de las Descargas y Reúso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos, Acuerdo Gubernativo 236-2006.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. Acuerdo Gubernativo No.236-2006, *Reglamento de las Descargas y Reúso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos*, Diario de Centro América, Guatemala, 5 de mayo de 2006. 24 p.
2. AGUILAR, M.I. *Tratamiento Físicoquímico de Aguas Residuales: Coagulación-Floculación*. 1a ed. España: FG Graf. S.L., 2002. 151 p.
3. American Public Health Association. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22a ed. Estados Unidos: APHA, AWWA, WWCF, 2012. 1220 p.
4. BAILEY, Alton Edward. *Industrial Oil and Fat products*. 2a ed. New York, United States: Interscience Publishers, 2010. 841 p.
5. BAKER, R.W. *Membrane Technology and Applications*. United Kingdom: Wiley & Sons, Ltd, 2004. 538 p.
6. DOMENECH, Xavier. *Química Ambiental de Sistemas Terrestres*. 1a ed. España: Editorial Reverté, S. A, 2006. 256 p.
7. METCALF & EDDY. *Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, Vertido y Reutilización*. 3a ed. Estados Unidos: Editorial McGraw-Hill, S. A, 1995. 528 p.

8. LONDOÑO, Adela. *Métodos Analíticos para la Evaluación de la Calidad Fisicoquímica del Agua*. 1a ed. Colombia: Editorial Blanecolor Ltda., 2010. 149 p.
9. RAMALHO, R.S. *Tratamiento de aguas residuales*. 2a ed. Canadá: Editorial Reverté, S.A, 1996. 708 p.
10. RIGOLA, Miguel. *Tratamiento de aguas industriales: Aguas de proceso y residuales*. 1a ed. España: Marcombo Boicareu Editores, 1990. 160 p.
11. SAINZ, Juan Antonio. *Tecnologías para la sostenibilidad: Procesos y operaciones unitarias en depuración de aguas residuales*. 1a ed. España: Fundación EOI, 2005. 416 p.



## APÉNDICES

Apéndice 1. **Concentración y remoción de grasas y aceites en función del tiempo.**

Corrida No. Tiempo (min)	Grasas y Aceites (mg/l)						Remoción de grasas y aceites (%)					
	1	2	3	4	5	Promedio	1	2	3	4	5	Promedio
5	43	42	42	41	43	42	4 %	7 %	7 %	9 %	4 %	6 %
10	39	38	39	40	42	40	13 %	16 %	13 %	11 %	7 %	12 %
15	33	32	33	32	32	32	27 %	29 %	27 %	29 %	29 %	28 %
20	27	25	26	25	26	26	40 %	44 %	42 %	44 %	42 %	43 %
25	19	20	18	20	21	20	58 %	56 %	60 %	56 %	53 %	56 %
30	15	16	14	14	13	14	67 %	64 %	69 %	69 %	71 %	68 %
35	7	8	8	7	8	8	84 %	82 %	82 %	84 %	82 %	83 %
40	7	8	8	7	8	8	84 %	82 %	82 %	84 %	82 %	83 %
45	7	8	8	7	8	8	84 %	82 %	82 %	84 %	82 %	83 %

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Caudal de una industria de fabricación de envases de aluminio

<b>Hora</b>	<b>Caudal (m3/h)</b>	<b>Hora</b>	<b>Caudal (m3/h)</b>	<b>Hora</b>	<b>Caudal (m3/h)</b>
6:00	12,37	14:00	36,43	22:00	7,87
6:30	24,67	14:30	11,59	22:30	6,21
7:00	2,46	15:00	12,54	23:00	12,42
7:30	11,29	15:30	5,38	23:30	4,97
8:00	4,51	16:00	39,90	0:00	6,21
8:30	10,67	16:30	4,14	0:30	3,31
9:00	2,26	17:00	39,25	1:00	7,45
9:30	7,80	17:30	6,21	1:30	2,07
10:00	2,05	18:00	3,31	2:00	4,97
10:30	18,47	18:30	2,07	2:30	5,80
11:00	17,44	19:00	3,73	3:00	4,14
11:30	22,57	19:30	4,14	3:30	4,97
12:00	5,75	20:00	6,21	4:00	3,73
12:30	6,57	20:30	4,97	4:30	4,14
13:00	3,28	21:00	6,62	5:00	2,90
13:30	8,62	21:30	7,45	5:30	4,14

