



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE
METODOLOGÍA COMPLEMENTARIA PARA LA REDUCCIÓN DE FÓSFORO EN UNA
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA INDUSTRIA DE BEBIDAS**

Elena María Pineda Suárez

Asesorado por el M.A. Ing. Byron Estuardo Roldán Flores

Guatemala, abril de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE
METODOLOGÍA COMPLEMENTARIA PARA LA REDUCCIÓN DE FÓSFORO EN UNA
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA INDUSTRIA DE BEBIDAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ELENA MARÍA PINEDA SUÁREZ

ASESORADO POR EL M.A. ING. BYRON ESTUARDO ROLDÁN FLORES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA AMBIENTAL

GUATEMALA, ABRIL DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

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

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
EXAMINADORA	Dra. Casta Petrona Zeceña Zeceña
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez



EEPFI-PP-0025-2022

Guatemala, 12 de enero de 2022

Director
Williams G. Álvarez Mejía
Escuela De Ingeniería Química
Presente.

Estimado Ing. Álvarez

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.

El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE METODOLOGÍA COMPLEMENTARIA PARA LA REDUCCIÓN DE FÓSFORO EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA INDUSTRIA DE BEBIDAS**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Gestión Ambiental - Gestión y Tratamiento del Agua - Tratamientos avanzados de tratamiento de agua**, presentado por la estudiante **Elena Maria Pineda Suarez** carné número **200611191**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en ARTES en Energía Y Ambiente.

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

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Byron Estuardo Roldán Flores
Ingeniero Químico
Colegiado No. 2194

Mtro. Byron Estuardo Roldán Flores
Asesor(a)

Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador(a) de Maestría



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





EEP.EIQ.0025.2022

El Director de la Escuela De Ingenieria Quimica de la Facultad de Ingenieria de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE METODOLOGÍA COMPLEMENTARIA PARA LA REDUCCIÓN DE FÓSFORO EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA INDUSTRIA DE BEBIDAS**, presentado por el estudiante universitario **Elena Maria Pineda Suarez**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingenieria en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Williams G. Álvarez Mejía
Director
Escuela De Ingenieria Quimica

Guatemala, enero de 2022

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

LNG.DECANATO.OI.263.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE METODOLOGÍA COMPLEMENTARIA PARA LA REDUCCIÓN DE FÓSFORO EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA INDUSTRIA DE BEBIDAS**, presentado por: **Elena María Pineda Suárez** , después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, abril de 2022

AACE/gaoc

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE
METODOLOGÍA COMPLEMENTARIA PARA LA REDUCCIÓN DE FÓSFORO EN UNA
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA INDUSTRIA DE BEBIDAS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 21 de agosto de 2021.



Elena María Pineda Suárez

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	De quien procede la inspiración, esperanza, alegría, paz y Fe en todo momento.
Mis padres	Porque cada logro es para que lo disfrutemos juntos.
Mis hermanos	Ilse y Francisco Pineda, para que juntos sigamos alcanzando nuestras metas.
Mis abuelos	Julio Suárez (q. d. e. p.), María Elena Figueroa, porque comparto con ustedes este logro, han sido ejemplo de sabiduría y amor.
Familia y amigos	Por siempre acompañarme en cada etapa de mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la <i>alma mater</i> que me permitió acceder a la educación universitaria.
Facultad de Ingeniería	Por proporcionarme los conocimientos que han sido la base de mi criterio profesional.
Embotelladora de bebidas	Por la apertura para realizar esta investigación y proporcionar los recursos necesarios.
Mis amigos	Carmen Ponce, Heydy Godínez, Jorge Santacruz y Kenny Marcos por su apoyo en todos los cursos de la carrera.
Mi asesor	M.A. Ing. Byron Roldán, por el tiempo y guía dedicado a esta investigación.
Byron Roldán	Por animarme y acompañarme con su amor en todo momento y hacer de este un proyecto compartido.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIII
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	5
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
3.1. Descripción del problema	10
3.2. Formulación del problema	10
3.3. Delimitación del problema	11
4. JUSTIFICACIÓN	13
5. OBJETIVOS	15
5.1. General	15
5.2. Específicos	15
6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN	17
7. MARCO TEÓRICO	19
7.1. Calidad del agua	19
7.1.1. Aguas residuales industriales	19

7.1.2.	Aguas residuales en la industria de bebidas.....	20
7.1.3.	Parámetros de caracterización para el agua industrial.....	23
7.2.	Nutrientes en el agua	25
7.2.1.	Nitrógeno.....	25
7.2.2.	Fósforo	26
7.3.	Tratamiento de aguas residuales en la industria de bebidas... ..	26
7.3.1.	Cribado y homogeneización.....	27
7.3.2.	Neutralización	27
7.3.3.	Tratamiento biológico aeróbico	28
7.3.4.	Membranas de ultrafiltración.....	28
7.3.5.	Deshidratación de lodos.....	29
7.3.6.	Disposición final	30
7.4.	Precipitación química	30
7.4.1.	Sulfato de aluminio.....	31
7.4.2.	Sulfato ferroso.....	32
7.4.3.	Cloruro férrico	32
7.4.4.	Hidroxicloriguro de aluminio.....	33
7.5.	Marco legal.....	33
7.5.1.	Acuerdo gubernativo 236-2006.....	33
7.5.2.	Parámetros de descarga de agua residual	34
7.5.3.	Recirculación interna de agua.....	35
7.6.	Sustentabilidad.....	36
7.6.1.	Economía circular	36
7.6.2.	Partes interesadas	37
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	39
9.	METODOLOGÍA	43

9.1.	Características del estudio	43
9.2.	Unidades de análisis	44
9.3.	Variables	44
9.4.	Fases del estudio	46
9.4.1.	Fase 1 revisión bibliográfica: Parámetros de calidad de agua en la industria de bebidas	46
9.4.2.	Fase 2 experimental: Tratamiento fisicoquímicos para reducción de fósforo.....	46
9.4.3.	Fase 3 experimental: Optimización en el uso de químicos para el tratamiento del fósforo	46
9.4.4.	Fase 4 interpretación de información: En función de los resultados analizar la factibilidad	47
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS S DE LA INFORMACIÓN	49
11.	CRONOGRAMA.....	51
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	53
13.	REFERENCIAS.....	55

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diagrama de flujo de los procesos en la industria de bebidas.....	22
2.	Bacterias utilizadas para el tratamiento biológico.....	28
3.	Mecanismo de coagulación.....	31

TABLAS

I.	Límites máximos permisibles de descargas de aguas residuales al alcantarillado público.....	35
II.	Variables del estudio.....	44
III.	Caracterización de calidad de agua con el tratamiento actual.....	45
IV.	Resultados de calidad de agua aplicando distintos coagulantes.....	45
V.	Cronograma	51
VI.	Recursos necesarios para la investigación.....	53

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
°C	Grados Celsius
=	Igual que
kW	Kilovatio
>	Mayor que
m	Metro
m^3	Metro cúbico
m^3/s	Metro cúbico por segundo
mm	Milímetro
%	Porcentaje
pH	Potencial de hidrógeno
Q	Quetzales
T	Temperatura
NTU	Unidad nefelométrica de turbidez
u.e.	Unidades específicas

GLOSARIO

Aspecto ambiental	Es un elemento que deriva de la actividad de la organización y que tiene contacto o puede interactuar con el medio ambiente.
Ciclo de producción	Conjunto de actividades y procedimientos que se realizan para transformar materia prima a un producto terminado.
COT	Carbono Orgánico Total.
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno.
DQO	Demanda Química de Oxígeno.
Ecualizar	Ajustar caudales fluctuantes en un tanque o espacio físico.
Estándar	Que sirve de modelo o referencia para medir o valorar un resultado.
GRB	<i>Glass Returnable Bottle</i> (Botella de vidrio retornable).
Homogeneizar	Proceso de mezcla, en donde se obtienen las mismas propiedades en toda la sustancia analizada.

Inocuidad	Existencia y control de peligros establecidos para evitar daño al consumidor en la industria alimenticia.
Línea base	Conjunto de datos de referencia para previo a realizar un cambio para evaluar su eficacia.
Lodos activados	Tratamiento secundario biológico en una planta de tratamiento de agua residual.
MBR	<i>Membrane Bioreactor</i> (Reactor biológico de membrana de ultrafiltración).
MLSS	<i>Mixed Liquor Suspended Solids</i> (Licor mezclado de sólidos suspendidos).
PET	Tereftalato de Polietileno.
pH	Potencial de Hidrógeno.
Precipitación	Obtención de un sólido a partir de una disolución.
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.
Saneamiento	Elemento clave en el ciclo de producción para garantizar la limpieza de equipos y tuberías y así evitar la contaminación cruzada entre productos u otros.
SDT	Sólidos Disueltos Totales.

