



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

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES PROVENIENTES DEL ÁREA DE LAVADO DE RECIPIENTES DE
PRODUCTOS AGROQUÍMICOS DE UNA INDUSTRIA DE EXPORTACIÓN DE SEMILLAS**

Luis Carlos Perdomo Hernández

Asesorado por el Ing. Luis Rodolfo Castro García

Guatemala, abril de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES PROVENIENTES DEL ÁREA DE LAVADO DE RECIPIENTES DE
PRODUCTOS AGROQUÍMICOS DE UNA INDUSTRIA DE EXPORTACIÓN DE SEMILLAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

LUIS CARLOS PERDOMO HERNÁNDEZ
ASESORADO POR EL ING. LUIS RODOLFO CASTRO GARCÍA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, ABRIL DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

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

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
EXAMINADOR	Ing. César Alfonso García Guerra
EXAMINADOR	Ing. Estuardo Edmundo Monroy Benítez
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:

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES PROVENIENTES DEL ÁREA DE LAVADO DE RECIPIENTES DE
PRODUCTOS AGROQUÍMICOS DE UNA INDUSTRIA DE EXPORTACIÓN DE SEMILLAS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 4 de febrero de 2020.

Luis Carlos Perdomo Hernández

Guatemala 30 de Octubre de 2020


Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Universidad de San Carlos de Guatemala.
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Le saludo cordialmente, deseándole éxitos en sus actividades. Por medio de la presente hago constar que he revisado y aprobado el Informe Final del trabajo de graduación titulado: "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL ÁREA DE LAVADO DE RECIPIENTES DE PRODUCTOS AGROQUÍMICOS DE UNA INDUSTRIA DE EXPORTACIÓN DE SEMILLAS", elaborado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Química, Luis Carlos Perdomo Hernández, quien se identifica con el registro académico 2012-13157 y con el CUI 2532 69598 0101.

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

Atentamente,



Luis Rodolfo Castro García
INGENIERO QUÍMICO
MAESTRO EN INGENIERÍA SANITARIA
COLEGIADO No. 1591

Luis Rodolfo Castro García
ASESOR

Ingeniero Químico,
Colegiado activo no. 1591



Guatemala, 03 de noviembre de 2020.
Ref. EIQ.TG-IF.040.2020.

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

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **073-2019**, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL

Solicitado por el estudiante universitario: **Luis Carlos Perdomo Hernández.**

Identificado con número de carné: **2532695980101.**

Identificado con registro académico: **201213157.**

Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Química.**

En la modalidad: **Informe Final, Seminario de Investigación.**

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

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL ÁREA DE LAVADO DE RECIPIENTES DE PRODUCTOS AGROQUÍMICOS DE UNA INDUSTRIA DE EXPORTACIÓN DE SEMILLAS

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

Luis Rodolfo Castro García, profesional de la Ingeniería Química

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

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Ana Rufina

ANA RUFINA HERRERA SOTO
INGENIERA QUIMICA
COL. 2161

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

C.c.: archivo



Guatemala, 22 de abril de 2021.
Ref. EIQ.062.2021

Aprobación del informe final del trabajo de graduación

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

Revisado el INFORME FINAL DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN (TESIS), DENOMINADO **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL ÁREA DE LAVADO DE RECIPIENTES DE PRODUCTOS AGROQUÍMICOS DE UNA INDUSTRIA DE EXPORTACIÓN DE SEMILLAS** del(la) estudiante Luis Carlos Perdomo Hernández, se conceptúa que el documento presentado, reúne todas las condiciones de calidad en materia administrativa y académica (rigor, pertinencia, secuencia y coherencia metodológica), por lo tanto, se procede a la autorización del mismo, para que el(la) estudiante pueda optar al título de Ingeniería Química.

“Id y Enseñad a Todos”




Ing. Williams G. Álvarez Mejía, I.Q., U.I.E.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

Cc. Archivo
WGAM/mpea



Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Arquitectura y de Ingeniería



Formando Ingenieros Químicos en Guatemala desde 1939

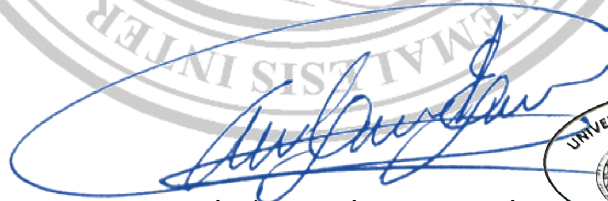


**NO SALGAS
QUÉDATE EN
CASA**

DTG. 188.2021.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL ÁREA DE LAVADO DE RECIPIENTES DE PRODUCTOS AGROQUÍMICOS DE UNA INDUSTRIA DE EXPORTACIÓN DE SEMILLAS**, presentado por el estudiante universitario: **Luis Carlos Perdomo Hernández**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, abril de 2021.

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Todo se lo debo a Él.
Mis padres	Erick Renato Perdomo López y Carolina Elizabeth Hernández Molina, por su apoyo, paciencia y amor.
Mi novia	Melissa Martínez, por haberme acompañado y apoyado en este proceso.
Mis abuelos maternos	Ernesto Hernández (q. e. p. d) y Adoración Molina (q. e. p. d).
Mis abuelos paternos	Mario Perdomo (q. e. p. d) y Marta Julia López.
Mis tíos	Iris Perdomo, Borneo Perdomo, Mónica Arriola, Ernesto Hernández y Waleska Murga.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por haberme amado y regalado salvación. Hasta aquí su mano me ha sostenido.
Mis padres	Renato Perdomo y Carolina Hernández, por su apoyo para alcanzar esta meta.
Mi novia	Melissa Martínez, por su ayuda y cariño.
Mi asesor	Ing. Luis Rodolfo Castro García, por el apoyo en la realización de este proyecto.
Mi revisora	Ing. Ana Herrera. Por el tiempo dedicado a la revisión de este proyecto.
Ingeniería Sanitaria y Ambiental	Por haberme recibido como un miembro más de su equipo.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por enseñarme a ser perseverante, paciente y no darme por vencido.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
HIPÓTESIS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. MARCO CONCEPTUAL.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación	2
1.3. Determinación del problema.....	2
1.3.1. Definición	2
1.3.2. Delimitación	3
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. El agua	5
2.2. Aguas residuales	5
2.2.1. Aguas residuales ordinarias.....	5
2.2.2. Aguas residuales industriales	6
2.2.3. Aguas residuales analizadas	6
2.3. Tratamiento de aguas residuales	6
2.3.1. Etapas del tratamiento de aguas residuales.....	7
2.3.2. Desbaste.....	7
2.3.3. Tamizado.....	7

2.3.4.	Homogeneización.....	8
2.3.5.	Sedimentación.....	8
2.3.6.	Neutralización.....	8
2.3.7.	Coagulación-Floculación	8
2.3.8.	Tratamiento con carbón activado granular	9
2.4.	Evaluación de la calidad del agua residual	9
2.4.1.	Parámetros químicos del agua.....	9
2.4.1.1.	Nitrógeno.....	9
2.4.1.2.	Fósforo	10
2.4.1.3.	Demanda química de oxígeno.....	10
2.4.1.4.	Demanda bioquímica de oxígeno.....	10
2.4.1.5.	Aceites y grasas.....	11
2.4.1.6.	Metales pesados	11
2.4.1.7.	Potencial de hidrógeno.....	11
2.4.2.	Parámetros físicos.....	11
2.4.2.1.	Temperatura.....	12
2.4.2.2.	Sólidos sedimentables	12
2.4.2.3.	Sólidos totales	12
2.5.	Parámetros del agua residual en Guatemala	12
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	15
3.1.	Variables	15
3.2.	Recursos humanos disponibles	15
3.3.	Recursos materiales disponibles (equipo, cristalería, reactivos).....	15
3.4.	Técnica cuantitativa.....	16
3.5.	Recolección y ordenamiento de la información.....	16
3.6.	Plan de análisis de los resultados	17
3.7.	Análisis estadístico.....	18

4.	RESULTADOS	21
4.1.	Criterios de diseño.....	21
4.2.	Descripción del sistema de tratamiento para aguas residuales	22
4.3.	Caracterización de parámetros fisicoquímicos del agua cruda.....	24
4.4.	Caracterización de parámetros fisicoquímicos del agua tratada	26
4.5.	Resultados de análisis estadístico.....	32
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	33
	CONCLUSIONES	37
	RECOMENDACIONES	39
	BIBLIOGRAFÍA.....	41
	APÉNDICES	43

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Sistema de tratamiento fisicoquímico	23
2.	Comparación de DQO de agua cruda versus DQO de agua tratada.....	29
3.	Comparación de grasas y aceites agua cruda vs grasas y aceites agua tratada	30
4.	Comparación de fósforo total de agua cruda versus fósforo total de agua tratada	30
5.	Comparación de nitrógeno total de agua cruda versus nitrógeno total de agua tratada	31
6.	Comparación de pH de agua cruda versus pH de agua tratada.....	31
7.	Diferencia de DQO entre muestras	32

TABLAS

I.	Límites máximos permisibles de descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, etapa cuatro	13
II.	Especificaciones de la planta de tratamiento fisicoquímica.....	22
III.	Caracterización fisicoquímica del agua cruda	24
IV.	DQO de agua cruda	25
V.	DBO ₅ de agua cruda	25
VI.	Caracterización fisicoquímica del agua tratada	26
VII.	DQO de agua tratada	27
VIII.	DBO ₅ de agua tratada	27
IX.	Parámetros fisicoquímicos de agua cruda versus los de agua tratada.....	28

X.	Comparación de DQO de agua cruda versus DQO de agua tratada	29
XI.	Análisis estadístico.....	32

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
°C	Grados Centígrados
h	Horas
kg	Kilogramo
L	Litro
m	Metro
mg	Miligramo
mL	Mililitro
s	Segundo

GLOSARIO

Afluente	Agua que ingresa al sistema de tratamiento de aguas residuales.
Agua clara	Agua tratada sin sólidos en suspensión y con un color menor al inicial.
Agua cruda	Nombre que recibe el agua que no ha recibido ningún tipo de tratamiento.
Agua tratada	Nombre que recibe el agua residual que ha pasado por operaciones unitarias de remoción de contaminantes.
Biodegradabilidad	Un agua se considera biodegradable cuando su relación DQO/DBO ₅ es menor a dos; parcialmente biodegradable cuando dicha relación es de 2 a 5 y no biodegradable cuando es mayor a 5.
Bomba centrífuga	Bomba utilizada para desplazar líquidos que transforma la energía mecánica en energía cinética.
Bomba peristáltica	Bomba de desplazamiento positivo utilizada para desplazar una variedad de fluidos (incluidos fluidos de alta viscosidad).