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 3. Diferencial de volumen acumulado y volumen extraído del tanque de homogenización de caudal.**

<b>Hora</b>	<b>Intervalo tiempo (h)</b>	<b>Caudal (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Volumen acumulado (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volumen extraído (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Diferencial (m<sup>3</sup>)</b>
6:00	1	18,52	18,52	12,63	5,89
7:00	2	6,87	25,39	25,27	0,13
8:00	3	13,00	38,39	37,9	0,49
9:00	4	12,67	51,06	50,54	0,53
10:00	5	17,23	68,29	63,17	5,12
11:00	6	24,78	93,07	75,8	17,27
12:00	7	26,87	119,94	88,44	31,51
13:00	8	5,95	125,89	101,07	24,82
14:00	9	25,88	151,77	113,71	38,07
15:00	10	4,44	156,22	126,34	29,88
16:00	11	25,32	181,54	138,97	42,56
17:00	12	23,55	205,09	151,61	53,48
18:00	13	4,78	209,87	164,24	45,63
19:00	14	24,66	234,53	176,88	57,65
20:00	15	2,77	237,3	189,51	47,79
21:00	16	19,00	256,3	202,14	54,15
22:00	17	3,49	259,79	214,78	45,01
23:00	18	4,31	264,09	227,41	36,68
0:00	19	5,34	269,43	240,04	29,39
1:00	20	5,78	275,21	252,68	22,54
2:00	21	5,12	280,33	265,31	15,02
3:00	22	6,88	287,21	277,95	9,27
4:00	23	10,33	297,54	290,58	6,96
5:00	24	5,67	303,21	303,21	0

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 4. Volumen utilizado en la curva de neutralización de las aguas residuales industriales de una industria de fabricación de envases de aluminio.**

<b>V (L)</b>	<b>pH</b>
0	4,13
1	4,3
2	4,6
3	4,8
4	4,9
5	5
6	5,2
7	5,3
8	5,7
9	6
10	6,2
11	6,4
12	6,5
13	6,6
14	9,08
15	9,23
16	9,69
17	10,23
18	11,45
19	12,8
20	13,4

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 5. Color en función de la concentración de coagulante: sulfato de aluminio, cloruro férrico y policloruro de aluminio determinado en prueba de jarras.**

<b>Coagulante</b>	<b>Muestra</b>	<b>0 (mg/L)</b>	<b>50 (mg/L)</b>	<b>100 (mg/L)</b>	<b>150 (mg/L)</b>	<b>200 (mg/L)</b>
Sulfato de aluminio	1	429	310	268	232	240
	2	656	452	387	368	360
	3	456	314	281	262	280
	4	645	429	362	352	350
	5	550	398	322	298	350
	X	547	380	324	302	316
	% Remoción	0 %	31 %	41 %	45 %	42 %
Cloruro férrico	1	429	386	423	452	589
	2	656	492	560	619	689
	3	456	307	368	437	598
	4	645	498	523	598	692
	5	550	419	466	501	547
	X	547	420	468	521	623
	% Remoción	0 %	23 %	14 %	5 %	-14 %
Policloruro de aluminio	1	429	208	189	202	195
	2	656	389	320	337	324
	3	456	204	189	203	199
	4	645	365	342	345	342
	5	550	325	305	325	321
	X	547	298	269	282	276
	% Remoción	0 %	46 %	51 %	48 %	50 %

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 6. Color en función de la concentración de floculante y coagulante:  
sulfato de aluminio, cloruro férrico y policloruro de aluminio  
determinado en prueba de jarras.**

Coagulante	C (mg/L)	Floculante								
		0 (mg/L)	5 (mg/L)	% Remoción	10 (mg/L)	% Remoción	15 (mg/L)	% Remoción	20 (mg/L)	% Remoción
Sulfato de aluminio	50	380	138	64 %	154	59 %	146	62 %	138	64 %
	100	324	154	52 %	170	47 %	170	47 %	154	52 %
	150	302	138	54 %	114	65 %	122	60 %	138	54 %
	200	316	138	56 %	138	57 %	114	64 %	130	59 %
Cloruro férrico	50	420	130	69 %	122	71 %	146	65 %	146	65 %
	100	468	211	55 %	252	46 %	235	50 %	276	41 %
	150	521	250	52 %	350	33 %	503	3 %	462	11 %
	200	623	316	49 %	398	36 %	357	43 %	373	40 %
Policloruro de aluminio	50	298	92	69 %	73	76 %	64	78 %	52	83 %
	100	269	52	81 %	39	86 %	48	82 %	62	77 %
	150	282	47	83 %	42	85 %	43	85 %	44	84 %
	200	276	45	84 %	43	84 %	48	83 %	49	82 %