SST

Sólidos Suspendidos Totales.

TPM

Transmembrane Pressure (Presión transmembrana)

RESUMEN

La precipitación química a través de coagulantes con sales alumínicas y férricas ha sustituido metodologías de aplicación de cal en el tratamiento del fósforo en el agua residual por sus altas eficiencias, por la menor producción de lodos y porque se realiza a través de procesos menos corrosivos.

Cada proceso de tratamiento de agua residual tiene características únicas, y cuando se cuenta con una planta de tratamiento que se ha diseñado con una línea base de calidad de agua, que ha cambiado a través de tiempo, se requiere un análisis cuidadoso para que el proceso de tratamiento añadido sea integrador y que no afecte las otras etapas.

El presente diseño de investigación tiene como objetivo determinar el tipo de coagulante que es más efectivo para la remoción de fósforo, así como la concentración que es factible operativa y económicamente en la infraestructura actual de una planta de tratamiento de agua residual en la industria de bebidas.

1. INTRODUCCIÓN

La industria de alimentos juega un rol importante en la economía de un país, porque garantiza el acceso a una gran variedad de productos, así como, es uno de los sectores que provee una importante cantidad de empleos a nivel nacional, en la actualidad existe una evolución constante a nivel político, económico y social en donde el tema ambiental ha tomado relevancia, no como en años anteriores, en donde se tenía una perspectiva que la industria no era compatible con la sostenibilidad ambiental, sino por el contrario, en donde son los agentes protagónicos para alcanzar los objetivos de desarrollos sostenible de manera integral.

Es por ello que los factores externos dejaron de ser el principal motivador para establecer programas de mejora que impacten positivamente el ambiente, ahora se enfocan también la continuidad de negocio, el valor de las marcas y el rol tan importante que tienen las partes interesadas en los Sistemas de Gestión de una organización.

El uso del agua, es inherente a la producción de bebidas, cumple varios objetivos, desde convertirse en producto terminado hasta su papel en el lavado de botellas retornables, alimentación a los sistemas de calderas, actividades de limpieza en la instalación, entre otras. Toda el agua que no finaliza su ciclo como producto terminado se convierte en agua residual industrial, que previo a disponerse pasa por un proceso de tratamiento que permite que esté en cumplimiento legal, así como de otros estándares aplicables.

En este tipo de industria el proceso de tratamiento del agua residual usualmente es continuo y en las etapas en las que se requiere una acción biológica, se cubre el tiempo de retención con espacio físico, generalmente en tanques de tratamiento. Una característica importante en los sistemas biológicos es el rango de operación, por lo que existen etapas de homogeneización y ecualización de flujos esto porque los organismos no son selectivos, además de necesitar condiciones mínimas de sobrevivencia, la colonia se adecua a concentraciones de nutrientes que les es posible degradar.

Debido a la centralización de descarte de producto fuera de norma de la misma industria, así como, la variabilidad en las características del agua que ingresa a la planta de tratamiento se requiere diseñar un método complementario que permita degradar el fósforo adicional agregado, en cuyo objetivo se basa la presente investigación y para el cual se cuenta con el apoyo de la embotelladora con los recursos e instalación necesarios para su desarrollo.

La metodología complementaria se desarrollará a través de ensayos con diferentes coagulantes identificando el que tiene mayor impacto en la reducción del fósforo con el menor impacto en otros parámetros de calidad de agua y en una segunda fase se determinará la concentración óptima tomando en cuenta la factibilidad técnica, operativa y económica. En el ámbito de estudio de tratamiento de agua estas son alternativas utilizadas, sin embargo, cada industria tiene un tipo de agua residual con características únicas por lo que las etapas de tratamiento tendrán rangos operativos específicos, así como el tipo y cantidad de químicos añadidos, además, que se incorporará post diseño de la instalación por lo que, la presente investigación es original y proporcionará una guía para el tratamiento selectivo del fósforo.

La investigación proporcionará un marco teórico abordando temas de calidad de agua en la industria de bebidas, las características más importantes de los nutrientes, las etapas de tratamiento utilizadas y propuestas, así como su interrelación con el desarrollo sostenible. Con base en la información teórica, se realizará una fase experimental, que permitirá un análisis técnico y financiero para determinar la factibilidad de la integración en el tratamiento actual.

2. ANTECEDENTES

El agua es vida y es importante para cualquier actividad humana y para el ciclo de producción para diferentes industrias. En la industria de bebidas, es parte de la materia prima y es utilizada en procesos de lavado de botellas, limpieza y otros integralmente.

El reciclaje, la recirculación y reuso del agua siguen siendo un factor crítico para el uso sostenible del recurso, para las industrias de alimentos y bebidas. El tipo de proceso impacta el agua principalmente con carga orgánica (Alman, 2007).

La misma puede ser tratada por medio biológico con altas eficiencias. Este es un recurso importante para la continuidad de negocio en este giro industrial, por ello, toma relevancia no solo en la arista de disposición final adecuada de los desechos y residuos generados y también desde el aspecto ambiental y el impacto hacia las partes interesadas en una organización.

En el estudio, Evaluación de un sistema de tratamiento de aguas residuales no domésticas para la remoción de carga orgánica en industria de bebidas no alcohólicas, Velasco (2019), remarcan que la caracterización de las aguas residuales es fundamental, siguiendo una metodología adecuada para garantizar la representatividad de la muestra, así como el tener en cuenta parámetros de referencia para evaluar los resultados.

Una caracterización será única para cada ciclo de producción y gestión del agua residual, porque impacta la planificación de la producción de la industria analizada, así como el volumen, tipos de línea dentro de la planta de producción, así como las características de diseño del tratamiento implementado.

También, Velasco (2019) indica, que en la industria de bebidas la determinación de bionutrientes como el caso del nitrógeno y fósforo son importantes para entender la oxidación bacteriana. Para cada uno de estos componentes su forma predominante es orgánica promoviendo ciclos de descomposición. Al estar en presencia de oxígeno se vuelven parte de la actividad aeróbica del proceso. En el proceso analizado cuando el fósforo ingresa en mayor cantidad a la media operativa, queda un residual que aún requiere ser tratado.

En la industria evaluada, se cuenta con un sistema de tratamiento de aguas residuales que incluye un pretratamiento a través del cribado a diferentes tamaños de partícula y de homogeneización, un tratamiento primario de neutralización, permitiendo que los parámetros varíen en un rango adecuado y establecido, para que la degradación aeróbico-biológica sea posible. Este último, tiene énfasis en la reducción de nutrientes, posteriormente a través de tecnología de ultrafiltración (MBR) se facilita la separación del lodo producido en los tanques biológicos para pasar a una etapa de deshidratación de los mismos. La planta se diseñó en función de una línea base y con el objetivo de alcanzar los parámetros regulatorios e internos de la corporación que en el mediano plazo evolucionarán a procesos de recirculación.

En el estudio, Tratamiento multietapa EGSB/MBR de aguas residuales en la industria de bebidas, Sheldon (2015), concluyen que las membranas de filtración se evalúan de forma complementaria en el tratamiento para facilitar el posible reúso del agua. La eficiencia de este tipo de tratamiento es 94 % para el DQO y COT y del 98 % para el DBO. Esto permite pensar que al optimizar el tratamiento existe una posibilidad de recirculación del recurso.

El fósforo en el agua se encuentra como fosfatos, las sales metálicas muestran efectividad para tratarlo en el agua residual, cumpliendo condiciones adecuadas de pH, dosificación y concentración de los agentes precipitantes. La efectividad en condiciones óptimas para la remoción de los fosfatos es del 90 % para el óxido de calcio, 85 % para el sulfato de aluminio, y con los sulfatos de hierro la efectividad es del 80 %. La mezcla de estos químicos no aumenta la efectividad (Nassef, 2012).

Con base a esta evidencia, la precipitación química es una gran alternativa para la remoción del fósforo mostrando además de su efectividad que es menos corrosiva que otras alternativas y produce menor cantidad de lodos. A su vez esta será una ruta de tratamiento en la que se evaluará su eficiencia en la planta de tratamiento estudiada (Nassef, 2012).

Lara (2002), en su investigación detalló eficiencias relacionadas a la remoción de fósforo en función de dosis de coagulantes y determinó,

Que no hay acción significativa sobre el contenido de nitrógeno, potasio ni los oligoelementos considerados mientras que en el caso del fósforo se evidenció una reducción entre el 21 % y 57 % de fósforo total, 25 % al 76 % del fósforo orgánico y 14 % al 55 % de ortofosfatos, en función de la dosis

de coagulante utilizada y la concentración de entrada en las condiciones estudiadas. (p. 18)

Existen otros tratamientos selectivos para el tratamiento del fósforo, por ejemplo, la electrocoagulación. Según Castro (2012), determinó que este proceso tiene una efectividad del 82.5 %, sin embargo, el costo por metro cúbico triplica el costo base promedio de la Planta en cuestión, entonces, no se considera factible en el contexto actual de operación.

