



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

EVALUACIÓN DE LA ENZIMA PAPAÍNA EXTRAÍDA DE LA CÁSCARA DE PAPAYA (*Carica papaya L.*) COMO COAGULANTE NATURAL A NIVEL LABORATORIO, EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UNA INDUSTRIA EMBOTELLADORA DE AGUA CARBONATADA

Andy Noé Solares Zarceño

Asesorado por el Ing. Jorge Mario Estrada Asturias

Guatemala, enero de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

EVALUACIÓN DE LA ENZIMA PAPAÍNA EXTRAÍDA DE LA CÁSCARA DE PAPAYA (*Carica papaya L.*) COMO COAGULANTE NATURAL A NIVEL LABORATORIO, EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UNA INDUSTRIA EMBOTELLADORA DE AGUA CARBONATADA

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ANDY NOÉ SOLARES ZARCEÑO

ASESORADO POR EL ING. JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, ENERO DE 2023

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 Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIA	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Gerardo Ordoñez
EXAMINADOR	Ing. William Eduardo Fagiani Cruz
EXAMINADOR	Ing. Casta Petrona Zeceña Zeceña
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

EVALUACIÓN DE LA ENZIMA PAPAÍNA EXTRAÍDA DE LA CÁSCARA DE PAPAYA (*Carica papaya L.*) COMO COAGULANTE NATURAL A NIVEL LABORATORIO, EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UNA INDUSTRIA EMBOTELLADORA DE AGUA CARBONATADA.

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 1 de Julio de 2020.

Andy Noé Solares Zarceño

Guatemala 26 de julio de 2022

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela Ingeniería Química
Presente.

Estimado Ingeniero Williams Guillermo Álvarez Mejía:

Le saludo cordialmente, deseándole éxitos en sus actividades. Por medio de la presente hago constar que he revisado y aprobado Informe Final del trabajo de graduación titulado **"Evaluación de la enzima papaína extraída de la cáscara de papaya (*Carica Papaya L.*) como coagulante natural a nivel laboratorio, en el tratamiento de aguas residuales de una industria embotelladora de agua carbonatada"**, elaborado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Química, **Andy Noé Solares Zarceño**, quien se identifica con el registro académico **2016-02510** con el CUI **3031 43312 0108**.

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

Atentamente,


Jorge Mario ESTRADA ASTURIAS
M. Sc. Ingeniero Químico Col. 685
PROFESOR TITULAR
Facultad de Ingeniería
Registro USAC 20080059

JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS
ASESOR
INGENIERO QUÍMICO
COLEGIADO ACTIVO NO. 685



Guatemala, 10 de octubre de 2022.
Ref. EIQ.TG-IF.029.2022.

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

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **018-2020**, 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: **Andy Noé Solares Zarceño**.
Identificado con número de carné: **3031433120108**.
Identificado con registro académico: **201602510**.
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:

EVALUACIÓN DE LA ENZIMA PAPAÍNA EXTRAÍDA DE LA CÁSCARA DE PAPAYA (*Carica papaya* L.) COMO COAGULANTE NATURAL A NIVEL LABORATORIO, EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UNA INDUSTRIA EMBOTELLADORA DE AGUA CARBONATADA

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

Jorge Mario Estrada Asturias, 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 HERRERA SOTO
INGENIERA QUIMICA
COL. 2151



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


C.c.: archivo



LNG.DIRECTOR.011.EIQ.2023

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de Área y aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN DE LA ENZIMA PAPAÍNA EXTRAÍDA DE LA CÁSCARA DE PAPAYA (*Carica papaya L.*) COMO COAGULANTE NATURAL A NIVEL LABORATORIO, EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UNA INDUSTRIA EMBOTELLADORA DE AGUA CARBONATADA**, presentado por: **Andy Noé Solares Zarceño**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

“Id y Enseñad a Todos”



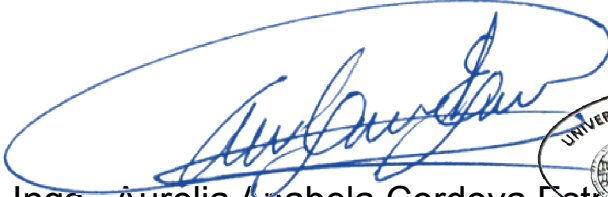
Ing. Williams G. Alvarez Mejia: M.I.Q., M.U.I.E.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, enero de 2023.


LNG.DECANATO.OI.015.2023

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: **EVALUACIÓN DE LA ENZIMA PAPAÍNA EXTRAÍDA DE LA CÁSCARA DE PAPAYA (*Carica papaya L.*) COMO COAGULANTE NATURAL A NIVEL LABORATORIO, EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UNA INDUSTRIA EMBOTELLADORA DE AGUA CARBONATADA**, presentado por: **Andy Noé Solares Zarceño**, 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



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
DECANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
★

Decana

Guatemala, enero de 2023

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por haberme permitido vivir este día tan especial, y haberme guiado a lo largo de mi vida.
- Mi mamá** Nohemy Sarceño Cano, por su apoyo, amor y comprensión incondicional en todo momento de mi vida. Por ser mi guía y ayudarme a ser la persona que soy hoy en día.
- Mi papá** Bernardo Solares Melgar, por su compañía, esfuerzo y apoyo. Gracias por ser el promotor de mis sueños y confiar en mí todos los días.
- Mis hermanos** Hesler y Byron Solares, quienes me enseñaron sobre amor y trabajo duro. Son mi ejemplo a seguir. Gracias por ser mi apoyo y mis amigos siempre.
- Mi familia** Por siempre estar pendiente de mí. Gracias por su apoyo y cariño en cada etapa de mi vida.
- Mis amigos** Gracias a mis amigos por todos los buenos y malos momentos que hemos compartido, los considero mis hermanos. Yo sé que puedo contar con cada uno de ustedes sin importar la hora.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Gracias a mi Alma Mater por haberme enseñado a ser mejor estudiante y persona, a valorar cada uno del esfuerzo que cada persona de la institución hace, y dar mi mejor versión de mí siempre.