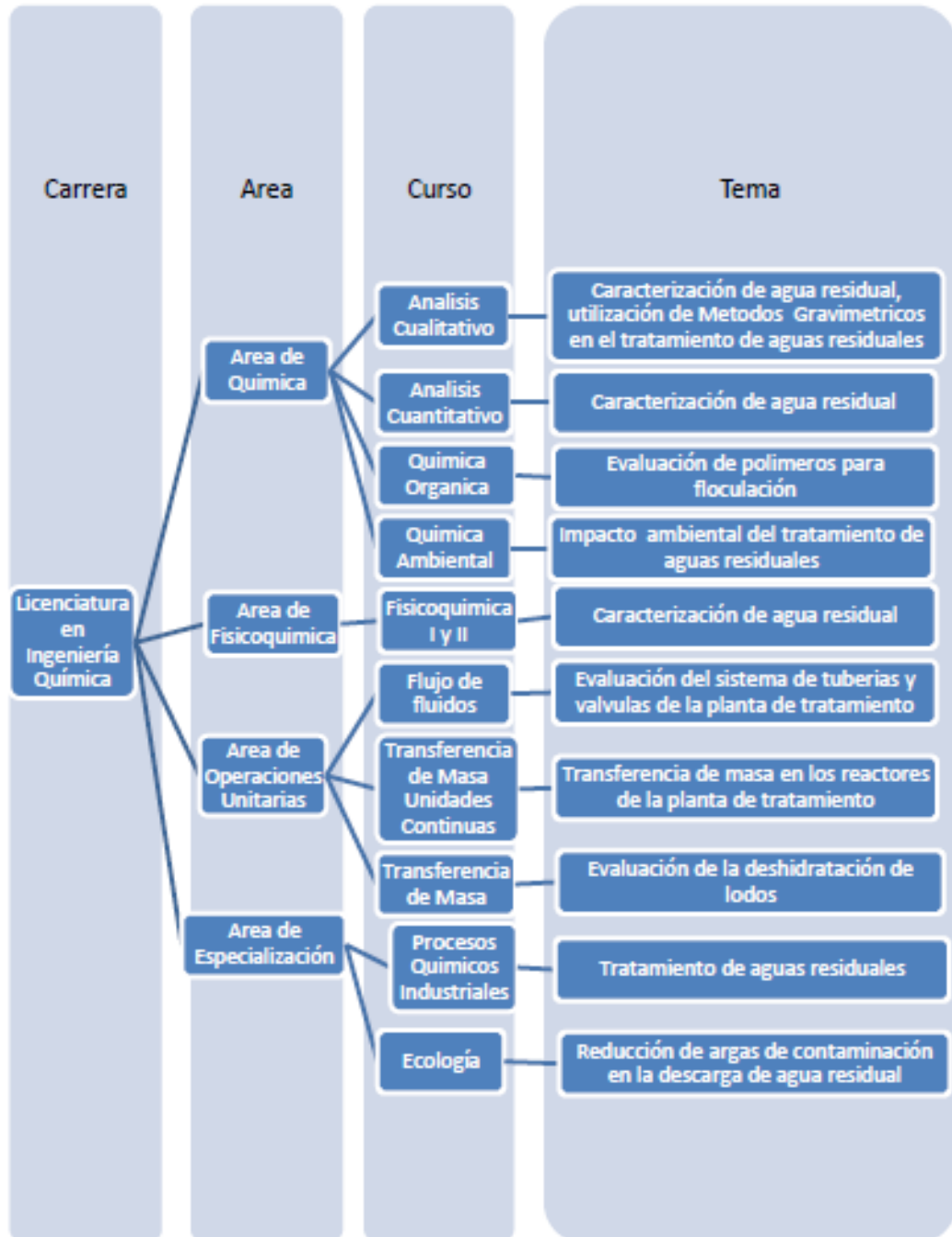
Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 7. Porcentaje de remoción de sólidos suspendidos en función del tiempo.**