CAG	Carbón Activado Granular.
Caudal	Volumen de fluido que se desplaza en un tiempo determinado.
Efluente	Agua que egresa del sistema de tratamiento de aguas residuales.
Ente generador	Persona individual o jurídica, pública o privada, responsable de generar o administrar aguas residuales de tipo especial, ordinario o mezcla de ambas, y cuyo efluente final se descarga a un cuerpo receptor.
Homogeneización	Proceso físico utilizado para hacer que una mezcla tenga las mismas propiedades en cualquier punto.
HP	Caballo de fuerza (por sus siglas en inglés).
Ppm	Partes por millón.
Válvula de bola	Dispositivo utilizado para regular el caudal.

RESUMEN

Se diseñó e implementó un sistema de tratamiento para el efluente proveniente del lavado de recipientes que contienen productos agroquímicos, de una empresa exportadora de semillas en Guatemala. El diseño se realizó con la finalidad de que el agua tratada cumpliera con los parámetros establecidos en el Acuerdo Gubernativo 236-2006: *Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos*. De esta manera el agua tratada podría ser retornada a un cuerpo receptor, disminuyendo su potencial impacto ambiental.

El proyecto se desarrolló en tres fases. En la fase de investigación se recopiló la información necesaria respecto al efluente de aguas residuales provenientes del lavado de recipientes con agroquímicos. En la fase de servicio se propuso un sistema de tratamiento de aguas residuales especiales considerando: homogeneización, coagulación, floculación, sedimentación y filtración.

En la fase de implementación se realizó la instalación del sistema de tratamiento de aguas residuales y se realizó una caracterización fisicoquímica del agua cruda y del agua tratada para verificar el funcionamiento del sistema y asegurar que los parámetros del agua residual se encuentran dentro de los límites permitidos.

Se decidió instalar un tren de tratamiento consistente en cuatro operaciones unitarias: coagulación, floculación, sedimentación y filtración.

Se evaluó la efectividad del tren de tratamiento determinando la reducción de la demanda química de oxígeno. Se llegó a la conclusión de que el tratamiento es efectivo dado que se obtuvo una reducción del 75 % del parámetro antes mencionado. También se evaluaron los otros parámetros listados en el Acuerdo Gubernativo 236-2006, y se pudo constatar que el efluente del tratamiento cumplía con los límites máximos permisibles estipulados.

OBJETIVOS

General

Diseñar e implementar un sistema de tratamiento de aguas residuales para efluentes provenientes del lavado de recipientes que contienen productos agroquímicos de una industria de exportación de semillas en Guatemala, para que cumpla con los lineamientos establecidos en el Acuerdo Gubernativo 236-2006: *Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos.*

Específicos

1. Caracterizar y comparar con el Acuerdo Gubernativo 236-2006 los parámetros fisicoquímicos del agua residual cruda proveniente del lavado de recipientes de la industria de exportación de semillas.
2. Establecer los criterios de diseño del proceso de tratamiento de aguas residuales con base en la caracterización realizada sobre los parámetros fisicoquímicos del agua residual.
3. Determinar y comparar con el Acuerdo Gubernativo 236-2006 los parámetros característicos del efluente de aguas residuales provenientes del área de lavado de recipientes luego de la implementación del sistema de tratamiento de aguas residuales.

4. Caracterizar y comparar el DQO del agua tratada respecto al agua cruda utilizando el porcentaje de remoción de este parámetro, como indicador de la efectividad del proceso.

HIPÓTESIS

La demanda química de oxígeno posterior al tratamiento diseñado del agua residual presenta una diferencia significativa respecto al agua cruda proveniente del área de lavado de recipientes de productos agroquímicos de una industria de exportación de semillas.

INTRODUCCIÓN

Dentro de las actividades productivas de la industria de exportación de semillas se utilizan distintos agroquímicos, los cuales son dosificados en unidades móviles, por personal que porta vestimenta de seguridad establecida por el departamento de seguridad industrial, hacia los invernaderos. Dichas unidades móviles son lavadas en un área específica, generándose un efluente de aguas residuales especiales que contienen trazas de agroquímicos. Para evitar que esta agua residual genere un impacto negativo sobre el cuerpo de agua receptor, fue necesaria la construcción de un tren de tratamiento físico y químico, que pudiera acondicionar el agua residual para cumplir con los lineamientos del Acuerdo Gubernativo 236-2006.

El tratamiento implementado consistió en instalar cuatro unidades: coagulación, floculación, sedimentación y filtración. Como coagulante se utilizó POLIFLOCAL-CH (polihidroxiclورو de aluminio) y como floculante: PJ008 (poliacrilamida aniónica). En tanto que, como material filtrante, se utilizó carbón activado.

1. MARCO CONCEPTUAL

1.1. Antecedentes

En febrero de 2007 Margaret Haydeé Soto Velásquez realizó su trabajo de tesis titulado *Diseño del proceso e implementación de una planta de tratamiento de aguas residuales a nivel de laboratorio, provenientes de la línea de producción de químicos para lavandería de una planta industrial*. En dicho trabajo se detalla la metodología para caracterización de efluentes de agua cruda, los resultados obtenidos de la caracterización, el diseño del proceso a partir de la caracterización y la implementación a nivel laboratorio del diseño propuesto.

En abril de 2014 Ana Beatriz Martínez Rodas realizó su trabajo de tesis con el título *Identificación de los parámetros de mayor representatividad en la descarga de aguas residuales del sector industrial de lácteos según el Acuerdo Gubernativo 236-2006 y propuesta de unidades de tratamiento para su reducción*, en el cual se determinó que de los veinte parámetros establecidos en el Acuerdo Gubernativo 236-2006, únicamente se considera once parámetros como representativos para el agua residual del sector industrial de lácteos.

Estos trabajos sirvieron como una guía para evaluar los sistemas que suelen ser utilizados a nivel industrial para tratar el agua residual generada.

1.2. Justificación

A partir de los requerimientos del Acuerdo Gubernativo 236-2006: *Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos*, es necesario que posterior al lavado de recipientes donde se generan aguas con trazas de productos agroquímicos (principalmente compuestos organoclorados y organofosforados), se diseñe un proceso de tratamiento de aguas residuales para poder disponer del agua residual a un cuerpo receptor o bien para reutilizarla con fines de riego de una manera segura.

El proceso de lavado de recipientes que contienen fertilizante de esta industria genera 1,5 m³ de agua residual a la semana.

1.3. Determinación del problema

Se deben tomar en cuenta los siguientes incisos:

1.3.1. Definición

No existe un sistema de tratamiento de aguas residuales para tratar el agua proveniente del área de lavado de recipientes en una industria agrícola ubicada en Finca las Vertientes, Km 25,5, RN-18, San José Pinula, Guatemala.

Al no tener un sistema de tratamiento de aguas residuales no se puede asegurar que las descargas cumplan con lo estipulado en el Acuerdo Gubernativo 236-2006: *Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos*.

1.3.2. Delimitación

Diseño y evaluación de un sistema de tratamiento de aguas residuales efectivo para tratar el agua proveniente del área de lavado de recipientes de la industria agrícola ubicada en Finca las Vertientes, Km 25,5, RN-18, San José Pinula, Guatemala. Dicha industria se clasifica como ente generador existente de aguas residuales especiales.

2. MARCO TEÓRICO

Las aguas residuales son afluentes que han sido contaminados debido al uso de dicho fluido. En el caso de Guatemala, el Acuerdo Gubernativo 236-2006 fija los parámetros máximos con los que debe cumplir un afluente de agua residual al ser arrojado a un cuerpo receptor, con el fin de disminuir el impacto ambiental que el afluente pueda tener.

2.1. El agua

Es importante tener en cuenta la siguiente información:

2.2. Aguas residuales

Antes de diseñar un tren de tratamiento de agua residual, es necesario tomar en cuenta que existen dos tipos de aguas residuales: las domésticas y las industriales.

2.2.1. Aguas residuales ordinarias

Son también conocidas como aguas residuales domésticas. El agua utilizada en los hogares para cualquier tarea (limpieza, cocina, entre otros) genera agua residual, denominada ordinaria o doméstica y contiene residuos de la actividad humana como: materia fecal, alimentos, aceites, grasas, sales, detergentes, entre otros.

2.2.2. Aguas residuales industriales

También conocida como agua residual especial, es variable en composición y cantidad. Este tipo de aguas suelen tener una mayor cantidad de contaminantes que las aguas residuales domésticas y difieren dependiendo del tipo de proceso en el cual se utilizan.

Las aguas residuales industriales son más complicadas de tratar debido al alto volumen y la alta carga de contaminantes que contienen en comparación a las aguas residuales ordinarias.