Facultad de Ingeniería

Gracias por el tiempo, el conocimiento y por haberme brindado las herramientas necesarias para completar esta etapa de educación superior.

Mis amigos

Anabela del Cid, Jorge Gamas y Lucía Baiza, por estar presentes y tener su apoyo en cada momento de esta etapa. Gracias por estar siempre allí, nada hubiera sido igual sin ustedes, se convirtieron en amigos que perduraran toda la vida.

**Ing. Jorge Mario Estrada
Asturias**

Sin usted y sus conocimientos, paciencia y constancia este trabajo no lo hubiese logrado tan fácil. Gracias por el apoyo para realizar este trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
OBJETIVOS.....	XIII
HIPÓTESIS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XIX
1. MARCO CONCEPTUAL.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación	8
1.3. Determinación del problema.....	10
1.3.1. Definición	10
1.3.2. Delimitación	10
2. MARCO TEORÍCO.....	11
2.1. Aguas residuales.....	11
2.1.1. Componentes del agua residual	11
2.1.1.1. Sólidos.....	11
2.1.1.2. Componentes inorgánicos	11
2.1.1.3. Componentes orgánicos.....	12
2.1.2. Clasificación de las aguas residuales	12
2.1.3. Clasificación de los contaminantes del agua	14
2.1.3.1. Contaminantes químicos	14
2.1.3.2. Contaminantes físicos	14

	2.1.3.3.	Contaminantes biológicos	14
2.1.4.		Características en aguas residuales	14
	2.1.4.1.	Sólidos suspendidos totales	15
	2.1.4.2.	Color.....	15
	2.1.4.3.	Fósforo	15
2.2.		Agua carbonatada	16
	2.2.1.	Composición de las bebidas carbonatadas	16
	2.2.2.	Aguas residuales en la industria de agua carbonatada	17
2.3.		Tratamiento de aguas residuales	17
	2.3.1.	Coagulación	18
	2.3.2.	Partículas coloidales	18
	2.3.3.	Carga eléctrica y doble capa	19
	2.3.4.	Mecanismos de coagulación	19
	2.3.5.	Factores que influyen en la coagulación	20
	2.3.6.	Etapas de coagulación	22
	2.3.7.	Floculación	22
	2.3.7.1.	Parámetros de la floculación	23
2.4.		Prueba de jarras.....	23
2.5.		Coagulantes químicos.....	23
	2.5.1.	Sulfato de aluminio.....	24
2.6.		Coagulantes naturales	24
2.7.		Papaya (Carica papaya).....	24
	2.7.1.	Descripción botánica	25
	2.7.2.	Composición.....	25
	2.7.3.	Enzima	26
	2.7.4.	Papaína.....	26
	2.7.5.	Propiedades físicas	27
	2.7.6.	Composición química	28

2.7.7.	Látex de la papaya	30
3.	DISEÑO METODOLÓGICO	31
3.1.	Variables.....	31
3.1.1.	Variable dependiente	32
3.1.2.	Variables independientes	33
3.2.	Delimitación del campo de estudio	33
3.3.	Obtención de las muestras	34
3.3.1.	Recolección de la papaya verde.....	34
3.3.2.	Extracción de la papaína	34
3.3.3.	Recolección del agua residual	34
3.4.	Recursos humanos disponibles.....	35
3.5.	Recursos materiales disponibles (equipo, cristalería, reactivos).....	35
3.5.1.	Cristalería	35
3.5.2.	Equipo	35
3.5.3.	Elementos varios	36
3.5.4.	Reactivos.....	36
3.6.	Técnicas cuantitativas	37
3.6.1.	Prueba de jarras	37
3.6.2.	Sólidos suspendidos totales	38
3.6.3.	Color	39
3.6.4.	Fósforo total.....	40
3.6.5.	Porcentaje de remoción.....	42
3.7.	Recolección y ordenamiento de la información	42
3.8.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	47
3.9.	Análisis estadístico	47
3.9.1.	Determinación del número de corridas	47
3.9.2.	Media aritmética de las muestras	47

3.9.3.	Varianza	48
3.9.4.	Desviación estándar	48
3.9.5.	Análisis de varianza	49
3.9.6.	Prueba de Tukey	49
3.10.	Plan de análisis de los resultados	49
3.10.1.	Métodos y modelos de los datos según tipo de variables	49
3.10.2.	Programas para utilizar para análisis de datos.....	50
4.	RESULTADOS.....	51
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	57
	CONCLUSIONES.....	63
	RECOMENDACIONES	65
	BIBLIOGRAFÍA.....	67
	APÉNDICES.....	73