Esto permite pensar que es posible establecer un tratamiento complementario al existente en la Planta de Tratamiento actual en donde se remueva de forma selectiva el fósforo como parámetro de interés. Las características de una matriz de agua residual son únicas en cada sistema operativo por lo que con base en esta información se debe determinar la adecuación de estas metodologías, su eficiencia en el tratamiento y factibilidad operativa y económica.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad la industria ha evolucionado, gestionando integralmente los recursos con base a una evaluación de aspectos e impactos ambientales. En la industria de bebidas uno de los recursos más importantes es el agua por lo que los esfuerzos están enfocados en la optimización de su uso así como garantizar su adecuada disposición final.

- Contexto general

En la empresa en la que se realizará el estudio, se cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales, con diseño industrial que cuenta con las etapas de separación de sólidos, tratamiento biológico y separación de lodos por membranas de ultrafiltración. Su objetivo es garantizar la calidad de agua en la descarga, así como dar cumplimiento al Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos y otros requisitos aplicables (Acuerdo Gubernativo 236-2006, 2006).

En Guatemala, el Acuerdo Gubernativo 236-2006 tiene como objeto establecer los criterios y requisitos que deben cumplirse para la descarga y reúso de las aguas residuales, a través del mejoramiento de las características de dichas aguas; esto para proteger los cuerpos de aguas receptores y promover el desarrollo del recurso hídrico con visión de gestión integrada.

3.1. Descripción del problema

La matriz de ingreso a la planta de tratamiento ha cambiado a través del tiempo y se estima un aumento en la concentración de fósforo, que potencialmente requerirá tratamiento, este nutriente tiene características eutrofizantes y está regulado actualmente con base en la tercera etapa de reducción en el artículo 28 del Acuerdo Gubernativo 236-2006 a 20 mg/l, parámetro que para el 2,024 será de 10 mg/l. Por lo que el objeto del presente estudio es determinar una metodología que se recomiende en el contexto ambiental y operativo para el tratamiento de dicho nutriente y garantizar las condiciones de la descarga del agua residual en el contexto ambiental, legal y de estándares internacionales. Cabe mencionar que la planta de tratamiento actualmente está en cumplimiento y el enfoque de estudio es preventivo en función de las condiciones futuras esperadas de la organización.

3.2. Formulación del problema

- Pregunta central

¿Existe una metodología adecuada que se pueda integrar para el tratamiento del fósforo en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales en la industria de bebidas?

- Preguntas auxiliares

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

- ¿Con qué tipo de coagulante se obtiene mejor calidad de agua en la planta de tratamiento de aguas residuales en una industria de bebidas?
- ¿Qué cantidad de coagulante permite obtener mejor calidad de agua en la planta de tratamiento de aguas residuales en una industria de bebidas?
- ¿Qué cantidad de coagulante permite obtener mejor calidad de agua en la planta de tratamiento de aguas residuales en una industria de bebidas sin afectar otros parámetros de calidad de agua?
- ¿Qué cantidad de coagulante permite obtener mejor calidad de agua en la planta de tratamiento de aguas residuales en una industria de bebidas y es factible económicamente?

3.3. Delimitación del problema

Según la Memoria de Cálculo de la Planta de Tratamiento de Agua Residual Tecnología MBR, FICIT (2015), menciona que en la línea base analizada para el agua de entrada se obtuvo <10 mg/l de fósforo como resultado, tomando en cuenta la legislación vigente en el país, no se consideró un enfoque alrededor de este parámetro en el diseño, porque se encontraba desde la entrada en un nivel inferior al permitido, por lo tanto, en cumplimiento. Únicamente se analizó como un elemento necesario para el funcionamiento de las bacterias en el tratamiento biológico porque es necesario en mínimas cantidades para la sobrevivencia del medio biológico.

Siendo esta una de las principales causas en donde no se previó cambios futuros en las características del agua de entrada. Actualmente adicional al agua tratada proveniente de la planta de producción, se trata el producto no conforme mismo que aumenta la cantidad de fósforo en el agua de entrada. Otros factores a considerar son la variabilidad de otros parámetros provenientes de la operación, así como del caudal de entrada, y que no se trata de forma directa. Se aplica un polímero cuya función es facilitar la deshidratación de lodos pero no incide en la matriz de descarga del agua residual.

Las consecuencias de estas causas identificadas pueden reflejarse en una inversión en una planta de tratamiento aunque no sea necesaria, un tratamiento inefectivo, que potencialmente degrade la calidad de agua o bien limitar la capacidad de tratamiento de la misma.

Esto lleva a plantear la pregunta principal de este estudio, ¿Existe una metodología adecuada que se pueda integrar para el tratamiento del fósforo en la planta de tratamiento de aguas residuales en la industria de bebidas?

4. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación se justifica en las directrices de la Escuela de Postgrado en la Maestría de Energía y Ambiente, en la sección de sistemas avanzados de tratamiento de agua, gestión y tratamiento del agua, porque se analizarán metodologías complementarias para el tratamiento del fósforo en una planta de tratamiento que opera en cumplimiento de parámetros de descarga, pero que con base en la tendencia y cambios a futuro en las características de entrada este tratamiento será necesario para la gestión ambiental sostenible del agua residual.

Uno de los principales aportes de este estudio, será proporcionar una guía clara de acción para el mejoramiento de calidad de agua que podrá ser aplicable como una metodología complementaria en cuanto a la reducción de este nutriente.

Esta evaluación, beneficiará a la empresa clarificando el panorama en cuanto la factibilidad de actualizar y complementar el tratamiento existente, así mismo las matrices de efluentes industriales con carga orgánica tendrán referencia con base a este estudio. En relación con el medio ambiente, se establecen posibles metodologías que podrían permitir el mejoramiento de la calidad del agua para evaluar la factibilidad en cuanto a la recirculación y así impactar positivamente el balance hídrico.

Así mismo, la organización se prepara para cualquier necesidad en cuanto al aumento del fósforo en su matriz de entrada, sin tener que construir una planta de tratamiento nueva, si no, a través de la mejora de la instalación actual se

mantendría en todo momento en cumplimiento legal, adicional, se genera un factor competitivo en donde el valor de marca prevalece haciendo siempre lo correcto de forma proactiva y con base científica.

Permitirá aplicar los conocimientos adquiridos durante la formación académica, así como experiencia profesional y plasmarlos generando una propuesta de valor ambiental.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Evaluar metodologías complementarias para el tratamiento del fósforo en la planta de tratamiento de aguas residuales en una industria de bebidas y su factibilidad de implementación.

5.2. Específicos

- Determinar el tipo de coagulante que permite mejorar la calidad de agua respecto al fósforo con mayor eficiencia.
- Determinar si la cantidad de coagulante añadido tiene relación con la mejora de la calidad del agua respecto al fósforo.
- Comprobar si existe una diferencia en los otros parámetros de calidad del agua al añadir coagulante al proceso, y si existe, determinar su impacto.
- Determinar la factibilidad económica de la incorporación del tratamiento complementario en el proceso.

6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

A partir del presente estudio se evaluará el proceso de tratamiento de fósforo de una manera selectiva y complementaria y en qué medida este proceso incide en la mejora de calidad de agua en el punto de descarga. Mediante la investigación se podrá concluir si el tratamiento fisicoquímico es factible a nivel operativo y económico. Es importante mencionar que las características de operación de cada planta de producción son únicas así como el diseño de la planta de tratamiento actual y en este contexto no existe investigación al respecto.

La necesidad de mejorar la eficiencia del fósforo es debido a los cambios que a través del tiempo tendrán las características del agua de entrada, así como la reducción paulatina establecida para límite del fósforo permitido en la legislación local. Además, el fósforo presente en el agua residual tiene un potencial de eutrofización en los cuerpos de agua, al reducirlo se mitiga el potencial impacto ambiental.

El presente estudio aportará información que promueve las buenas prácticas reflejando el compromiso ambiental de la organización no sólo al cumplimiento legal, sino permitirá evaluar la recirculación del agua, de estándares internacionales y permitirá evaluar el reúso del agua para ciertas actividades complementarias en la organización. Establecerá una guía práctica para la implementación de mejora en industrias afines, incluyendo bases técnicas y económicas.