2.2.3. Aguas residuales analizadas

En la industria de la agricultura, uno de los mayores contaminantes del agua son los agroquímicos (pesticidas, fungicidas, herbicidas, fertilizantes, entre otros), estos son productos generalmente organofosforados, organoclorados y organonitrogenados. En el agua residual analizada en el presente estudio se utilizan principalmente los siguientes compuestos: Metalaxil (SP), piridabén, corfenvinfós, Endosulfan sulfato, endrin aldehído, ametrina, bromacilo, entre otros.

2.3. Tratamiento de aguas residuales

Es importante la siguiente información:

2.3.1. Etapas del tratamiento de aguas residuales

- Tratamiento primario: contempla el uso de operaciones físicas tales como la sedimentación y el desbaste para la eliminación de los sólidos sedimentables y flotantes presentes en el agua residual.
- Tratamiento secundario: en el tratamiento secundarios son procesos biológicos y químicos los que se emplean para eliminar la mayor parte de la materia orgánica.
- Tratamiento Terciario: en el tratamiento terciario se emplean combinaciones adicionales de los procesos y operaciones unitarias con el fin de eliminar otros componentes, tales como el nitrógeno y el fósforo, cuya reducción con tratamiento secundario no es significativa.¹

A continuación se ofrece una breve descripción de los tratamientos implementados en este trabajo de graduación.

2.3.2. Desbaste

Operación en la cual se eliminan los sólidos de mayor tamaño para proteger los equipos utilizados en los tratamientos posteriores. Usualmente se utilizan barras metálicas de por lo menos 6 mm y el espacio entre estas es de entre 10 y 100 mm.

2.3.3. Tamizado

Tiene la misma finalidad que el desbaste. Consiste en la filtración del agua para eliminar los sólidos de menor tamaño. Se utilizan tamices de distintos tamaños según el tipo de agua a tratar.

¹ Metcalf & Eddy, Inc. *Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización*. p. 548.

2.3.4. Homogeneización

La homogeneización tiene como fin mezclar el agua residual y asegurar que el agua tenga las mismas propiedades en cualquier punto y tener una calidad de agua uniforme. Esto para poder determinar un tratamiento óptimo para el agua.

2.3.5. Sedimentación

La sedimentación se utiliza en los tratamientos de aguas residuales para separar sólidos en suspensión de estas. La eliminación de las materias por sedimentación se basa en la diferencia de peso específico entre las partículas sólidas y el líquido donde se encuentran, que acaba en el depósito de las materias en suspensión.²

2.3.6. Neutralización

El agua residual, en ocasiones, puede ser ácida o alcalina derivado del proceso para el que fue utilizada. Si el valor del pH del agua residual está por debajo de 6 se debe neutralizar con una base como hidróxido de sodio. Por otro lado, si el pH es mayor que 9 se debe neutralizar con un ácido como el ácido sulfúrico.

2.3.7. Coagulación-Floculación

En muchos casos la materia en suspensión puede estar formada por partículas de muy pequeño tamaño ($10^{-6} - 10^{-9}$ m), lo que conforma una suspensión coloidal. Estas suspensiones coloidales suelen ser muy estables, en muchas ocasiones debido a interacciones eléctricas entre las partículas. Por tanto, tienen una velocidad de sedimentación extremadamente lenta, por lo que haría inviable un tratamiento mecánico clásico. Una forma de mejorar la eficacia de todos los sistemas de eliminación de materia en suspensión es la adición de ciertos reactivos químicos que, en primer lugar, desestabilicen la suspensión coloidal (coagulación) y a continuación favorezcan la floculación de estas para obtener partículas fácilmente sedimentables.

² RAMALLO, Rubens. *Tratamiento de aguas residuales*. p. 356.

Es una operación que se utiliza a menudo, tanto en el tratamiento de aguas residuales urbanas y potables como en industriales (industria de la alimentación, pasta de papel, textiles, entre otros). Los coagulantes suelen ser productos químicos que en solución aportan carga eléctrica contraria a la del coloide. Habitualmente se utilizan sales con cationes de alta relación carga/masa (Fe^{3+} Al^{3+}) junto con polielectrolitos orgánicos, cuyo objetivo también debe ser favorecer la floculación.³

2.3.8. Tratamiento con carbón activado granular

El tratamiento del agua residual con carbón activado suele considerarse como un proceso de refinado de aguas que ya han recibido un tratamiento biológico normal. En este caso, el carbón se emplea para eliminar parte de la materia orgánica disuelta. Con frecuencia, se suele emplear una columna como medio de contacto del agua residual con el carbón activado granular. El agua se introduce por la parte superior y se extrae por la parte inferior de la columna.⁴

2.4. Evaluación de la calidad del agua residual

Para determinar la calidad del agua residual se evalúan parámetros físicos y químicos, a continuación se definen algunos de ellos:

2.4.1. Parámetros químicos del agua

Es importante atender cada uno de los siguientes incisos:

2.4.1.1. Nitrógeno

Las formas de nitrógeno de mayor interés en el agua son: nitratos, nitritos, nitrógeno orgánico y amoniacal. El Acuerdo Gubernativo 236-2006: *Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos*,

³ RODRÍGUEZ, Antonio; FERNÁNDEZ, Alba; LETÓN, Pedro; ROSAL, Roberto; DORADO, Miriam; VILLAR, Susana; SANZ Juana. *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. p. 85.

⁴ Metcalf & Eddy, Inc. *Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización*. p. 549.

establece que se debe medir el nitrógeno total (nitratos, nitritos y nitrógeno amoniacal).

2.4.1.2. Fósforo

El fósforo se encuentra en aguas naturales y residuales mayormente como fosfatos y fosfatos unidos orgánicamente. Los ortofosfatos se pueden encontrar en fertilizantes utilizados para la agricultura. El fósforo es esencial para el crecimiento de organismos y puede ser el nutriente que limita la productividad primaria de una masa de agua. En ocasiones la descarga de agua residual sin tratamiento, en especial de un drenaje agrícola, puede estimular el crecimiento de organismos acuáticos fotosintéticos en cantidades molestas.⁵

2.4.1.3. Demanda química de oxígeno

“La demanda química de oxígeno se define como la cantidad de un agente oxidante específico que reacciona con una muestra en condiciones controladas. La cantidad de oxidante consumida se expresa en términos de su equivalencia de oxígeno”.⁶

2.4.1.4. Demanda bioquímica de oxígeno

La demanda bioquímica de oxígeno se utiliza para determinar los requisitos relativos de oxígeno de las aguas residuales, los efluentes y las aguas contaminadas; su aplicación más amplia es la medición de la carga de residuos a las plantas de tratamiento y la evaluación de la eficiencia de eliminación de DBO de las plantas. La DBO mide el oxígeno molecular utilizado durante un período de incubación específico para: degradar bioquímicamente material orgánico, oxidar material inorgánico y medir la cantidad de oxígeno utilizado para oxidar formas reducidas de nitrógeno.⁷

⁵ RICE, E; BAIRD, R. and EATON, A. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. p. 840.

⁶ *Ibíd.*

⁷ *Ibíd.*

Se utiliza para medir el grado de contaminación y se expresa en mg/L – O₂. La evaluación de este parámetro se realiza a 20 °C durante 5 días de manera estándar.

2.4.1.5. Aceites y grasas

Son compuestos orgánicos estables que no se descomponen con facilidad por las bacterias. Su análisis se realiza por medio de extracción con solvente orgánico y cuantificación gravimétrica.

2.4.1.6. Metales pesados

Los metales pesados son un grupo de elementos químicos con una densidad alta. Generalmente son tóxicos para los seres humanos y entre los más susceptibles a presentarse en el agua están los siguientes: mercurio, níquel, cobre, plomo y cromo.

2.4.1.7. Potencial de hidrógeno

También conocido como pH, se define como el logaritmo negativo de la concentración del ion hidrógeno. La mayor parte de la vida acuática únicamente puede vivir en cuerpos de agua con pH de entre 6,5 a 8,5 unidades de pH.

2.4.2. Parámetros físicos

Se definen en los siguientes incisos:

2.4.2.1. Temperatura

Las lecturas de temperatura se utilizan en el cálculo de diversas formas de alcalinidad, en estudios de saturación y estabilidad con respecto al carbonato de calcio, en el cálculo de salinidad, en una serie de pruebas colorimétricas y en operaciones generales de laboratorio.⁸

El Acuerdo Gubernativo 236-2006: *Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos*, establece que la diferencia de temperatura del agua de descarga y el cuerpo de agua debe ser menor a siete grados centígrados.

2.4.2.2. Sólidos sedimentables

Son partículas que por su peso y tamaño se pueden sedimentar. Normalmente se remueven con un proceso de sedimentación como en un tanque de sedimentación o un cono Imhoff.

2.4.2.3. Sólidos totales

Es el total de sólidos presentes en una muestra (sólidos sedimentables y sólidos en suspensión).