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Procedimiento de la obtención del coagulante natural.....	43
2.	Procedimiento de recolección y ordenamiento de la información	44
3.	Descripción del experimento	46
4.	Porcentaje de remoción de sólidos suspendidos totales en función de dosis de coagulante papaína en distintas corridas.....	52
5.	Porcentaje de remoción de sólidos suspendidos totales en función de dosis de coagulante sulfato de aluminio en distintas corridas.....	52
6.	Porcentaje de remoción de color en función de dosis de coagulante papaína en distintas corridas.	53
7.	Porcentaje de remoción de color en función de dosis de coagulante sulfato de aluminio en distintas corridas.....	53
8.	Porcentaje de remoción de fósforo total en función de dosis de coagulante papaína en distintas corridas.	54
9.	Porcentaje de remoción de fósforo total en función de dosis de coagulante sulfato de aluminio en distintas corridas.	54

TABLAS

I.	Hipótesis estadística.....	XV
II.	Antecedentes relacionados a la investigación.....	1
III.	Clasificación de las aguas residuales.....	13
IV.	Propiedades físicas de la papaína	27
V.	Composición de aminoácidos de la papaína	29

VI.	Características de las enzimas de látex de la papaya	30
VII.	Definición de las variables a utilizar	31
VIII.	Variable dependiente de la investigación.....	32
IX.	Variables independientes de la investigación	33
X.	Caracterización del agua residual de la industria de agua carbonatada sin tratamiento previo	51
XI.	Dosis óptima de coagulante natural, papaína con sus respectivos porcentajes de remoción.....	55

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
cm	Centímetro
Df	Dato final del parámetro a utilizar
Di	Dato inicial del parámetro a utilizar
DBO5	Demanda biológica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
Ptotal	Fósforo total
mg/L	Miligramos por litro
mL	Mililitro
%	Porcentaje
%R	Porcentaje de remoción
pH	Potencial de hidrogeno
Seg	Segundos
SST	Sólidos suspendidos totales
°C	Temperatura en grados centígrados
U Pt-Co	Unidades platino cobalto

GLOSARIO

Aguas residuales	Aguas procedentes de procesos productivos o del consumo humano.
Coagulación	Proceso de desestabilización partículas coloidales suspendidas y dispersas en el agua, al neutralizar sus cargas, provocando la formación de flóculos.
Color	Parámetro organoléptico que indica la calidad del agua, está relacionado con las sustancias disueltas y las partículas en suspensión que contiene.
Floculación	Proceso físico en el que se aumenta la cohesión de partículas coloidales y se favorece el aumento de peso y volumen de los flóculos formados.
Fósforo	Es un elemento no metálico perteneciente al grupo 15 de la tabla periódica y se encuentra en la naturaleza combinado en fosfatos inorgánicos y en organismos vivos.
Papaína	Es una enzima que se extrae del fruto llamado papaya.

Prueba de jarras	Metodología que determina el comportamiento de coagulantes y floculantes a pequeña escala, utilizando variaciones de dosis de coagulante en cada jarra.
Sólidos suspendidos	Concentración de partículas que son retenidas en un medio filtrante de microfibra de vidrio, con un diámetro de poro de 1.5 micrómetros o su equivalente.
Sulfato de aluminio	Es una sal sólida de color blanco utilizada principalmente como agente coagulante y floculante primario en el tratamiento de aguas de consumo humano y aguas residuales.

RESUMEN

En esta investigación se realizó una evaluación sobre la utilización de la papaína extraída de la cáscara de papaya como un coagulante natural en el tratamiento de aguas residuales. El estudio se llevó a cabo a nivel laboratorio, y se analizó la efectividad del coagulante natural evaluando el porcentaje de remoción de sólidos suspendidos totales, color y fósforo total.

Se obtuvo la materia prima de la papaya verde en la central de mayoreo (CENMA) y el agua residual a partir de los desechos líquidos de manufactura de una industria de embotellado de bebidas carbonatadas. La extracción de la papaína se hizo a partir de la cáscara de papaya, la cual se cortó, y luego se eliminaron impurezas por medio de un lavado. Posteriormente, se secó en un horno a una temperatura de 50 °C por 24 horas. Se trituró la cáscara y se tamizó para obtener un tamaño de polvo de tamaño uniforme.

Las pruebas de laboratorio tuvieron como objetivo caracterizar el agua residual proveniente de la manufactura de una empresa embotelladora de bebidas carbonatadas. Cada muestra de agua residual se analizó a diferentes dosis de coagulante natural, papaína, y coagulante químico, en este caso el sulfato de aluminio. Se realizó la prueba de jarras, la cual consiste en la agitación, mezclado rápido, mezclado lento y sedimentación. A partir de esta prueba, se tomó una porción de las muestras que se encuentra en la parte superior, y se determinó los parámetros de sólidos suspendidos totales, color y fósforo total. Por último, se determinó el porcentaje de remoción del coagulante natural y la dosis óptima de coagulante.