Al determinar lo anterior, se estará mejorando la eficiencia del tratamiento impactando en la calidad del agua. El tratamiento de aguas residuales a nivel industrial es clave en la agenda local para garantizar la mejora paulatina del entorno ambiental a nivel nacional, pero, sobre todo, en la cuenca del Lago de Amatitlán que se ubica, en la Ciudad de Guatemala, misma que tiene impactos significativos. Existen esfuerzos continuados por establecer correcciones a nivel ecológico general, sin embargo, este estudio pretende abordar la descarga residual como un compromiso ambiental y social para el país promoviendo la sustentabilidad.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Calidad del agua

El agua forma parte fundamental de los diferentes ecosistemas en la Tierra y a su vez de la dinámica del ser humano y por ende de la industria.

Los cuerpos de agua en la Tierra están interconectados a través del ciclo hidrológico, desde la atmósfera hasta los océanos. Los cuerpos de agua que hay en la tierra son; ríos, lagos y aguas subterráneas. Existen también cuerpos transitorios; embalses, ciénagas y estuarios (Sierra, 2011).

En su libro *Calidad del agua: Evaluación y diagnóstico*, Sierra (2011), destaca que la disponibilidad y buena calidad del agua son de las principales necesidades de cualquier población y que esta rama de la Ingeniería tendrá como principal objetivo diagnosticar los problemas relacionados así como evaluar las variables que tienen impacto en la misma.

Por tanto la calidad de agua estará definida por la expectativa de uso en la cual se basa la creación de diferentes estándares y criterios de aceptación.

7.1.1. Aguas residuales industriales

En el Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos, se define el agua residual como “las aguas que han recibido uso y cuyas cualidades han sido modificadas” (Acuerdo Gubernativo 236-2006, 2006, p. 2).

En este reglamento se hace una diferenciación entre aquellas de tipo ordinario y especial, quedando en esta última categoría las aguas residuales de tipo industrial a las que se hará referencia en el presente documento como resultado de su uso en la industria de bebidas.

7.1.2. Aguas residuales en la industria de bebidas

Cada tipo de industria aplicará procesos diferentes para la obtención del producto terminado.

El análisis de las etapas de producción considerando la materia prima, operaciones unitarias de transformación y diseño del producto terminado permite estimar el contenido y tipo de materia orgánica a tratar, lo que dará pautas para el tratamiento que se requerirá para el cumplimiento de calidad de agua en función de la regulación aplicable o el objetivo que se desea alcanzar (Alemán, 2016).

La producción de bebidas, inicia con la obtención del agua, su tratamiento que generalmente incluye procesos de ósmosis inversa, la preparación de jarabes a partir de azúcares, sales y/o concentrados, lavado o soplado de botellas, el proceso de envasado, paletizado y despacho hacia centros de distribución.

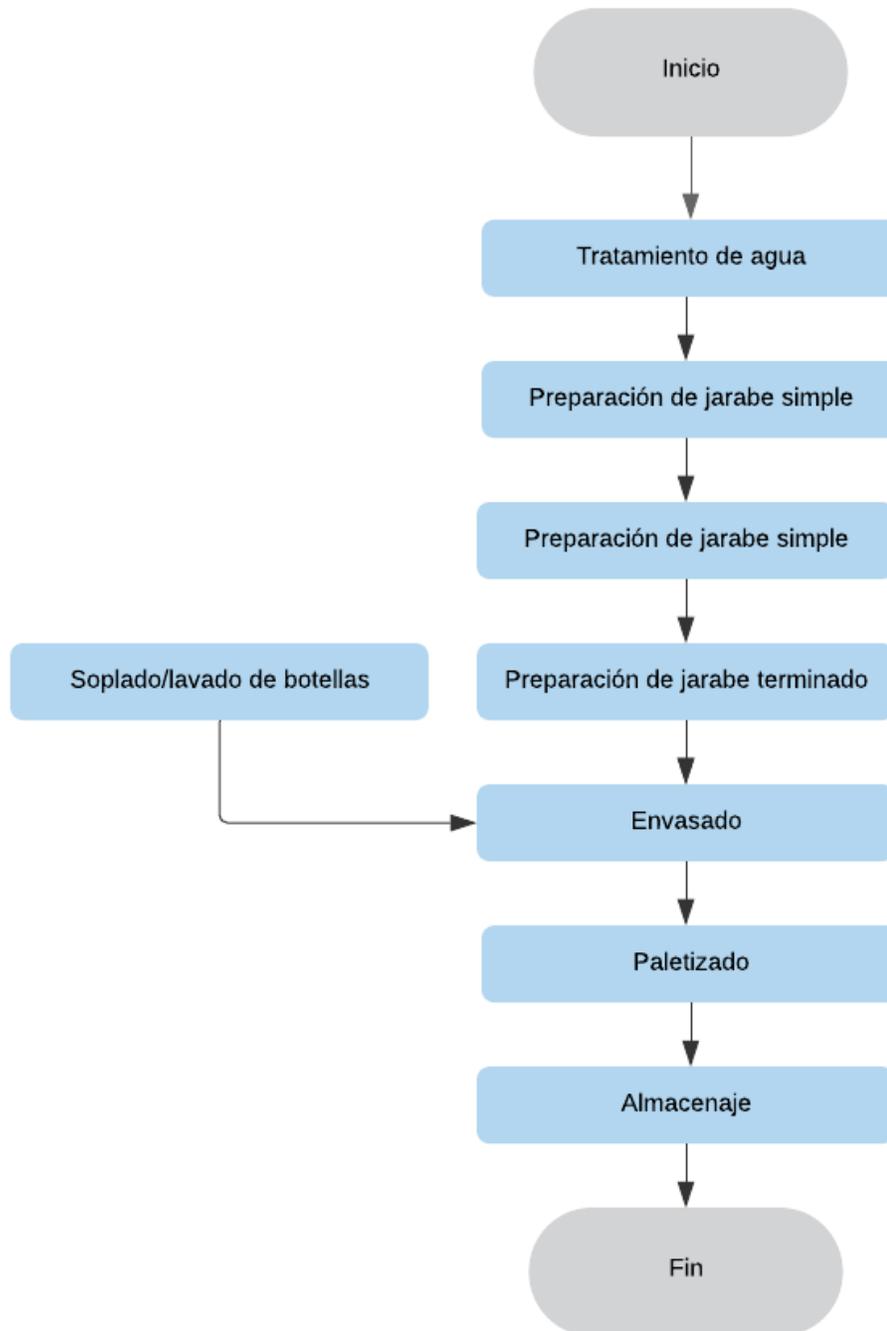
Adicional al proceso de producción existen procesos en paralelo, que tienen como objetivo garantizar la inocuidad de los productos, estos a su vez generan agua residual, entre estos se destaca los saneamientos de línea y equipos en los que se utilizan detergentes alcalinos, ácidos y desinfectantes. También aquellos de equipos auxiliares que proveen servicios a la operación.

Las bebidas no alcohólicas, tienen un volumen mayoritario de agua estimado en un 90 % o superior, con características de pH ácido entre 2.5 y 4 u. e. , y con 1.5 a 4 volúmenes de dióxido de carbono (Azeredo, 2016).

Las aguas residuales después de estos procesos contienen principalmente carbohidratos como azúcar, también aditivos y colorantes. El azúcar residual suele ser el mayor contribuyente al DBO (demanda bioquímica de oxígeno).

El agua residual será una combinación de residuos de las materias primas, descarte de los procesos productivos y aquellos asociados a inocuidad, así como de producto terminado.

Figura 1. Diagrama de flujo de los procesos en la industria de bebidas



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

7.1.3. Parámetros de caracterización para el agua industrial

Los parámetros a analizar se determinan en función de las características propias de cada industria así como de los parámetros de referencia a utilizar como criterios de aceptación para la descarga. A continuación se describen algunos de estos parámetros.

El pH (potencial de hidrógeno), se analiza frecuentemente en la química del agua, prácticamente cada fase del abastecimiento y tratamiento de las aguas residuales, por ejemplo, neutralización ácido-base, precipitación, coagulación, entre otros. dependen del pH (Baird, 2017).

El pH es importante porque en el tratamiento biológico las bacterias tendrán ciertos parámetros de tolerancia para sobrevivir y también este es un parámetro de descarga que en la legislación guatemalteca es de 6 a 9 u. e. (Acuerdo Gubernativo 236-2006, 2006).

La temperatura determina la dirección de flujo del calor, desde una temperatura alta hacia una más baja. Las escalas utilizadas son Celsius y Kelvin (Brown, 2004).

En la química del agua toma relevancia porque otros parámetros tendrán relación directa con la temperatura y de igual manera será uno de los parámetros de descarga referido en el artículo 28 del acuerdo gubernativo como $< 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ Acuerdo Gubernativo 236-2006, 2006).