2.5. Parámetros del agua residual en Guatemala

Al finalizar el tratamiento del agua residual esta debe cumplir con los límites permisibles detallados en el artículo 21 de la cuarta etapa del Acuerdo Gubernativo 236-2006: *Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos*, esto con el propósito de asegurar que el

⁸ RICE, E; BAIRD, R. and EATON, A. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. p. 845.

tren de tratamiento diseñado e implementado no deberá modificarse a corto o mediano plazo para cumplir con lo establecido en dicho Acuerdo Gubernativo. Los parámetros con los que debe cumplir el agua residual se presentan en la siguiente tabla:

Tabla I. **Límites máximos permisibles de descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, etapa cuatro**

Parámetros	Dimensionales	Límites máximos permisibles
Temperatura	Grados Celsius	TCR +/- 7
Grasas y aceites	Miligramos por litro	10
Materia flotante	Ausencia/presencia	Ausente
Sólidos suspendidos	Miligramos por litro	100
Nitrógeno total	Miligramos por litro	20
Fósforo total	Miligramos por litro	10
Potencial de hidrógeno	Unidades de potencial de hidrógeno	6 a 9
Coliformes fecales	Número más probable en cien mililitros	< 1x10 ⁴
Arsénico	Miligramos por litro	0,1
Cadmio	Miligramos por litro	0,1
Cianuro total	Miligramos por litro	1
Cobre	Miligramos por litro	3
Cromo hexavalente	Miligramos por litro	0.1
Mercurio	Miligramos por litro	0.01
Níquel	Miligramos por litro	2
Plomo	Miligramos por litro	0.4
Zinc	Miligramos por litro	10
Color	Unidades platino cobalto	500
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L – O ₂	200

*TCR: temperatura del cuerpo receptor.

Fuente: elaboración propia.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

- Caudal del efluente
- Caudal del afluente
- Gradiente de velocidad
- Tiempo de sedimentación
- Color
- Sólidos en suspensión
- Temperatura
- Sólidos suspendidos
- Nitrógeno total
- Fósforo total
- Potencial de hidrógeno

3.2. Recursos humanos disponibles

- Ingeniero encargado de cumplimiento Interno HSE
- Técnico operador
- Ing. Rodolfo Castro
- Estudiante Luis Carlos Perdomo Hernández

3.3. Recursos materiales disponibles (equipo, cristalería, reactivos)

- Tanques de agua

- Bombas centrifugas
- Probetas
- Vasos de precipitados
- Potenciómetro
- Turbidímetro
- Colorímetro
- Termómetro
- Equipo de protección personal
- Equipo de prueba de jarras
- Espectrofotómetro

3.4. Técnica cuantitativa

La primera técnica aplicada en el proyecto fue la determinación del caudal del agua residual proveniente del área de lavado de recipientes de la industria agrícola, a continuación se realizó la determinación de las características fisicoquímicas del agua residual mencionadas en la tabla I, posteriormente se diseñaron las etapas del proceso de tratamiento de aguas residuales.

3.5. Recolección y ordenamiento de la información

- Realizar una visita a la planta agrícola.
- Solicitar información de los aditivos químicos presentes en los recipientes utilizados.
- Entrevistar al ingeniero y operario del área de lavado.

- Recopilar registro de parámetros fisicoquímicos del agua residual cruda (si existieran).
- Determinar las características fisicoquímicas del agua residual cruda.
- Determinar la demanda química de oxígeno del agua residual cruda con 5 mediciones realizadas en distintos días.
- Diseñar el proceso de tratamiento de aguas residuales para la industria agrícola.
- Desarrollar la metodología de operación del proceso de tratamiento de aguas residuales.
- Verificar que las características fisicoquímicas del agua residual cumplan con el Acuerdo Gubernativo 236-2006.
- Realizar los cambios necesarios que pudieran surgir en la metodología de operación para el correcto funcionamiento del proceso de tratamiento de aguas residuales.

3.6. Plan de análisis de los resultados

Luego de implementar el proceso de tratamiento de aguas residuales en la industria agrícola, se procedió a la verificación del correcto funcionamiento de este, determinando las características fisicoquímicas del agua residual tratada. Se utilizó un análisis estadístico de diferencia de medias apareadas para determinar si el agua tratada tiene una diferencia significativa respecto al agua cruda asumiendo que los datos obtenidos cumplen con la distribución normal.

Para ello se tomaron 5 muestras de agua cruda y 5 muestras de agua tratada y se compararon entre sí.

Posteriormente, con los resultados obtenidos, se procedió a la revisión de la efectividad del proceso de tratamiento de aguas residuales. Finalmente se entregó la documentación elaborada al responsable de la industria agrícola para su aprobación.

3.7. Análisis estadístico

Para determinar la efectividad del proceso de tratamiento de aguas residuales propuesto, se utilizó un método de comparación de muestras pareadas, asumiendo que los datos se ajustan a una distribución normal, para determinar que la demanda química de oxígeno posterior al tratamiento del agua residual presenta una diferencia significativa respecto al agua cruda proveniente del proceso industrial.

- Determinar la sumatoria de diferencias entre las muestras recolectadas.

$$\sum d = \sum_{i=1}^5 (x_i - x_0) \quad (\text{Ec. 1})$$

- Determinar el promedio de las diferencias entre las muestras recolectadas.

$$\bar{X}_d = \frac{\sum d}{n} = \frac{\sum d}{5} \quad (\text{Ec. 2})$$

- Calcular la desviación estándar entre las diferencias.

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum (d_i - \bar{d})^2}{(n-1)}} \quad (\text{Ec. 3})$$

- Determinar los grados de libertad (n-1).

$$GDL = n - 1 \quad (\text{Ec. 4})$$

- Utilizar una confianza del 95 % ($\alpha = 5\%$)
- Determinar el valor de t experimental.

$$t_{n-1} = \frac{\bar{X}_d}{S_d/\sqrt{n}} = 73,45 \quad (\text{Ec. 5})$$

- Comparar el valor de t experimental y compararlo con el valor de t tabulado.

$$t_{n-1} \leq t; \mu_d = 0 \quad (\text{Ec. 6})$$

$$t_{n-1} > t; \mu_d \neq 0 \quad (\text{Ec. 7})$$

- Si el valor de t experimental es mayor al de t tabulado se rechaza la hipótesis nula, es decir existe una diferencia significativa en el valor de DQO y, por lo tanto, el tratamiento es efectivo.

4. RESULTADOS

4.1. Criterios de diseño

Se siguieron los siguientes criterios para el diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales provenientes del área de lavado de recipientes de productos agroquímicos de una industria de exportación de semillas:

- Carga contaminante típica del afluente.
- Normativas y legislaciones vigentes.
- Alta eficacia en la remoción de carga contaminante.
- Sistema de tratamiento fisicoquímico basado en agentes coagulantes y floculantes.
- Sistema estable y con capacidad para asimilar fluctuaciones en caudal o carga.
- Ensayo prueba de jarras como evaluación de la tratabilidad del efluente.
- Bajo costo de construcción.
- Bajo costo de mantenimiento y operación.
- Simplicidad de operación.

- Lodos residuales estables e inocuos.
- Bajo consumo de energía eléctrica.

4.2. Descripción del sistema de tratamiento para aguas residuales

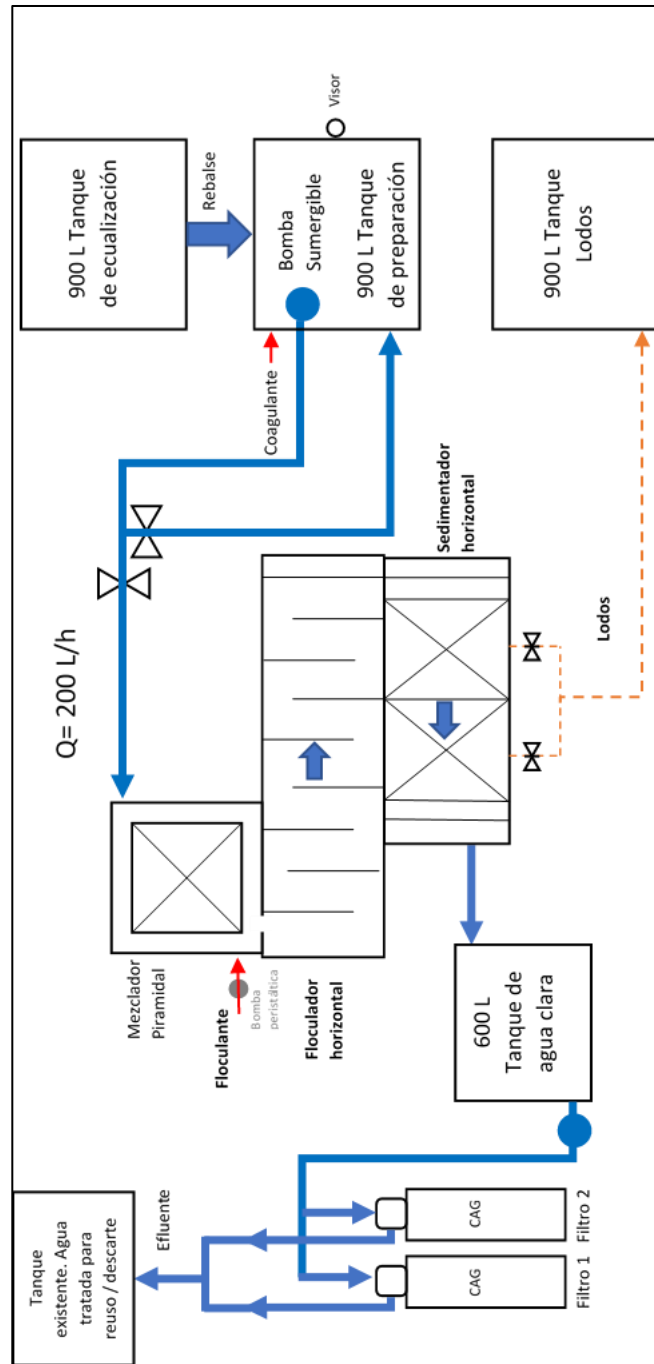
El sistema de tratamiento fisicoquímico para el tratamiento de aguas residuales provenientes del área de lavado de recipientes de productos agroquímicos de una industria de exportación de semillas estará formado por los siguientes elementos:

Tabla II. **Especificaciones de la planta de tratamiento fisicoquímica**

Parámetro	Especificación
Caudal de diseño	200 L/hora
Volumen tanque de ecualización	900 L
Volumen tanque de preparación	900 L
Volumen canal de floculación	70 L
Volumen sedimentador	380 L
Volumen tanque agua clara	600 L
Volumen del tanque de lodos	900 L
Capacidad bomba peristáltica	40 gpd
Capacidad bomba sumergible (alimentación)	0,5 HP
Capacidad bomba centrífuga (filtración)	0,5 HP
Número de filtros	2
Tamaño filtros	14 pulgadas de diámetro x 65 pulgadas de altura
Cantidad de carbón activado en filtros	40 kg / filtro
Caudal de filtración	5 gpm
Mando panel eléctrico: Encendido/Apagado	Bomba alimentación y Bomba filtración
Coagulante (polihidroxicloruro de aluminio)	Solución Poliflocal-CH
Floculante (poliacrilamida aniónica)	Emulsión PJ008
Nivelador de pH (ácido/soda)	No requerido
Eficiencia del tratamiento fisicoquímico en remoción de color y sólidos en suspensión	>90 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 1. Sistema de tratamiento fisicoquímico



Fuente: elaboración propia.