Se tomaron 3 muestras del agua residual, en donde se trabajó con 5 dosis de coagulante diferentes, aplicando coagulante papaína y sulfato de aluminio. Las dosis de coagulante fueron: 90 mg/L, 180 mg/L, 270 mg/L, 360 mg/L y 450 mg/L. Con base a la experimentación y análisis estadístico se determinó que la dosis óptima de coagulante papaína para los sólidos suspendidos totales fue de 270 mg/L con una media de porcentaje de remoción de 63,76 %, para el color y fósforo total fue de 90 mg/L con una media de porcentaje de remoción de 18,88 % y 21,73 %, respectivamente. Se determinó la dosis óptima en sólidos suspendidos totales de 270 mg/L aunque no exista variación entre dosis de coagulante, ya que es la dosis con una media con mayor porcentaje de remoción. En caso con los parámetros de color y fósforo total se utiliza una dosis de 90 mg/L, ya que no se tiene un porcentaje de remoción eficiente, por lo que se utiliza la dosis más baja de coagulante para el menor consumo de material.

OBJETIVOS

General

Evaluar la efectividad de la enzima papaína extraída de la cáscara de papaya (*Carica papaya L.*) como coagulante natural a nivel laboratorio, en el tratamiento de aguas residuales de una industria de embotellado de bebidas carbonatadas.

Específicos

1. Caracterizar el agua residual de una industria de embotellado de bebidas carbonatadas a partir de los parámetros sólidos suspendidos totales, color y fósforo total del efluente inicial y los efluentes tratados con el coagulante natural de la enzima papaína extraída de la cáscara de papaya (*Carica papaya L.*).
2. Analizar la viabilidad que posee la enzima papaína extraída de la cáscara de papaya (*Carica papaya L.*) como coagulante natural en la disminución de contaminantes en aguas residuales de una industria de embotellado de bebidas carbonatadas.
3. Determinar la dosis óptima de la enzima papaína extraída de la cáscara de papaya (*Carica papaya L.*) a partir de prueba de jarras.

HIPÓTESIS

- Hipótesis del trabajo

La papaína extraída de la cáscara de papaya es un material natural adecuado para la coagulación en el proceso de tratamiento de aguas residuales en la industria embotelladora de agua carbonatada en la remoción de sólidos suspendidos totales, color y fósforo total.

- Hipótesis estadística

Tabla I. **Hipótesis estadística**

Objetivo específico	Prueba estadística	Parámetro	Hipótesis nula	Hipótesis alterna
2	ANOVA	Sólidos suspendidos totales	La remoción de sólidos suspendidos totales es la misma al tratar con dos tipos de coagulantes distintos.	La remoción de sólidos suspendidos totales no es la misma al tratar con dos tipos de coagulantes distintos.

Continuación de la tabla I.

2	ANOVA	Fósforo total	La remoción de fósforo total es la misma al tratar con dos tipos de coagulantes distintos.	La remoción de fósforo total no es la misma al tratar con dos tipos de coagulantes distintos.
2	ANOVA	Color	La remoción de color es la misma al tratar con dos tipos de coagulantes distintos.	La remoción de color no es la misma al tratar con dos tipos de coagulantes distintos.
3	ANOVA y prueba de Tukey	Sólidos suspendidos totales	Los sólidos suspendidos totales posterior al tratamiento es la misma a pesar de que se utilizaron distintas dosis de coagulante.	Los sólidos suspendidos totales posterior al tratamiento no es la misma al momento que se modifica la dosis de coagulante.

Continuación de la tabla I.

3	ANOVA y prueba de Tukey	Fósforo total	El fósforo total posterior al tratamiento es la misma a pesar de que se utilizaron distintas dosis de coagulante.	El fósforo total posterior al tratamiento no es la misma al momento que se modifica la dosis de coagulante.
3	ANOVA y prueba de Tukey	Color	El color posterior al tratamiento es la misma a pesar de que se utilizaron distintas dosis de coagulante.	El color posterior al tratamiento no es la misma al momento que se modifica la dosis de coagulante.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

INTRODUCCIÓN

La contaminación por medio de los efluentes industriales es uno de los principales temas a tratar en la actualidad, y su relevancia ha ido incrementándose de manera exponencial, ya que estos son algunos de los desechos que tienen mayor impacto en el ambiente y en los seres vivos que habitan en él. Algunos aspectos se han ido normando al pasar de los años. En Guatemala se desechan las aguas residuales de manera incontrolada y desembocan en los cuerpos de agua más próximos perjudicando al ambiente, lo cual puede llevar a la pérdida de los recursos hídricos existentes. Esto debido a que el reglamento sobre aguas residuales es ineficaz por lo que no se ha mejorado con acuerdos previos.

Uno de los principales procesos que se implementa en el tratamiento de aguas residuales es el de coagulación-floculación, dicho proceso tiene como objetivo la remoción de sólidos suspendidos, color, fósforo y otros contaminantes. Sin embargo, en las industrias se utilizan coagulantes químicos, los cuales pueden llegar a ser tóxicos para la salud humana, tienen altos costos de adquisición, producen altos volúmenes de lodos y afectan considerablemente el pH del agua tratada. Los coagulantes naturales u orgánicos son de beneficio para minimizar o evitar la utilización de coagulantes químicos. Sin embargo, es una fuente alternativa que no se ha explotado suficientemente. Pero por lo general, presentan una mínima o nula toxicidad y en la mayoría de los casos, son solubles en agua.