Las bajas temperaturas afectan procesos de coagulación y floculación al alterar la solubilidad del coagulante, aumentar la viscosidad del agua y retrasar la cinética de las reacciones de hidrólisis y floculación de las partículas. Por ello, es un parámetro a considerar en los procesos de tratamiento (Malachy, 2015).

La alcalinidad se refiere a la capacidad de neutralización de ácidos del agua, y se refiere a la capacidad de amortización del agua. Está relacionada con el pH, por tanto, a mayor alcalinidad un mayor pH. Los coagulantes metálicos son ácidos y consumirán la alcalinidad en su reacción con el agua y podrían influir con la calidad del tratamiento (Malachy, 2015).

La cantidad y tipo de turbidez en el agua tiene un efecto significativo en la eficiencia de la coagulación. La alta turbidez requerirá mayor cantidad de coagulante y la baja turbidez también puede ser ineficiente por la dificultad de inducir la colisión entre los coloides (Malachy, 2015).

Los sólidos suspendidos se basan en el incremento de peso que experimenta un filtro de fibra de vidrio, tras la filtración al vacío y secado posteriormente a peso constante entre 103 – 105 °C. Este parámetro incide directamente en la calidad de agua así como en la eficiencia del coagulante, cuya acción abarcará a estos sólidos.

En su estudio, Duarte (2015) evidencian un porcentaje importante de reducción de sólidos suspendidos utilizando sales de aluminio y hierro alcanzando hasta un 91.16 % con el hidroxiclورو de aluminio. A su vez, al remover sólidos suspendidos, se puede inferir que si existe residual de fósforo en éstas partículas, incidirá en el resultado de reducción total.

En este estudio los sólidos suspendidos no reflejarán una medida de la eficiencia del coagulante de forma directa ya que se realizará la evaluación en la etapa biológica en donde no se han separado los lodos generados.

Según el Acuerdo Gubernativo 236-2006 (2006) la demanda química de oxígeno es, “la medida indirecta del contenido de materia orgánica e inorgánica oxidable en aguas residuales, que se determina por la cantidad equivalente de oxígeno utilizando en la oxidación química” (p. 3).

En el presente estudio, aportará una visión global del comportamiento de la materia orgánica e inorgánica oxidable porque la metodología de determinación facilita la obtención del resultado para su análisis y evidenciará la calidad del agua de forma global.

7.2. Nutrientes en el agua

“El nitrógeno y el fósforo son los principales nutrientes y los de mayor importancia en el vertido de aguas residuales” (Lara, 2002, p. 16). Estos nutrientes tienen un potencial impacto ambiental ya que promueven la eutrofización de los diferentes cuerpos receptores, es por ello que también están considerados en la regulación que establece los criterios para la descarga residual.

7.2.1. Nitrógeno

La naturaleza del nitrógeno se basa en reacciones de óxido-reducción que en su mayoría son catalizadas por microorganismos, esto evidencia el potencial de su interacción biológica. Las principales reacciones son la oxidación del amonio a nitritos y después a nitratos, viceversa y las reacciones de

desnitrificación, fijación de nitrógeno y la incorporación del amonio a la materia orgánica que contiene nitrógeno, aminación, siendo esta última la única reacción que no es de óxido-reducción (Jenkins, 2004).

Estas características, confirman su facilidad de tratamiento a través de metodologías biológicas.

7.2.2. Fósforo

La química del fósforo en el agua se caracteriza por su predominancia como ortofosfatos. Las fuentes identificadas son su uso como anti-incrustante por su capacidad a complejante con el calcio y magnesio, así como el residual de materias primas utilizadas en el proceso. El tratamiento biológico secundario y el contacto prolongado con microorganismos, asegura la hidrólisis de los fosfatos condensados a ortofosfatos por ello su presencia mayoritaria (Jenkins, 2004).

Es por esta naturaleza que una de las metodologías de tratamiento será la precipitación de dichos compuestos.

7.3. Tratamiento de aguas residuales en la industria de bebidas

Algunas etapas para determinar un tratamiento de aguas residuales deben considerar la determinación de caudales, caracterización de las aguas a tratar, selección de los procesos de cada sistemas con sus parámetros de diseño, el diseño del tratamiento, su construcción y puesta en funcionamiento (Bermeo, 2016).

7.3.1. Cribado y homogeneización

El primer pretratamiento será el cribado, es una separación física que permitirá la remoción de sólidos con diferentes tamaños de partícula. Eliminando el material flotante y que además del impacto visual interfiere en el resto del tratamiento (Bermeo, 2016).

En la planta de tratamiento se consideran tres rejillas con diferentes micrajes; la primera y segunda es un sistema de rejillas inclinado con limpieza automática y la tercera es un sistema rotatorio en donde el cilindro retiene las partículas, y al posicionarse en la parte superior a través de chorros se remueven los restos y se depositan para su disposición correspondiente (FICIT, 2015).

La homogeneización también es un pretratamiento, esto se realiza posterior a los tres cribados, con el objetivo de facilitar la neutralización y el tratamiento biológico. Evitando picos de dosificación de químicos y manteniendo el medio al que las bacterias están adaptadas.

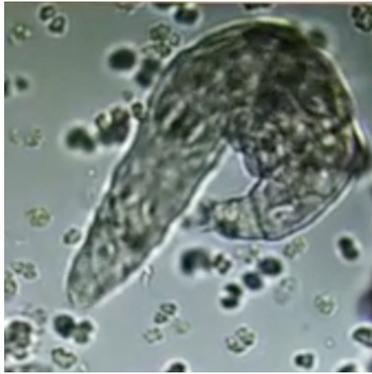
7.3.2. Neutralización

La siguiente etapa de tratamiento primario y químico es el de neutralización, las características del agua pueden variar, aunque se espera una tendencia ácida, es posible que los detergentes alcalinos utilizados en los saneamientos de las líneas impacten en las características del agua. Esto permitirá que se mantengan las condiciones que requieren para la sobrevivencia las bacterias. Los químicos utilizados son ácido clorhídrico e hidróxido de sodio.

7.3.3. Tratamiento biológico aeróbico

El tratamiento biológico elimina “los contaminantes biodegradables por medio de una biocenosis o comunidad de microorganismos principalmente bacterias y otros organismos mantenida en un ambiente que requiere un control especial” (Bermeo, 2016, p. 109).

Figura 2. **Bacterias utilizadas para el tratamiento biológico**



Fuente: [Fotografía de Elena Pineda]. (Ciudad de Guatemala, Guatemala. 2021).
Colección particular. Guatemala.

El tipo de tratamiento es aeróbico, ya que utiliza un caudal de aire para permitir el proceso de los microorganismos y su mezcla en donde se produce una masa activada que es capaz de estabilizar un residuo, lodo compuesto por células viejas y nuevas (Bermeo, 2016).

7.3.4. Membranas de ultrafiltración

Este es un tipo de tecnología “cuyo fundamento es la separación por diferencia de pesos moleculares y el tamaño de partícula” (Solís, 2017, p. 26).

En donde un grupo de membranas está sumergido en tanques, y utilizan bombas de succión para crear vacío, forzando la salida del agua tratada, permeada, por las mismas promoviendo la separación de los lodos utilizados en la fase biológica para el tratamiento.

Las ventajas más importantes de esta metodología en el tratamiento de agua residual en la industria es que se instala como un sistema continuo y el espacio que ocupan a diferencia de la decantación que sería el proceso que sustituyen (Solís, 2017).

El grado de remoción de fósforo depende no únicamente del coagulante agregado sino también de la metodología de separación sólido-líquido, ya que, los sólidos suspendidos aportan significativamente al fósforo total (Malachy, 2015).

En este caso la separación de ultrafiltración aporta a la reducción del fósforo porque elimina totalmente este tipo de partículas.

7.3.5. Deshidratación de lodos

El proceso de deshidratación de lodos es muy importante ya que permite determinar la cantidad y calidad de lodo que deberá disponerse como residuo del proceso de tratamiento. A pesar de la humedad contenida en el mismo ronda el 70 % permite su manipulación porque deja de ser totalmente líquido. Para ello se agrega cierta cantidad de floculante más la fuerza mecánica del equipo (Wambui, 2017).

Este proceso funciona de manera continua, sin embargo, se podrá regular la cantidad de lodo que se desea retirar de los tanques biológicos. Con el objetivo de mantener funcional el sistema.

7.3.6. Disposición final

Los lodos obtenidos del tratamiento del agua residual se deben disponer fuera de la instalación, los mismos tienen un gran potencial como fertilizantes porque conglomeran aquellos nutrientes removidos del agua. Esto es parte de las estrategias de economía circular en donde no se tienen residuos hacia el vertedero producto de este proceso (Kominko, 2018).