Tiempo (min)	Sólidos suspendidos (mg/L)						% Remoción de sólidos					
	1	2	3	4	5	x	1	2	3	4	5	x
Corrida												
0	1 476	1 432	1 498	1 457	1 517	1 476	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
5	1 234	1 298	1 276	1 239	1 232	1 255.8	16 %	12 %	14 %	16 %	17 %	15 %
10	1 020	1 035	1 003	1 092	1 093	1 048.6	31 %	30 %	32 %	26 %	26 %	29 %
15	938	904	895	978	856	914.2	36 %	39 %	39 %	34 %	42 %	38 %
20	789	873	784	846	765	811.4	47 %	41 %	47 %	43 %	48 %	45 %
25	567	675	534	721	564	612.2	62 %	54 %	64 %	51 %	62 %	59 %
30	459	502	456	684	456	511.4	69 %	66%	69 %	54 %	69 %	65 %
35	328	367	352	314	354	343	78 %	75%	76%	79%	76 %	77 %
40	302	367	352	310	352	336.6	80 %	75%	76%	79%	76 %	77 %
45	302	360	350	309	350	334.2	80%	76%	76%	79%	76 %	77 %

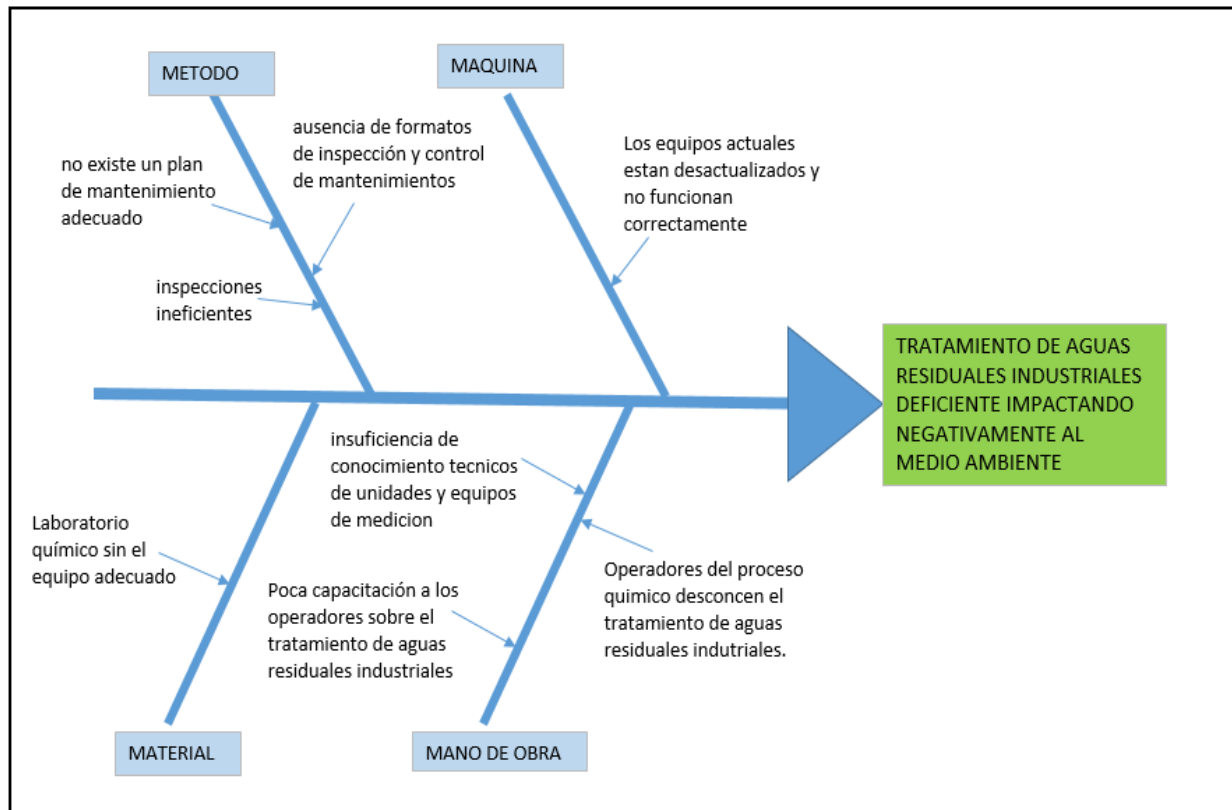
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Tabla de requisitos académicos**



Fuente: elaboración propia

Apéndice 9. Diagrama de Ishikawa para el tratamiento de aguas residuales industriales de una industria de fabricación de envases de aluminio.



Fuente: elaboración propia