Por esta razón, el estudio de investigación se basa en la evaluación de la papaína extraída de la cáscara de papaya como un coagulante natural para el tratamiento de aguas residuales en la remoción de los sólidos suspendidos totales, color y fósforo. De esta manera obtener un sustituto de los coagulantes químicos, en donde el costo es menor y no tiene efectos significantes en el efluente del agua que desembocará en los cuerpos de agua.

1. MARCO CONCEPTUAL

1.1. Antecedentes

El uso de coagulantes naturales se ha incrementado por su bajo costo y su alta capacidad de clarificación de agua. A continuación, se enumeran algunas investigaciones en donde se ha evaluado el uso de coagulantes naturales:

Tabla II. **Antecedentes relacionados a la investigación**

Autor	Año	Título	Conclusión
Díaz Alliag, J.	2019	Aplicación de la enzima papaína como coagulante natural para la remoción de turbidez en la PTAR-V.E.S.	Se concluye que la semilla de la papaya en polvo es efectiva para la remoción de la turbidez del agua obtenida de la planta de tratamiento de aguas residuales, dando como resultados que llega a remover un 65 % de la turbidez del agua, y al momento de filtrar el agua residual, el porcentaje de remoción llega a 85 %.

Continuación de la tabla II.

<p>Guzmán, L. Villabona, Á. Tejeda, C. García, R.</p>	<p>2014</p>	<p>Remoción de la turbidez del agua usando coagulantes naturales: una revisión</p>	<p>Se concluyó que todos los extractos de origen vegetal reportados son eficientes en la remoción de turbidez del agua, producen menor cantidad de lodos y su coagulación utilizada es la adsorción y la neutralización de cargas.</p>
<p>Choque, D.</p>	<p>2018</p>	<p>Capacidad floculante de coagulantes naturales en el tratamiento de aguas</p>	<p>Se observó que hubo un incremento significativo para la capacidad clarificante y el porcentaje de remoción con el aumento de dosis de coagulante. Los parámetros fisicoquímicos del agua tratada como el pH se incrementaron ligeramente de 6,61 a 7,58. La dureza y la alcalinidad no muestran una diferencia significativa, y la DBO5 del agua con coagulante se incrementó con el porcentaje de aplicación. También se obtuvo que la <i>Echinopsis pachanoi</i> presenta mejores resultados para la actividad floculante y el porcentaje de remoción.</p>

Continuación de la tabla II.

Rodríguez, M., Lugo, U., Rojas, C., y Malaver, C.	2007	Evaluación del proceso de coagulación para el diseño de una planta potabilizadora	<p>Se determinó que el almidón de maíz es eficiente al ser tratado como una alternativa de coagulante natural. De igual forma se puede utilizar para reducir el consumo de reactivos químicos.</p> <p>Los polímeros orgánicos o de origen natural presentan por lo general una mínima o nula toxicidad, dado que muchos se utilizan como comestibles o con el propósito de tratamiento de aguas para el consumo.</p> <p>Se concluyó que el mejor coagulante natural fue el almidón de maíz para las condiciones de agua establecidas. Por lo contrario, el almidón de yuca presentó un rendimiento bajo.</p>
--	------	--	--

Continuación de la tabla II.

<p>Fuentes, N., Molina, E., Ariza, C.</p>	<p>2016</p>	<p>Coagulantes naturales en sistemas de flujo continuo, como sustituto del $Al_2(SO_4)_3$, para clarificación de aguas</p>	<p>Las variables de control evaluadas en esta investigación fueron color, turbiedad, oxígeno disuelto, sólidos totales, conductividad, DQO y pH.</p> <p>Se obtuvo como resultado que la mayor eficiencia de remoción de las variables mencionadas anteriormente se encontraba en el <i>Cactus opuntia</i> con un porcentaje de remoción de 98,41 % para estas aguas analizadas en el pretratamiento, siguiendo por la <i>moringa oleífera</i>, <i>algas marinas</i> y <i>almidón</i> con 88,26 %, 81,14 % y 79,73 %, respectivamente.</p> <p>Se concluyó que los coagulantes naturales han demostrado ser eficientes, seguros y económicos para el tratamiento de aguas, con menor generación de lodos, por los mecanismos de adsorción y neutralización de cargas.</p>
---	-------------	---	---

Continuación de la tabla II.

<p>Kazi, A., Virupakshi, A.</p>	<p>2013</p>	<p>Treatment of tennery wastewater using natural coagulants</p>	<p>Se obtuvo como resultado que la dosis óptima del <i>Cicer arietinum</i> (garbanzo), <i>Moringa oleífera</i> y <i>Cactus</i> fue de 0,1, 0,3 y 0,1 gramos/500 mL, respectivamente. El porcentaje de remoción de turbidez fue de 81,20 %, 82,02 % y 78,54 %, respectivamente. La máxima reducción de DQO fue de 90 %, 83,33 % y 75 %, respectivamente.</p> <p>Se determinó que los mejores coagulantes naturales fueron la <i>Cicer arietinum</i> (garbanzo) y <i>Moringa oleífera</i> por sus porcentajes de remoción de turbidez y DQO.</p>
---	-------------	---	--

Continuación de la tabla II.