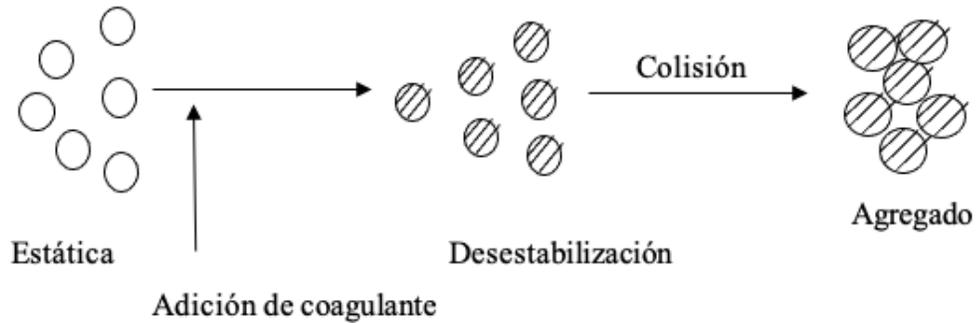
7.4. Precipitación química

La remoción del fósforo es un tema relevante en el tratamiento de agua, porque tiene un potencial eutrofizante además de estar regulado por las guías y directrices de descargas. Dentro de las aplicaciones tradicionales se encuentra la precipitación química (Ren, 2020).

La precipitación química para la remoción de fosfatos, que es la forma en la que se encuentra el fósforo en el agua, es confiable, ha sido ensayada y no ha cambiado a través del tiempo como una metodología estándar. Para lograr esta remoción, varias ayudas como coagulantes son agregadas donde reaccionan con los fosfatos solubles para formar precipitados que se remueven como sólidos (Nassef, 2012).

La transformación del fósforo soluble hasta un sólido se lleva a cabo en tres etapas, formación de núcleos de materia sólida, aparente precipitado y maduración (Nassef, 2012).

Figura 3. **Mecanismo de coagulación**



Fuente: Gregory (2006). *Partículas en agua: propiedades y procesos*.

En los procesos MBR las sales de hierro o aluminio se añaden normalmente a la mezcla de aguas residuales crudas o sedimentadas y lodos activados en su etapa de aireación (Zhang, 2014).

Otra de las ventajas de la precipitación química en esta etapa es el aporte en la reducción de la presión transmembrana, cuyas razones se atribuyen a la reducción de la carga orgánica en el supernadante y la formación de flóculos más grandes que limiten el bloqueo de los poros de las membranas (Holbrook, 2004).

7.4.1. Sulfato de aluminio

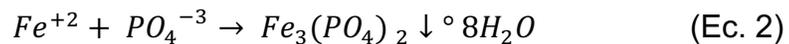
En el estudio de Nassef (2012) se define el sulfato de aluminio como una de las sales metálicas trivalentes más comunes utilizadas para la remoción de ortofosfatos, la reacción química que ocurre es:



En donde la relación estequiométrica es 0.87:1 de Al:P. Esto indica que por cada molécula de fósforo se requerirá 0.87 de aluminio. Las ventajas de este coagulante además de una eficiencia estimada de 85 %, es su bajo potencial de corrosión y que produce menos lodos que otros compuestos.

7.4.2. Sulfato ferroso

En su estudio Malachy (2015), considera el sulfato ferroso como uno de los coagulantes más eficientes para el tratamiento de agua. Identificó una eficiencia del 91.11 %, en condiciones óptimas, y que al aumentar la concentración la eficiencia aumenta. La reacción que ocurre es:

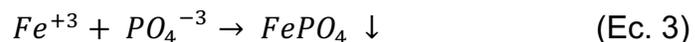


En donde la relación estequiométrica para hierro (II) es 2.7:1 de Fe:P.

Además, se identificó para la matriz estudiada una eficacia mayor que el sulfato aluminico en relación al fósforo. Según Li (2019), es ecológicamente más seguro.

7.4.3. Cloruro férrico

El cloruro férrico, posee un alto poder de formación de flóculos, tiene una alta eficiencia en la remoción de fosfatos, reducción de sólidos en suspensión, entre otros. Como uno de los coagulantes más eficientes para el tratamiento de agua. Ambas formas del hierro II y III, se combinan con el ortofosfato en las reacciones de precipitación (Duque, 2012).



En donde la relación estequiométrica para hierro (III) es 1.8:1 de Fe:P.

7.4.4. Hidroxicloruro de aluminio

Este coagulante, también llamado policloruro de aluminio, es utilizado para disminuir la turbidez y sólidos suspendidos con altas eficiencias. Es uno de los más económicamente factibles para el tratamiento del fósforo con eficiencias del 75.87 %, en condiciones operativas, proporcionando una buena alternativa porque también tiene incidencia en otros parámetros de calidad de agua (Duarte, 2015).

7.5. Marco legal

El marco legal proporciona las pautas de cumplimiento ambiental para garantizar la certeza jurídica de las operaciones, así como las guías ambientales que establecen una directriz con base en la agenda local. En Guatemala en el año 2006 se emitió el Acuerdo Gubernativo 236-2006, en el cual, se establecen los parámetros permitidos para calidad de agua previo a su descarga y parámetros para los lodos producidos como parte de los procesos de tratamiento previo a su disposición final.

7.5.1. Acuerdo gubernativo 236-2006

Esta ley basa su creación considerando la prevención de los efectos adversos al ambiente, así como dando vida a través de este Reglamento a la Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente. En ésta última se busca “mantener el equilibrio ecológico y la calidad del medio ambiente” (Acuerdo Gubernativo 236-2006, 2006, p. 1).

También considera que, a través de este Reglamento, se ejerce control aprovechamiento y uso de las aguas para prevenir impactos negativos en los cuerpos de agua y que también es un instrumento que ofrece certeza jurídica y que promoverá progresivamente la calidad de las aguas contribuyendo a la sostenibilidad Acuerdo Gubernativo 236-2006, 2006).

7.5.2. Parámetros de descarga de agua residual

En su artículo 28, el Acuerdo Gubernativo 236-2006 (2006) “establece los límites máximos permisibles de descargas de aguas residuales al alcantarillado público” (p. 14). Mismos que serán de referencia, puesto la planta tratamiento estudiada descarga al alcantarillado municipal y son producto de una instalación existente previo a la emisión de este reglamento.

Tabla I. **Límites máximos permisibles de descargas de aguas residuales al alcantarillado público**

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

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

7.5.3. Recirculación interna de agua

En su artículo 37, el Acuerdo Gubernativo 236-2006 (2006) establece que “todo ente generador podrá recircular las aguas residuales antes de que las mismas se viertan al cuerpo receptor. Dicha recirculación no se considerará como reuso [sic] ni estará sujeta a las disposiciones del presente reglamento” (p. 17).

7.6. Sustentabilidad

La definición de sustentabilidad ha ido evolucionando a través del tiempo y se ha convertido en un concepto integrador entre el ser humano y su entorno (Zarta, 2018).

La sustentabilidad en sentido amplio, puede ser entendida como la producción de bienes y servicios, donde se satisfagan las necesidades humanas y se garantice una mejor calidad de vida a la población en general, con tecnologías limpias en una relación no destructiva con la naturaleza, en la cual la ciudadanía participe de las decisiones del proceso de desarrollo, fortaleciendo las condiciones del medio ambiente y aprovechando los recursos naturales, dentro de los límites de la regeneración y el crecimiento natural. (Zarta, 2018, p. 423)

Es importante destacar que este concepto es transversal en las diferentes aristas y permite a la industria a su vez integrar sus estrategias que sean asequibles y que generen valor económico y ambiental.

7.6.1. Economía circular

Según Prieto-Sandoval (2017), “se ha convertido en un paradigma que busca el desarrollo sostenible, proponiendo diferentes estrategias en toda la cadena de producción y uso de los productos y servicios” (p. 85).

Se plantea como una alternativa, en donde objetos que están cerca del fin para su uso pueden convertirse en recursos o materias primas cerrando un ciclo en el ecosistema industrial reduciendo la producción de desechos (Stahel, 2016).

Inicialmente la economía circular se centraba en las materias primas enfocada a los materiales y de forma explícita no se tomaba en cuenta el agua. Sin embargo, actualmente se amplía su concepción a la esfera tecnológica o material, como a la esfera natural o biológica.

Es por ello que la recirculación de este recurso, para ciertos procesos en los que se cumpla la calidad de agua deseada será un elemento integrador dentro de estos conceptos que impactarán positivamente la reducción en el uso del agua.

7.6.2. Partes interesadas

Las partes interesadas son el conjunto de factores internos y externos que ejercen influencia sobre la organización.

En la actualidad el impacto en el tratamiento del agua excediendo estándares, promoviendo el reusó trasciende al impacto hacia afuera de la organización.