4.3. Caracterización de parámetros fisicoquímicos del agua cruda

Es importante observar las siguientes tablas:

Tabla III. Caracterización fisicoquímica del agua cruda

Análisis	Dimensional	Límite de detección	Resultado	Límite máximo permisible	Método de análisis
Cianuro	mg/L – CN	0,026	<0,026	1	Spectroquant® Merck 09701
Color	U Pt-Co	2	81	500	STM 2120 C
DBO ₅	mg/L – O ₂	3	192	200	COGUANOR NTG 29014H7
DQO	mg/L – O ₂	3	388	N/A	COGUANOR NGO 29014H8
Relación DQO/DBO ₅	---	---	2	N/A	---
Fósforo Total	mg/L – P	0,02	0,7	10	Spectroquant® Merck 14848
Grasas y aceites	mg/L	5	14	10	COGUANOR NTG 77002H1
Materia Flotante	---	Presente / Ausente	Ausente	Ausente	Organoléptico
Nitrógeno Total	mg/L – N	0,26	7,3	20	Spectroquant® Merck 14773
pH	---	0,01	9,09	9	STM 4500-H+ B
Sólidos sedimentables	mL/L	0,1	0,1	N/A	STM 2540 F
Sólidos suspendidos	mg/L	0,1	28	100	STM 2540 D
Coliformes fecales	NMP/100mL	1,8	4,5	<1x10 ⁴	STM 9221 C y E
Arsénico	mg/L – As	0,0009	0,038	0,1	STM 3114 C
Cadmio	mg/L – Cd	0,009	<0,009	0,1	STM 3111 B
Cobre	mg/L – Cu	0,028	0,077	3	STM 3111 B
Cromo (VI)	mg/L – Cr	0,02	<0,02	0,1	Spectroquant® Merck 14758
Mercurio	mg/L – Hg	0,0006	0,0007	0,01	STM 3112 B
Níquel	mg/L – Ni	0,153	<0,153	2	STM 3111 B
Plomo	mg/L – Pb	0,076	<0,076	0,4	STM 3111 B
Zinc	mg/L – Zn	0,096	0,506	10	STM 3111 B

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **DQO de agua cruda**

Núm.	Análisis	Dimensional	Límite de detección	Resultado	Límite máximo permisible	Método de análisis
1	Demanda química de oxígeno	mg/L – O ₂	3	388	N/A	COGUANOR NGO 29014H8
2	Demanda química de oxígeno	mg/L – O ₂	3	402	N/A	COGUANOR NGO 29014H8
3	Demanda química de oxígeno	mg/L – O ₂	3	408	N/A	COGUANOR NGO 29014H8
4	Demanda química de oxígeno	mg/L – O ₂	3	394	N/A	COGUANOR NGO 29014H8
5	Demanda química de oxígeno	mg/L – O ₂	3	420	N/A	COGUANOR NGO 29014H8

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **DBO₅ de agua cruda**

Núm.	Análisis	Dimensional	Resultado	Límite máximo permisible
1	Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L – O ₂	194	200
2	Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L – O ₂	201	200
3	Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L – O ₂	204	200
4	Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L – O ₂	197	200
5	Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L – O ₂	210	200

Fuente: elaboración propia.

Los valores fueron calculados con base en la relación DQO/ DBO₅ reportada para el agua cruda (2).

4.4. Caracterización de parámetros fisicoquímicos del agua tratada

Es importante observar las siguientes tablas:

Tabla VI. Caracterización fisicoquímica del agua tratada

Análisis	Dimensional	Límite de detección	Resultado	Límite máximo permisible	Método de análisis
Cianuro	mg/L – CN ⁻	0,026	<0,026	1	Spectroquant® Merck 09701
Color	U Pt-Co	2	17	500	STM 2120 C
DBO ₅	mg/L – O ₂	3	54	200	COGUANOR NTG 29014H7
DQO	mg/L – O ₂	3	97	N/A	COGUANOR NGO 29014H8
Relación DQO/DBO ₅	---	---	1,8	N/A	---
Fósforo Total	mg/L – P	0,02	0,16	10	Spectroquant® Merck 14848
Grasas y aceites	mg/L	5	<5	10	COGUANOR NTG 77002H1
Materia Flotante	---	Presente / Ausente	Ausente	Ausente	Organoléptico
Nitrógeno Total	mg/L – N	0,26	4,97	20	Spectroquant® Merck 14773
pH	---	0,01	6,96	9	STM 4500-H ⁺ B
Sólidos sedimentables	mL/L	0,1	<0,1	N/A	STM 2540 F
Sólidos suspendidos	mg/L	0,1	<0,1	100	STM 2540 D
Coliformes fecales	NMP/100mL	1,8	<1,8	<1x10 ⁴	STM 9221 C y E
Arsénico	mg/L – As	0,0009	0,0015	0,1	STM 3114 C
Cadmio	mg/L – Cd	0,009	<0,009	0,1	STM 3111 B
Cobre	mg/L – Cu	0,028	0,031	3	STM 3111 B
Cromo (VI)	mg/L – Cr	0,02	<0,02	0,1	Spectroquant® Merck 14758
Mercurio	mg/L – Hg	0,0006	<0,0006	0,01	STM 3112 B
Níquel	mg/L – Ni	0,153	<0,153	2	STM 3111 B
Plomo	mg/L – Pb	0,076	<0,076	0,4	STM 3111 B
Zinc	mg/L – Zn	0,096	0,125	10	STM 3111 B

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **DQO de agua tratada**

Núm.	Análisis	Dimensional	Límite de detección	Resultado	Límite máximo permisible	Método de análisis
1	Demanda química de oxígeno	mg/L – O ₂	3	97	N/A	COGUANOR NGO 29014H8
2	Demanda química de oxígeno	mg/L – O ₂	3	104	N/A	COGUANOR NGO 29014H8
3	Demanda química de oxígeno	mg/L – O ₂	3	105	N/A	COGUANOR NGO 29014H8
4	Demanda química de oxígeno	mg/L – O ₂	3	94	N/A	COGUANOR NGO 29014H8
5	Demanda química de oxígeno	mg/L – O ₂	3	104	N/A	COGUANOR NGO 29014H8

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **DBO₅ de agua tratada**

Núm.	Análisis	Dimensional	Resultado	Límite máximo permisible
1	Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L – O ₂	54	200
2	Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L – O ₂	58	200
3	Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L – O ₂	58	200
4	Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L – O ₂	52	200
5	Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L – O ₂	58	200

Fuente: elaboración propia.

*Los valores fueron calculados con base en la relación DQO/DBO₅ reportada para el agua tratada (1,8).

Tabla IX. **Parámetros fisicoquímicos de agua cruda vs agua tratada**

Análisis	Dimensional	Límite de detección	Agua cruda	Agua tratada	Límite máximo permisible	Diferencia (eficiencia)
Cianuro	mg/L – CN ⁻	0,026	<0,026	<0,026	1	N/A
Color	U Pt-Co	2	81	17	500	79 %
DBO ₅	mg/L – O ₂	3	192	54	200	72 %
DQO	mg/L – O ₂	3	388	97	N/A	75 %
Relación DQO/DBO ₅	---	---	2	1,8	N/A	N/A
Fósforo Total	mg/L – P	0,02	0,7	0,16	10	77 %
Grasas y aceites	mg/L	5	14	<5	10	>65 %
Materia Flotante	---	Presente / Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	N/A
Nitrógeno Total	mg/L – N	0,26	7,3	4,97	20	32 %
pH	---	0,01	9,09	6,96	9	23 %
Sólidos sedimentables	mL/L	0,1	0,1	<0,1	N/A	N/A
Sólidos suspendidos	mg/L	0,1	28	<0,1	100	99 %
Coliformes fecales	NMP/100mL	1,8	4,5	<1,8	<1x10 ⁴	>60 %
Arsénico	mg/L – As	0,0009	0,038	0,0015	0.1	96 %
Cadmio	mg/L – Cd	0,009	<0,009	<0,009	0.1	N/A
Cobre	mg/L – Cu	0,028	0,077	0,031	3	60 %
Cromo (VI)	mg/L – Cr	0,02	<0,02	<0,02	0.1	N/A
Mercurio	mg/L – Hg	0,0006	0,0007	<0,0006	0.01	N/A
Níquel	mg/L – Ni	0,153	<0,153	<0,153	2	N/A
Plomo	mg/L – Pb	0,076	<0,076	<0,076	0.4	N/A
Zinc	mg/L – Zn	0,096	0,506	0,125	10	75 %