<p>Dearmas, D., y Ramírez, L.</p>	<p>2015</p>	<p>Remoción de nutrientes mediante coagulantes naturales y químicos en planta de tratamiento de aguas residuales, Valledupar Colombia</p>	<p>Se obtuvo que el sulfato de aluminio es el coagulante que remueve más del 80 % los parámetros de DBO5, DQO y algas, el policloruro de aluminio es adecuado para disminuir significativamente la turbidez y los sólidos suspendidos totales en un 92 %, y presentó la mejor viabilidad económica en los tratamientos. Para disminuir el fósforo total fue efectivo el tratamiento por medio de coagulantes naturales con un porcentaje de remoción de 90,35 %.</p> <p>Se concluye que los coagulantes que se utilizaron en la investigación presentan un potencial de remoción en los parámetros analizados, y que el coagulante natural de <i>Moringa oleífera</i> como una posible alternativa en la potabilización de aguas, ya que garantiza la ausencia de residuos y un buen proceso de coagulación.</p>
---------------------------------------	-------------	---	--

Continuación de la tabla II.

Vásquez González, L.	2013	Remoción de turbiedad de agua con coagulantes naturales obtenidos de semillas (Eritina americana, Quercus ilex, Acaricia farnesiana, Viscum album y Senna candolleana)	Se determinó que, al momento de aumentar el pH, aumenta de la misma manera la actividad de coagulación, y se concluyó que la semilla que puede ser utilizada como coagulante primario es la semilla de huizache con un porcentaje de remoción de la turbiedad del 60 % en aguas con turbiedad baja y un 30 % en aguas con turbiedad altas. El extracto de la semilla de colorín mostró un aumento de turbidez, lo cual hace que este material puede ser utilizado como espesante. El resto de los extractos de semillas analizados no mostraron actividades de coagulación en ningún rango de pH.
-------------------------	------	--	---

Continuación de la tabla II.

Vargas, M., y Romero, L.	2006	Aprovechamiento de algunos materiales en el desarrollo de coagulantes y floculantes para el tratamiento de aguas en Costa Rica	Se analizó que los materiales que pueden ser utilizados como coagulantes son a base de aluminio y hierro, desechos de camarón (quitosano), este último ha demostrado efectividad en el tratamiento de agua con altos contenidos de ácidos húmicos. También existen los floculantes orgánicos como el alginato de sodio, originado del ácido alogénico extraído de las algas marinas que puede mejorar el tratamiento con cloruro de hierro y sulfato de aluminio. Otros floculantes orgánicos son los almidones extraídos de la papa y yuca.
-----------------------------	------	--	--

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

1.2. Justificación

El tratamiento de aguas residuales y su adecuado control es parte fundamental en temas ambientales en las industrias que desechan efluentes líquidos, ya que estos efluentes al llegar a un cuerpo de agua pueden ser perjudiciales para el ambiente, provocando la contaminación de este. En los

últimos años, la contaminación ha ido aumentando considerablemente, por lo que se han establecido normas y conciencia ética que regulan las condiciones que deben tener los efluentes de la industria. La contaminación también representa un tema económico para las industrias por el alto precio en el tratamiento de los contaminantes, por lo que se ha buscado economizar los costos sin disminuir la calidad de los tratamientos. Por esta razón se debe crear nuevos productos que sean biodegradables y que su impacto en el medio ambiente sea menos nocivo. Existen diferentes procedimientos para tratar este problema, las cuales involucran procesos de tratamientos físicos, químicos o biológicos del efluente.

Un proceso importante en el tratamiento de aguas residuales es la coagulación-floculación, ya que elimina la mayoría de los sólidos suspendidos y coloidales de las aguas residuales. Algunos coagulantes se utilizan de igual forma para la remoción de otros contaminantes tales son el color, fósforo, nitrógeno y metales pesados. En las plantas de tratamiento de aguas residuales utilizan regularmente coagulantes químicos, los cuales presentan un riesgo a un posible efecto tóxico en los seres vivos que consuman o utilicen estas aguas. Asimismo, los coagulantes químicos poseen altos costos de adquisición, producción de altos volúmenes de lodos y afectan considerablemente el pH del agua tratada.

Los coagulantes naturales son una alternativa a este tipo de coagulantes químicos, pero aún se necesita ser evaluados en la industria y comercializados para garantizar de esta manera la efectividad de su coagulación en el tratamiento de aguas residuales. Por esta razón, la investigación tiene como objetivo evaluar el efecto de un coagulante natural que sustituya a los coagulantes químicos existentes, que trate el agua con los requerimientos establecidos, sea fácil de usar, que sea biodegradable y menos dañino para el ambiente. Los productos naturales son más accesibles y poseen varios usos industriales. La cáscara de

papaya no se utiliza con regularidad en procesos industriales, por ello se quiere utilizar con el fin de comprobar su efectividad como coagulante natural.

1.3. Determinación del problema

La problemática que se tiene es la utilización de coagulantes químicos que se llevan a cabo en la industria, por tal razón se quiere encontrar un método alternativo para la coagulación de los procesos industriales.

1.3.1. Definición

Evaluar la viabilidad de utilizar la enzima papaína, extraída de la cáscara de la papaya como un coagulante natural en el tratamiento de aguas residuales de una industria embotelladora de agua carbonatada.