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

HIPÓTESIS

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO REFERENCIAL

1.1. Estudios previos (recientes)

1.2. Antecedentes

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Calidad del agua

2.1.1. Aguas residuales industriales

2.1.2. Aguas residuales en la industria de bebidas

2.1.3. Parámetros de caracterización para el agua industrial

2.2. Nutrientes en el agua

2.2.1. Fósforo

2.2.2. Nitrógeno

2.3. Tratamiento de aguas residuales en la industria de bebidas

2.3.1. Cribado y homogenización

- 2.3.2. Neutralización
- 2.3.3. Tratamiento biológico aeróbico
- 2.3.4. Membranas de ultrafiltración
- 2.3.5. Deshidratación de lodos
- 2.3.6. Disposición final
- 2.4. Precipitación química
 - 2.4.1. Sulfato de aluminio
 - 2.4.2. Sulfato ferroso
 - 2.4.3. Cloruro férrico
 - 2.4.4. Hidroxicloruro de aluminio
- 2.5. Marco Legal
 - 2.5.1. Acuerdo Gubernativo 236-2006
 - 2.5.1.1. Parámetros de descarga de agua residual
 - 2.5.1.2. Recirculación interna de agua
- 2.6. Sustentabilidad
 - 2.6.1. Economía circular
 - 2.6.2. Partes interesadas

3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

- 3.1. Características del estudio
- 3.2. Unidades de análisis
- 3.3. Variables
- 3.4. Fases del desarrollo de la investigación
 - 3.4.1. Fase 1
 - 3.4.2. Fase 2
 - 3.4.3. Fase 3
 - 3.4.4. Fase 4
 - 3.4.5. Organización de la información

3.4.5.1. Datos experimentales

3.4.5.2. Metodologías experimentales

3.5. Obtención de insumos

3.6. Técnicas de análisis de información

4. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Resultados experimentales

4.2. Análisis comparativo

4.3. Costos

4.4. Discusión de resultados

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

APÉNDICES

ANEXOS

9. METODOLOGÍA

La reducción de fósforo en el agua residual de la industria de bebidas mejora la calidad del agua.

9.1. Características del estudio

El enfoque del estudio propuesto es cuantitativo, porque existen métodos analíticos que permiten determinar la eficacia de una metodología de tratamiento aplicada.

El alcance es correlacional, porque se analizará la incidencia del coagulante aplicado en la reducción del fósforo así como en la calidad de agua al final del tratamiento y del proceso.

El diseño adoptado será experimental, pues se tomará una muestra de agua después de su homogeneización y tratamiento biológico, y posteriormente se le aplicará distintos tipos de coagulante determinando el efecto en la reducción de fósforo a través de un método espectrofotométrico.

La presente investigación es de tipo cuantitativa porque el análisis se desarrollará en función de los datos obtenidos, que reflejan la calidad de agua y se seguirá la metodología hipotético-deductiva porque se han analizado las tendencias del fósforo así como los efectos y causas analizando los potenciales efectos de los diferentes coagulantes. Se espera que dicho fenómeno tenga mejores resultados con aquellos compuestos por hierro y se comprobará a través de la experimentación en el contexto del proceso.

9.2. Unidades de análisis

El estudio se realizará en la planta de tratamiento de aguas residuales de una industria de bebidas en condiciones normales de operación cuando exista fósforo no tratado después del tratamiento biológico disponible para los ensayos de reducción. Se utilizará una muestra homogénea con las mismas características para ensayar todos los coagulantes y diferentes concentraciones.

9.3. Variables

Las variables en estudio se describen a continuación.

Tabla II. **Variables del estudio**

Variable	Definición teórica	Definición operativa
Calidad del Agua	Disminución de carga orgánica en el agua residual de la industria de bebidas.	Fósforo (PO_4^{3-}) en mg/l
Metodologías para el tratamiento del fósforo	Tratamiento fisicoquímico para reducción de fósforo	Relación en partes por millón (ppm) de cada coagulante

Fuente: elaboración propia, empelando Microsoft Excel.

Para realizar esta medición se tomarán datos en condiciones iguales para cada uno de los escenarios y se llenará la siguiente tabla para documentar los resultados:

Tabla III. Caracterización de calidad de agua con el tratamiento actual

Parámetro	Resultado
pH	
Conductividad	
Temperatura	
SST	
Turbidez	
Alcalinidad	
Amonio	
DQO	
Nitrógeno	
Fósforo	
Aluminio	
Hierro	

Fuente: elaboración propia, empelando Microsoft Excel.

Tabla IV. Resultados de calidad de agua aplicando distintos coagulantes

Parámetro	Sulfato de aluminio	de Hidroxicloruro de aluminio	Sulfato Ferroso	Cloruro férrico
pH				
Conductividad				
Temperatura				
SST				
Turbidez				
Alcalinidad				
Amonio				
DQO				
Nitrógeno				
Fósforo				
Aluminio				
Hierro				

Fuente: elaboración propia, empelando Microsoft Excel.

9.4. Fases del estudio

Se describirán a continuación cinco fases del estudio. El enfoque del mismo será experimental

9.4.1. Fase 1 revisión bibliográfica: Parámetros de calidad de agua en la industria de bebidas

En la primera fase se realizará una consulta de todas las bibliografías posibles relacionadas al tema, para enriquecer los conocimientos del comportamiento del fósforo en la Industria de Bebidas así como de los potenciales tratamientos fisicoquímicos y su efectividad.

9.4.2. Fase 2 experimental: Tratamiento fisicoquímicos para reducción de fósforo

En la segunda fase se analizará la operación de la planta de tratamiento y se tomará una muestra homogénea para construir la línea base de parámetros de calidad de agua agregando los distintos tipos de coagulantes propuestos y evaluar la incidencia que tienen en la reducción del fósforo y definir qué químico se analizará a distintas concentraciones en la fase tres.

9.4.3. Fase 3 experimental: Optimización en el uso de químicos para el tratamiento del fósforo

En la tercera fase con el coagulante de mayor efectividad y menos impacto en otros parámetros de calidad de agua se realizará un análisis a distintas concentraciones para identificar la cantidad óptima de fósforo tomando en cuenta la operatividad en la infraestructura de la planta de tratamiento.

9.4.4. Fase 4 interpretación de información: En función de los resultados analizar la factibilidad

En la fase cuatro, con la concentración óptima se realizará un análisis económico de implementación y su factibilidad. En función de este análisis se propondrá la aplicación industrial más adecuada.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Se utilizará la estadística descriptiva para analizar la información obtenida a partir de la realización de los diferentes experimentos, esto brindará pautas de la eficiencia del tratamiento para cada uno de los coagulantes analizados a través de las medidas de tendencia central.

Dentro de las pruebas de normalidad se aplicará la prueba *t* de *Student*, misma que se utilizará para determinar si hay una diferencia significativa entre las medias de dos grupos. Se analizará la dependencia de las variables así como que los datos tengan una distribución normal. Se realizará que el nivel de confianza aceptado será del 95 %.

Se aplicará el tipo de prueba por la cantidad de datos recolectados que en donde $n < 30$. En donde el valor de *t* representa el número de unidades estándares que están separando las medias de los dos grupos analizados.

Se deberá considerar que en esta prueba cuanto mayor es la diferencia entre las dos medias, mayor es la probabilidad que exista una diferencia significativa. También que la cantidad de traslape que existe entre los grupos, es una función de la variación dentro de los grupos. La idea fundamental es encontrar la diferencia entre las medias y dividirla por el error estándar de la diferencia, es decir la desviación estándar de la distribución de éstas diferencias.

Con base a la información obtenida y su criterio de aceptación en relación a la t teórica, se aceptará o rechazará la hipótesis respectivamente.