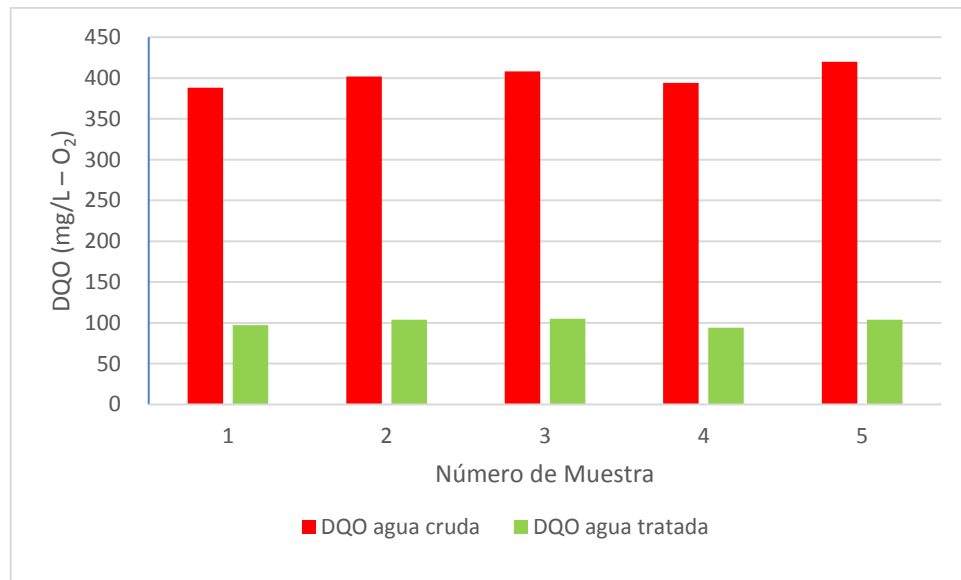
Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Comparación de DQO de agua cruda versus agua tratada**

Núm.	Análisis	Dimensional	Límite de detección	Resultado agua cruda	Resultado agua tratada	Diferencia (Reducción DQO)
1	Demanda química de oxígeno	mg/L – O ₂	3	388	97	75 %
2	Demanda química de oxígeno	mg/L – O ₂	3	402	104	74 %
3	Demanda química de oxígeno	mg/L – O ₂	3	408	105	74 %
4	Demanda química de oxígeno	mg/L – O ₂	3	394	94	76 %
5	Demanda química de oxígeno	mg/L – O ₂	3	420	104	75 %

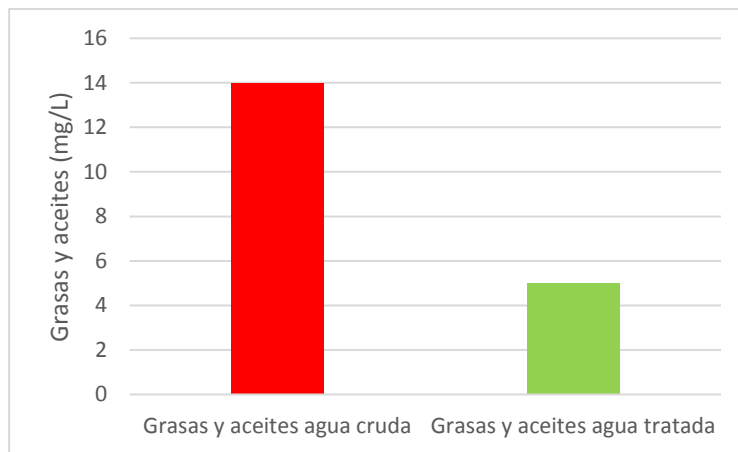
Fuente: elaboración propia.

Figura 2. **Comparación de DQO de agua cruda versus DQO de agua tratada**



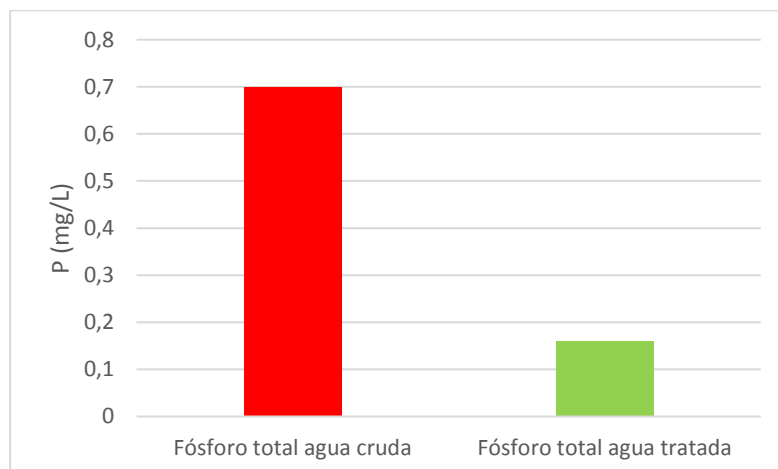
Fuente: elaboración propia.

Figura 3. **Comparación de grasas y aceites de agua cruda vs grasas y aceites de agua tratada**



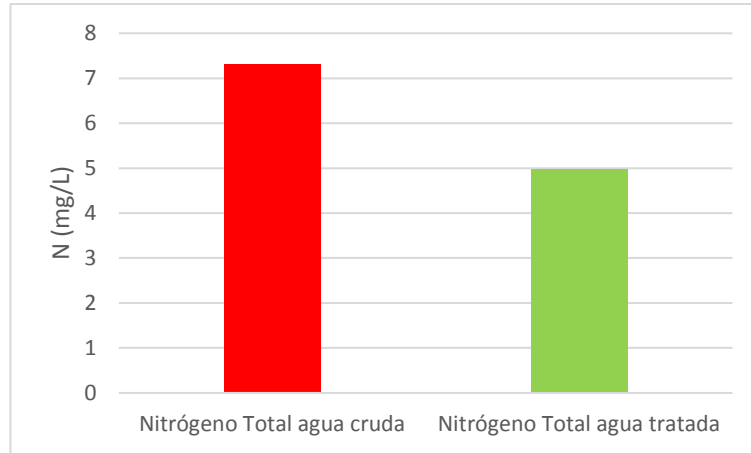
Fuente: elaboración propia.

Figura 4. **Comparación de fósforo total de agua cruda versus fósforo total de agua tratada**



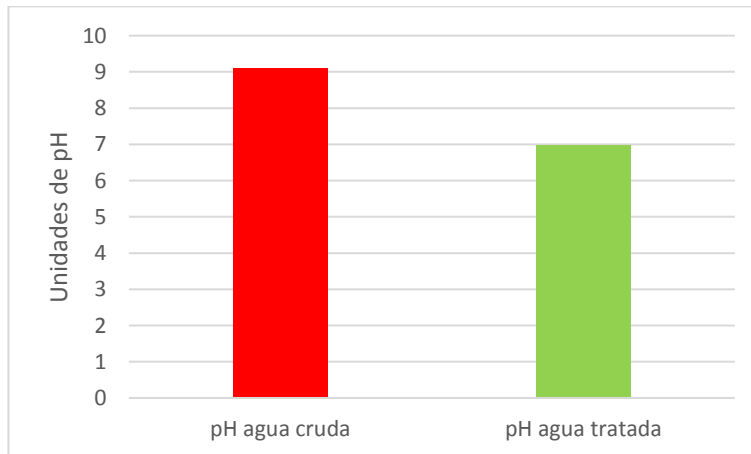
Fuente: elaboración propia.

Figura 5. **Comparación de nitrógeno total de agua cruda versus nitrógeno total de agua tratada**



Fuente: elaboración propia.

Figura 6. **Comparación de pH de agua cruda versus pH de agua tratada**



Fuente: elaboración propia.

4.5. Resultados de análisis estadístico

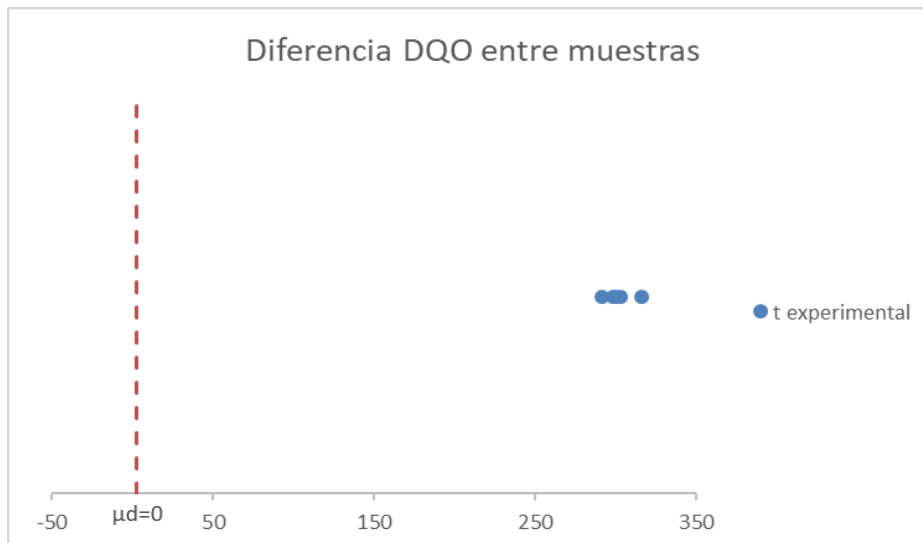
Se presentan en la siguiente tabla:

Tabla XI. **Análisis estadístico**

Muestra	1	2	3	4	5
DQO agua cruda	388	402	408	394	420
DQO agua tratada	97	104	105	94	104
Diferencia	291	298	303	300	316
Promedio de diferencias	301,6				
Desviación estándar	9,18				
Grados de libertad	4				
t experimental	73,45				
t tabulada	2,1318				

Fuente: elaboración propia.