1.3.2. Delimitación

El estudio se limita a la evaluación de la enzima papaína, extraída de la cáscara de la papaya para ser utilizada como un coagulante natural en el tratamiento de aguas residuales de una industria embotelladora de agua carbonatada para la remoción de sólidos suspendidos totales, color y fósforo total. Determinando la eficiencia que posee este material por medio de diferentes métodos y análisis de medición, comparando el agua antes del tratamiento y después del tratamiento.

2. MARCO TEORÍCO

2.1. Aguas residuales

Aguas procedentes de procesos productivos o del consumo humano, los cuales se tratan en plantas de tratamiento de aguas residuales, y la mayoría de las veces son transportados por medio de un sistema de alcantarillado.

2.1.1. Componentes del agua residual

Algunos componentes importantes de aguas residuales se pueden considerar los siguientes:

2.1.1.1. Sólidos

Material suspendido o disuelto en las aguas residuales que se pueden tratar por medio de evaporación. La diferencia de peso en dos muestras secas indica el contenido de sólidos suspendidos.

2.1.1.2. Componentes inorgánicos

Se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Cloruros y sulfatos: Se encuentran presentes en el agua y en residuos generados por humanos.

- Nitrógeno y fósforo: se encuentran en diversas formas, ya sea orgánicas e inorgánicas, en residuos humanos y los detergentes que poseen fósforo.
- Carbonatos y bicarbonatos: se presentan en el agua y en residuos como sales de calcio y de magnesio.
- Sustancias tóxicas: la mayoría de las veces estos se encuentran en residuos industriales. Se puede considerar como el arsénico, cianuro y metales pesados tales como cadmio, cromo, cobre, mercurio, plomo y zinc.

2.1.1.3. Componentes orgánicos

Se considera como componentes orgánicos al material orgánico medidos como sólidos en suspensión. “El tratamiento de la materia orgánica disuelta en aguas residuales consiste en una mezcla heterogénea de compuestos orgánicos refractarios con diversas estructuras y orígenes”¹.

2.1.2. Clasificación de las aguas residuales

Las aguas residuales se pueden clasificar según las fuentes de donde provienen estas aguas.

¹ DÍAZ, Jakelin. *Aplicación de la enzima papaína obtenida a partir de las semillas Carica Papaya como coagulante natural para la remoción de turbidez en la PTAR-V.E.S.* p.18.

Tabla III. **Clasificación de las aguas residuales**

Tipo de agua	Definición
Aguas residuales domésticas o urbanas	Los líquidos provenientes de las viviendas o residenciales, edificios comerciales e institucionales. De la misma manera, existen las aguas grises, las cuales son aguas residuales provenientes de lavamanos, duchas y lavadoras, las cuales aportan cantidades de DBO, sólidos suspendidos, fósforo y grasas.
Aguas residuales municipales	Los residuos líquidos transportados por el alcantarillado de una ciudad y los cuales son tratados en una planta de tratamiento municipal.
Aguas residuales industriales	Las aguas residuales provenientes de la descarga de las industrias de manufactura.
Pluviales	Son aguas provenientes de las lluvias, y que no son absorbidas por los suelos, sino que escurren en edificios, calles y otras superficies. Estas son recolectadas en alcantarillados.
Aguas negras	Se consideran aguas negras a todas aquellas aguas residuales que provienen de los inodoros.

Fuente: elaboración propia, con información de Ramalho, R. *Tratamiento de aguas residuales, en pretratamientos y tratamientos primarios*. p. 91-197, empleando Microsoft Word.

2.1.3. Clasificación de los contaminantes del agua

Los contaminantes del agua se clasifican en tres categorías:

2.1.3.1. Contaminantes químicos

Estos comprenden contaminantes químicos orgánicos e inorgánicos. En los contaminantes químicos orgánicos el aspecto fundamental es por la disminución de oxígeno como resultante de la utilización en el proceso de degradación biológica de dichos compuestos. En el caso para contaminantes químicos inorgánicos se posee un riesgo a un posible efecto tóxico, y esto es más probable que la disminución de oxígeno.

2.1.3.2. Contaminantes físicos

Se consideran como los cambios térmicos, esto puede ser causado por aguas de plantas industriales que son utilizadas en intercambiadores de calor. Asimismo, se puede considerar como contaminantes físicos el color, turbidez, espumas y radiactividad.

2.1.3.3. Contaminantes biológicos

Estos contaminantes son los responsables de la transmisión de enfermedades en las aguas de abastecimiento.

2.1.4. Características en aguas residuales

Los siguientes parámetros son característicos de las aguas residuales:

2.1.4.1. Sólidos suspendidos totales

“Se considera como sólidos suspendidos al residuo de la evaporación y secado a 103 – 105 °C”².

2.1.4.2. Color

Las aguas residuales poseen colores característicos, que es un punto importante en el tratamiento de aguas residuales, ya que según sea el caso que es utilizada el agua, debe reducirse los parámetros de color hasta un mínimo considerable. El color de aguas residuales se ve afectado principalmente en las industrias de colorantes de textiles y los de pulpa de papel.

2.1.4.3. Fósforo

En aguas residuales domésticas el contenido de fósforo oscila entre 6 y 20 mg/L. Las formas usuales de fósforo son los ortofosfatos, polifosfatos y fosfatos orgánicos. Los ortofosfatos son aptos para el metabolismo biológico. “El fosfato orgánico puede ser vital en residuos industriales y en lodos de aguas residuales”³.