Al obtener los datos del estudio se procederá a realizar un análisis estadístico de la información para poder predecir algunos comportamientos. Para ello se utilizarán las siguientes herramientas:

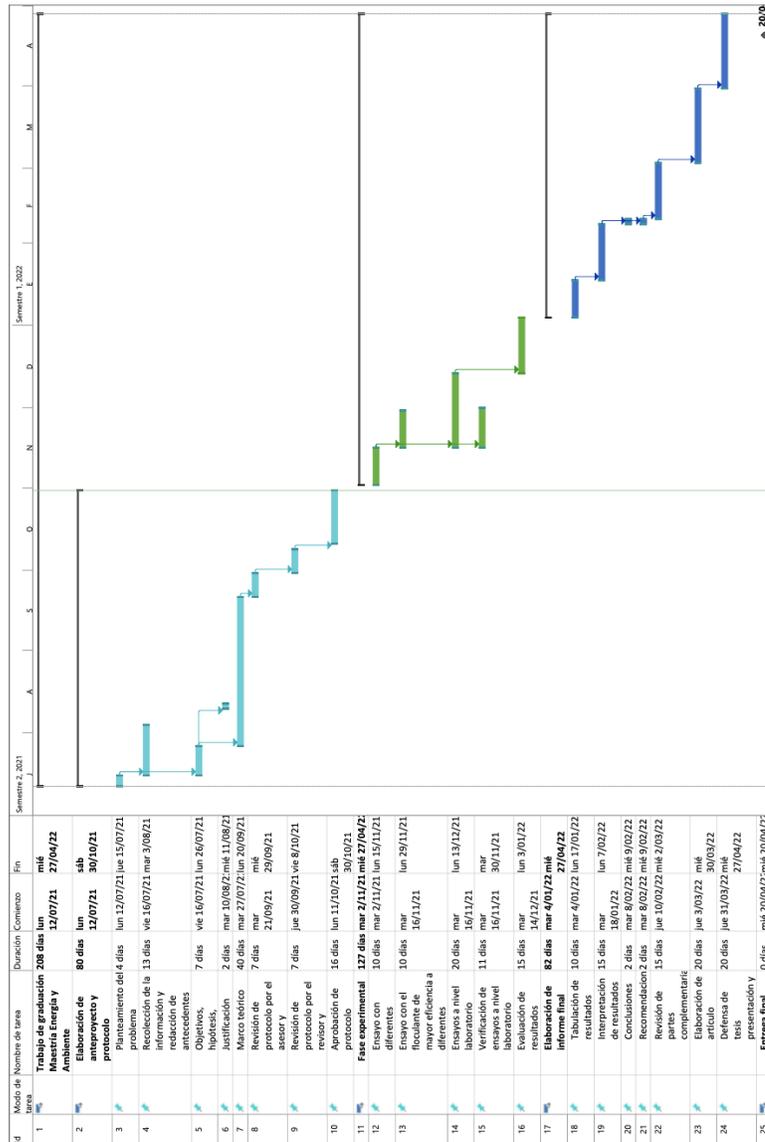
- Tablas de datos
- Tablas de datos calculados
- Gráfico de resultados
- Gráfico de análisis estadístico (box-plot)

Las herramientas estadísticas a utilizar serán:

- Análisis de correlación entre variables (eficiencia vs tipo de coagulante).
- Análisis de correlación entre variables (eficiencia vs concentración de floculante).
- Medidas de tendencia central: debido a que se reunirán datos, se realizarán los cálculos para determinar la media aritmética y sus desviaciones en cada caso.
- Prueba de normalidad.
- Software estadístico.

11. CRONOGRAMA

Tabla V. Cronograma



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Project.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

El presente trabajo de investigación se realizará con recursos de la empresa en donde se realizará el estudio. Siendo la investigación experimental, se tendrán en cuenta los siguientes recursos.

Tabla VI. **Recursos necesarios para la investigación**

Recurso	Costo
Investigador	Q. 10,000.00
Asesor	Q. 2,500.00
Coagulantes por ensayar	Q. 500.00
Cristalería de laboratorio	Q. 6,500.00
Equipo de laboratorio (asumiendo su compra)	
Instrumentación para prueba de jarras	Q. 75,500.00
Balanza analítica	Q. 15,000.00
Sensor para pH, equipo de mesa	Q. 2,983.00
Sensor para oxígeno, equipo de mesa	Q. 9,263.00
Termo-reactor	Q. 10,833.00
Espectrofotómetro	Q. 157,000.00
Ensayos	Q. 6,000.00
Materiales de oficina	Q. 500.00
TOTAL	Q. 296,579.00

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Siendo los recursos aportados suficientes para la investigación, se considera que es factible la realización del estudio.

13. REFERENCIAS

1. Acuerdo Gubernativo 236-2006. Reglamento de las descargas y reusó de aguas residuales y de la disposición de lodos. Diario de Centroamérica. Guatemala. 5 de mayo de 2006.
2. Alemán, M. (2016). *Estudio de Impacto Ambiental Expost Planta Norte Embotelladora de Bebidas el Inca*. Quito, Ecuador: ENTRIX AMERICAS S.A.
3. Alman, K. H. (2007). *A Study on Industrial Waste Effluents and Their Management at Selected Food and Beverage Industries of Bangladesh*. Toronto, Canada: World Bank assisted National Agricultural Research Project.
4. Azeredo, D. A. (2016). *An overview of microorganisms and factors contributing for the microbial stability of carbonated soft drinks*. Río de Janeiro, Brasil: Food Research International.
5. Baird, R. B. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Estados Unidos: American Public Health Association.
6. Bermeo, M. M. (2016). *Tratamiento de aguas residuales. Técnicas convencionales*. Guayaquil, Ecuador: Grupos Compás.
7. Brown, T. L. (2004). *Química, La ciencia central*. México: Pearson Educación.

8. Castro, L. (2012). *Evaluación a escala laboratorio del sistema electrocoagulación como tratamiento terciario para la reducción de nitrógeno total, fosforo total y mejora del índice de biodegradabilidad en aguas residuales de origen domestico* (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
9. Comisión Nacional del Medio Ambiente. (2009). *Agua y Economía Circular*. Madrid, España: Autor.
10. Duarte, D. (julio, 2015). Remoción de nutrientes mediante coagulantes naturales y químicos en planta de tratamiento de aguas residuales. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 6(2), 183-196.
11. Duque, P. (2012). *Estudio de la influencia de la adición de Cloruro Férrico en la sedimentabilidad de los fangos activados*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
12. FICIT. (2015). *Memoria de Cálculo Planta de Tratamiento de Agua Residual Tecnología MBR*. Italia: Autor.
13. Gregory, J. (2006). *Particles in water: Properties and processes*. Londres, Inglaterra: IWA publishing.
14. Holbrook, R. H. (noviembre2004). *Effect of Alum Addition on the Performance of Submerged Membranes for Wastewater Treatment*. *Water Environment Research*, 76(7), 699-2702.
15. Jenkins, D. S. (2004). *Química del agua*. México: Limusa.

16. Kominko, H. G. (abril, 2018). Sustainable Management of Sewage Sludge for the Production of Organo-Mineral Fertilizers. *Waste Biomass Valorization*, 9, 1817–1826.
17. Lara, J. (2002). *Eliminación de nutrientes mediante procesos de membrana* (Tesis de doctorado). Universidad Politécnica de Madrid, España.
18. Li, S. J. (noviembre, 2019). Phosphorus removal by in situ sprayed ferric chloride in Dianchi Lake: Efficiency, stability, and mechanism. *Process Safety and Environmental Protection*, 131, 320-328.
19. Malachy, M. (2015). *Comparative assessment of performance of aluminium sulphate (alum) and ferrous sulphate as coagulants in water treatment*. Nigeria: University of Nigeria.
20. Nassef, E. (marzo, 2012). Removal of phosphates from industrial wastewater by chemical precipitation. *IRACST – Engineering Science and Technology: An International Journal*, 2(3), 2250-3498.
21. Organización Internacional de Normalización. (2015). *ISO 9001:2015. Sistemas de gestión de la calidad — Requisitos*. Ginebra, Suiza: Autor.
22. Prieto-Sandoval, V. J. (febrero, 2017). Economía circular. *Ingeniería*, (15), 85-95.

23. Ren, J. L. (marzo, 2020). Efficient removal of phosphorus from turbid water using chemical sedimentation by FeCl₃ in conjunction with a starch-based flocculant. *Elsevier*, 170, 115361.
24. Sheldon, M. S. (2015). *Multi-stage EGSB/MBR treatment of soft drink industry wastewater*. Sudáfrica: Chemical Engineering Journal.
25. Sierra, C. A. (2011). *Calidad del Agua*. Medellín, Colombia: Universidad de Medellín.
26. Solís, C. (noviembre, 2017). Tecnología de membranas: Ultrafiltración. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 11(22), 26-36.
27. Stahel, W. (marzo, 2016). The circular economy. *Nature*, 531, 435-438.
28. Velasco, F. M. (diciembre, 2019). Evaluación de un sistema de tratamiento de aguas residuales no domesticas para la remoción de carga orgánica en industria de bebidas no alcohólicas. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 13(26), 17-26.
29. Wambui, A. F. (diciembre, 2017). An assesment of multi-plate screw press in dewatering process of sludge treatment. *International Journal of Advanced Research*, 5(12), 740-747.
30. Zarta, P. (enero, 2018). La sustentabilidad o sostenibilidad: Un concepto poderoso para la humanidad. *Tabula Rasa*, (28), 409-423. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=39656104017>.

31. Zhang, Z. W. (noviembre, 2014). Effect of ferric and ferrous iron addition on phosphorus removal and fouling in submerged membrane bioreactors. *Elsevier*, 69, 210-222.