Figura 7. **Diferencia de DQO entre muestras**



Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Con base en los criterios de diseño especificados en el numeral 4.1 se obtuvieron las especificaciones de la planta de tratamiento (ver tabla III), cumpliéndose con la eficiencia esperada de remoción de color y sólidos en suspensión (mayor a 90 %).

En la figura 1 se muestra la configuración del sistema de tratamiento de aguas residuales provenientes del efluente de aguas especiales con trazas de agroquímicos, las cuales son tratadas para poder descargar el agua hacia un cuerpo de agua o bien para su reúso, cumpliendo con lo establecido en el Acuerdo Gubernativo 236-2006. La primera parte del tratamiento consiste en el almacenamiento del afluente en un tanque de equalización. Luego pasa por medio de rebalse a un tanque de preparación, en el cual se agrega el coagulante.

A continuación el agua es transportada por medio de una bomba sumergible hacia el mezclador piramidal ajustando el caudal a 200 litros por hora por medio de una válvula de bola. En la salida del mezclador piramidal se adiciona floculante, el cual se mezcla con el agua en el floculador horizontal, con flujo laminar. Posteriormente se extraen los lodos en el sedimentador horizontal y el agua llega al tanque de agua clara donde, por medio de una bomba centrífuga, es enviada a los filtros de carbón activado en donde se eliminan las trazas de agroquímicos y el olor. Finalmente, el efluente del sistema de tratamiento se almacena en un tanque de agua tratada para su posterior descarga o reúso.

En la tabla IV se muestra la caracterización de los parámetros fisicoquímicos del agua cruda respecto a los límites máximos permisibles del Acuerdo Gubernativo 236-2006 etapa 4, se observa que los parámetros de pH y de grasas y aceites se encuentran por encima del límite máximo permisible. Además, el DBO se encuentra cerca del límite máximo permisible, por lo que una pequeña variación en la calidad del agua residual podría dar como resultado que el DBO del agua cruda exceda dicho límite. El resultado de análisis de metales pesados demuestra que el proceso de lavado de recipientes no contamina el agua con metales pesados.

El parámetro de diseño para esta investigación fue la DQO. Por ello se realizó la medición de este parámetro en 5 muestras distintas del afluente, los resultados de esto se muestran en la tabla V. Los valores de la DQO fueron utilizados para estimar el valor de la DBO para las muestras tomadas, estos resultados se presentan en la tabla VI. Se puede observar que en 3 de las 5 muestras a la entrada del tratamiento de aguas residuales, el resultado de DBO excede el límite máximo permisible.

En la tabla VII se muestra la caracterización de los parámetros fisicoquímicos del agua tratada respecto a los límites máximos permisibles del Acuerdo Gubernativo 236-2006 en donde se observa una mejora substancial de la calidad del agua tratada respecto al agua cruda. El agua tratada cumple con todos los parámetros requeridos en el acuerdo. En la tabla VIII se presentan los resultados obtenidos para la DQO de 5 muestras distintas del efluente.

En la tabla IX se observa que para todos los parámetros el resultado está por debajo del límite máximo permisible. La tabla X muestra que el proceso de tratamiento del agua residual disminuye el DQO en un 75 %, lo cual indica que la demanda química de oxígeno en el agua se reduce significativamente

demostrando la eficiencia del proceso de tratamiento implementado. En la tabla XI se muestran los resultados del análisis estadístico realizado con un nivel de significancia del 5 %. Este resultado muestra que la demanda química de oxígeno, posterior al tratamiento de agua residual, disminuye significativamente.

El resultado de este análisis estadístico se presenta en la figura número 7, en dónde se puede apreciar que la demanda química de oxígeno del agua tratada es significativamente menor respecto al agua cruda. Sin embargo, el alcance de la investigación no permite determinar cuál es la naturaleza química de los contaminantes removidos del agua. Además, hace falta evaluar en qué etapa del tratamiento se genera la mayor remoción de DQO. Por lo tanto se recomienda que posteriormente a esta investigación se lleve a cabo otra, con el objetivo de evaluar si la planta construida es capaz o no de remover agroquímicos, que podrían ser arrastrados del proceso de lavado de recipientes.

En la figura 2 se muestra la reducción del DQO del agua tratada respecto al agua cruda para las 5 muestras analizadas. De la figura 3 a la figura 6 se muestra la reducción de grasas y aceites, fósforo total, nitrógeno total y pH del agua tratada respecto al agua cruda, respectivamente.

CONCLUSIONES

1. El agua residual proveniente del lavado de recipientes que contienen productos agroquímicos de una industria de exportación de semillas en Guatemala, que no ha recibido tratamiento, no cumple con los límites máximos permisibles el Acuerdo Gubernativo 236-2006. Por lo cual es necesario implementar un tren de tratamiento de aguas residuales.
2. Se determinó que el tratamiento de aguas residuales para efluentes provenientes del área de lavado con productos agroquímicos debía constar de 4 operaciones unitarias principales: coagulación, floculación, sedimentación y filtración.
3. Los principales criterios de diseño del proceso de tratamiento de aguas residuales fueron los siguientes: carga contaminante típica del afluente; normativas y legislaciones vigentes; alta eficacia en la remoción de carga contaminante; sistema de tratamiento fisicoquímico basado en agentes coagulantes y floculantes; sistema estable y con capacidad para asimilar fluctuaciones en caudal o carga; ensayo prueba de jarras como evaluación de la tratabilidad del efluente; bajo costo de construcción; bajo costo de mantenimiento y operación; simplicidad de operación; lodos residuales estables e inocuos, y bajo consumo de energía eléctrica.
4. El agua tratada en el tren diseñado cumple con los límites máximos permisibles por el Acuerdo Gubernativo 236-2006.

5. La DQO del agua tratada en el tren diseñado muestra una reducción del 75 % en comparación al agua cruda, quedando así demostrada la eficiencia del sistema de tratamiento.

RECOMENDACIONES

1. Realizar el monitoreo de los parámetros del agua tratada por lo menos dos veces al año en cumplimiento con lo establecido en el artículo 49 del Acuerdo Gubernativo 236-2006.
2. Realizar la calibración de las válvulas semanalmente para mantener el caudal en 200 L/h.
3. Realizar ensayos de prueba de jarras cada dos meses para determinar la dosis óptima de dosificación de floculante y coagulante.
4. Monitorear la operación del sistema de tratamiento de manera bimestral.
5. Realizar una investigación posterior para determinar si el sistema de tratamiento instalado remueve los productos agroquímicos del afluente.

BIBLIOGRAFÍA

1. Acuerdo Gubernativo No. 236-2006 del Congreso de la República de Guatemala. *Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos*. Ciudad de Guatemala, Guatemala: Ministerio de Ganadería, Agricultura y Alimentación, 2006. 56 p.
2. CANAVOS, George. *Probabilidad y estadística. Aplicaciones y métodos*. México D.F., México: McGraw-Hill. 1988. 651 p.
3. Metcalf & Eddy, Inc. *Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización*. 3a ed. Madrid, España: McGraw-Hill, 1998. 1485 p.
4. PERRY, Robert; GREEN, Don. *Manual del ingeniero químico*. 8a ed. Nueva York, Estados Unidos: McGraw-Hill, 2008. 2735 p.
5. RAMALHO, Rubens. *Tratamiento de aguas residuales*. Barcelona, España: Reverté, 1990. 707 p.
6. RICE, E.; BAIRD, R. and EATON, A. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. California, United States: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 2017. 1530 p.
7. RODRÍGUEZ, Antonio; FERNÁNDEZ, Alba; LETÓN, Pedro; ROSAL, Roberto; DORADO, Miriam; VILLAR, Susana; SANZ, Juana.

Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. Madrid, España: Confederación Empresarial de Madrid, 2006. 137 p.

8. ROMERO, Jaime. *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño.* 3a ed. Bogotá, Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2004. 1233 p.

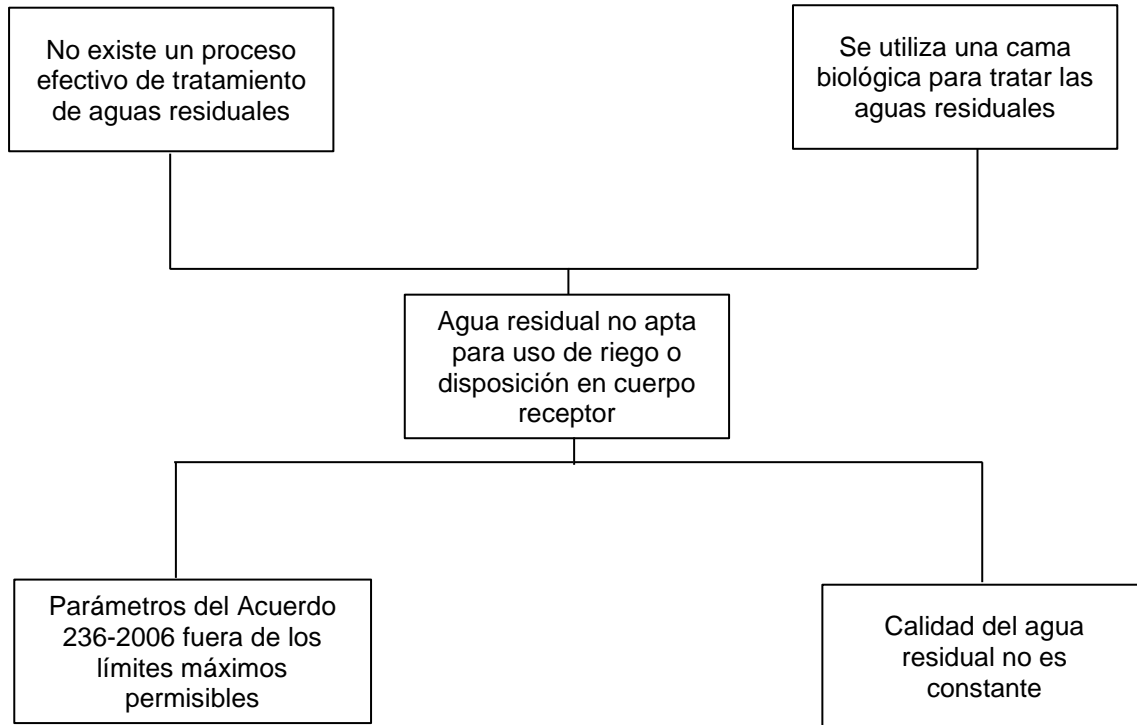
APÉNDICE

Apéndice 1. **Requisitos académicos**

Carrera	Área	Curso	Principio	Temática por resolver
Ingeniería química	Área de Química	Análisis cuantitativo	Métodos analíticos	Determinación de parámetros fisicoquímicos característicos del Agua.
	Operaciones unitarias	IQ1-Balance masa y energía	Balance de masa y energía	Elaboración del balance de masa y energía del proceso de tratamiento de aguas.
		IQ2-Flujo de fluidos	Principios de transferencia de momento	Disminuir los daños a tuberías, equipos y accesorios por golpe de ariete
	Especialización	Calidad del agua	Parámetros para evaluar aguas residuales	Aguas residuales en cumplimiento con los parámetros definidos.

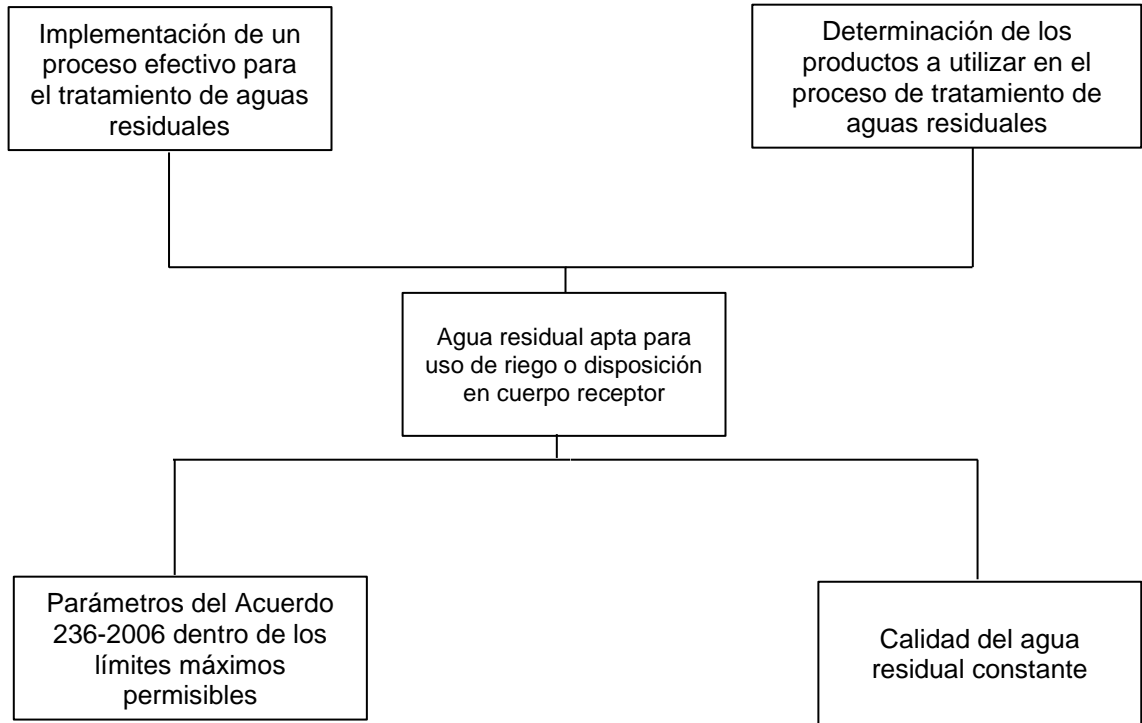
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Árbol del problema**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Árbol de solución**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Parámetros caracterizados en la entrada y salida del sistema de tratamiento de aguas residuales**

Temperatura
Grasas y aceites
Materia flotante
Sólidos suspendidos
Nitrógeno total
Fósforo Total
Potencial de Hidrógeno
Coliformes fecales
Arsénico
Cadmio
Cianuro total
Cobre
Cromo hexavalente
Mercurio
Níquel
Plomo
Zinc
Color
DQO

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Composición típica del agua residual**

Parámetro	Valor
pH	9,09
Sólidos suspendidos	28,0 mg/L
Material	Ausente
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	388 mg/L – O ₂
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	192 mg/L – O ₂
Color aparente	81
Nitrógeno total	7,30
Fósforo total	0,70

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. Ensayo prueba de jarras

- Materiales y método

El ensayo se realizó tomando una muestra representativa del efluente de aguas residuales provenientes del área de lavado de recipientes de productos agroquímicos de una industria de exportación de semillas, aforando hasta 500 mL cada una de las cuatro jarras, posteriormente se procedió a dosificar el agente coagulante a una velocidad de agitación de 100 rpm durante 2 minutos, seguidamente se dosificó el agente floculante a una velocidad de agitación descendente desde 60 rpm hasta 20 rpm en un período de 3 minutos.

Como agente coagulante se utilizó el polímero líquido polihidroxicloruro de aluminio de nombre comercial Poliflocal-CH” dosificado a partir de una solución madre al 2 %. Como agente floculante se utilizó una poliacrilamida aniónica dosificada a partir de una solución madre a 2 g/L.

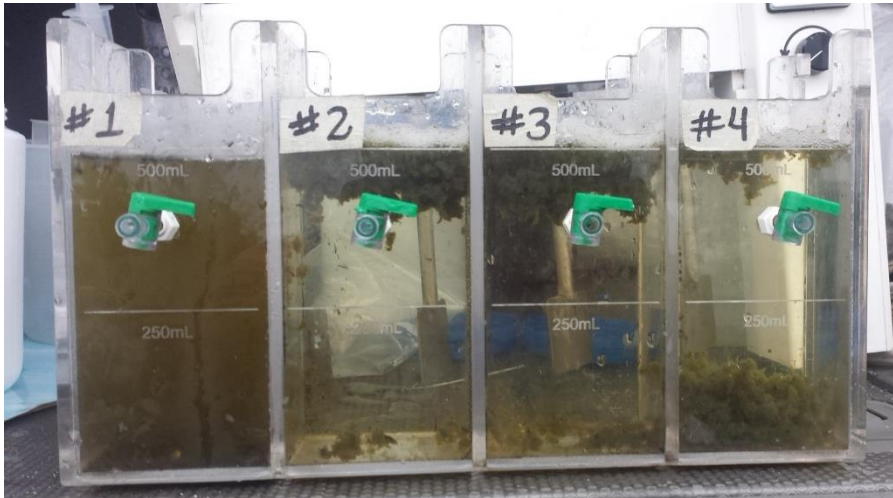
- Resultados

- Dosis óptima de coagulante

ppm Coagulante	ppm Floculante	Ponderación 0-3
100	20	2 = bueno
200	20	2 = bueno
300	20	1 = regular
400	20	1 = regular
500	20	2 = bueno
600	20	2 = bueno
700	20	3 = óptimo
800	20	3 = óptimo

Continuación de apéndice 6.

- Dosis óptima de coagulante

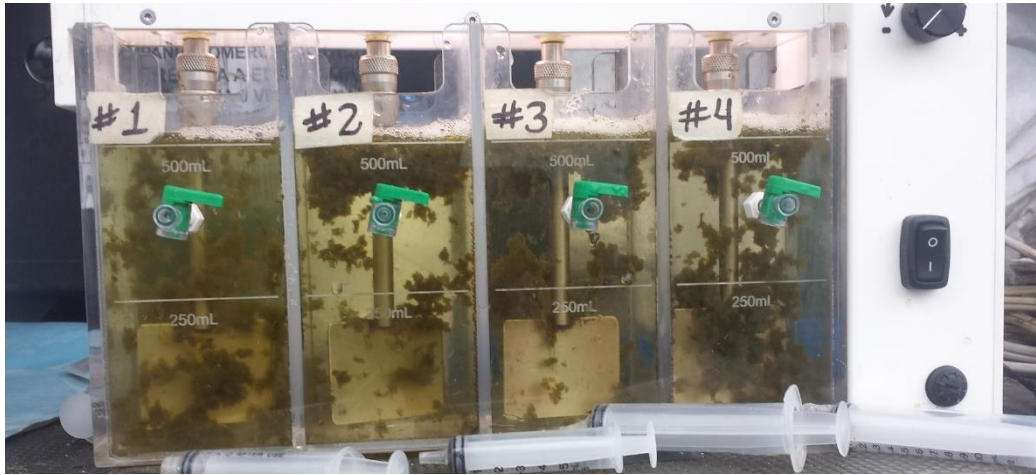


- Dosis óptima de floculante

ppm Coagulante	ppm Floculante	Ponderación 0-3
800	10	2 = bueno
800	20	1 = regular
800	30	3 = óptimo
800	40	3 = óptimo

Continuación de apéndice 6.

- Dosis óptima de floculante



- Conclusiones de ensayo prueba de jarras
 - Para el tratamiento fisicoquímico de las aguas residuales provenientes del área de lavado de recipientes de productos agroquímicos de una industria de exportación de semillas se debe dosificar 800 ppm de agente coagulante y 40 ppm de agente floculante tipo catiónico.

Fuente: elaboración propia.