² VARGAS CAMARENO, Maricruz; ROMERO ESQUIVEL, Luis Guillermo. *Aprovechamiento de algunos materiales en el desarrollo de coagulantes y floculantes para el tratamiento de aguas en Costa Rica*. p.71.

³ Ibid p. 57.

2.2. Agua carbonatada

“Son bebidas elaboradas a base de agua, anhídrido carbónico y la adición de ácido cítrico, esencias extraídas de frutos cítricos y edulcorantes naturales o artificiales”⁴.

2.2.1. Composición de las bebidas carbonatadas

- Agua: este componente es la base de la bebida. El agua utilizada debe ser tratada para eliminar cualquier tipo de microorganismo o bacteria. De igual manera, disminuir el pH, debido a la alcalinidad del agua con el propósito de prevenir la neutralización del ácido aplicado a la bebida, lo cual afectaría la calidad del sabor y reduciría su estabilidad.
- Dióxido de carbono: le proporciona el burbujeo a la bebida y evita el desarrollo de hongos y levaduras. Se incluye al final del proceso de fabricación, como etapa preliminar al proceso de capsulado del envase.
- Aditivos: se agregan aditivos desde el jarabe terminado tales como aromatizantes, colorantes, conservantes, espesantes, entre otros. Estas ayudan a conservar los efectos químicos y biológicos y dar las características de la bebida.
- Saborizantes: son elaborados según cada empresa y les dan el sabor característico correspondiente a las bebidas. Son utilizados para mejorar el sabor y aroma de la bebida.

⁴ ALENCASTRO, Nikole. *Análisis comparativo de la concentración de aspartame (edulcorante) de tres marcas de bebidas carbonatadas comercializadas en la ciudad de Guayaquil*. p. 23.

- Colorantes: sustancias que adicionan color a un alimento.
- Conservantes: son sustancias que se utilizan para evitar la descomposición de un alimento. La mayoría reacciona frente a mohos y levaduras.
- Acidulantes: brinda a la bebida un ligero sabor ácido. Los más utilizados son el ácido ascórbico, ácido cítrico, y se utilizan para dar sabor a las bebidas de limón y naranja. El ácido acético y ácido fosfórico se utilizan para bebidas de cola, el cual es el más utilizado en la industria de agua carbonatada.

2.2.2. Aguas residuales en la industria de agua carbonatada

El contenido del agua residual en la industria de agua carbonatada puede incluir restos de jarabe y bebida que no se pudo embotellar, agua del lavado de botellas, detergentes y/o productos cáusticos. Estos contaminantes contienen alta carga orgánica e inorgánica, y llega directamente a la planta de tratamiento de agua residual.

2.3. Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales es un conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos para la eliminación de contaminantes y efluentes industriales, dicha agua debe estar regulada para el desecho a las alcantarillas.

“Las operaciones más importantes que se llevan a cabo en el tratamiento de aguas son de cribado, desarenadores, aireación, coagulación-floculación, filtración y desinfección”⁵.

2.3.1. Coagulación

Es el proceso en donde tiene como objetivo desestabilizar las partículas coloidales, que se encuentran en suspensión, y de esta manera facilita la aglomeración de partículas. Eliminando la turbidez del agua, la concentración de materias orgánicas y los microorganismos. El proceso de coagulación está altamente relacionado al proceso de floculación, el cual tiene como objetivo en facilitar a partir de una mezcla lenta el contacto de las partículas desestabilizadas. Luego, estas partículas se aglutinan para después ser eliminadas por medio de decantación o filtración

2.3.2. Partículas coloidales

Son partículas muy pequeñas, las cuales causan la turbiedad y el color del agua. Estas partículas se encuentran en suspensión en el agua por tiempo prolongado y tiene las propiedades de atravesar un medio filtrante muy fino.

Existen partículas coloidales hidrofílicas, quiere decir que tienen afinidad por el agua e hidrofóbicas, que rechazan el agua. Las partículas coloidales hidrofílicas se caracterizan por la dispersión espontánea dentro del agua y son rodeadas por moléculas de agua que evita todo el contacto posterior entre las partículas. La carga eléctrica y la capa de agua que están alrededor de las partículas hidrofílicas tienden a desplazar las partículas unas de otras y esto

⁵ DÍAZ, Jakelin. *Aplicación de la enzima papaína obtenida a partir de las semillas Carica Papaya como coagulante natural para la remoción de turbidez en la PTAR-V.E.S.* p. 9.

causa que se estabilicen. En caso contrario con las partículas coloidales hidrofóbicas, las cuales no son rodeadas por moléculas de agua, la dispersión dentro del agua no es espontánea y requiere de medios físicos y químicos.

2.3.3. Carga eléctrica y doble capa

Las partículas coloidales poseen una carga eléctrica negativa, las cuales son llamadas cargas primarias, atraen los iones positivos de las moléculas del agua. Estas se adhieren a las partículas fuertemente y atraen a su alrededor iones negativos acompañados de unos pocos de iones positivos, formando una capa difusa.

2.3.4. Mecanismos de coagulación

- Comprensión de la doble capa: al momento que dos partículas semejantes se acercan, sus capas difusas interactúan y generan una fuerza de repulsión, estas están en función de la distancia que los separa y disminuye proporcionalmente con el incremento de iones de carga opuesta al de las partículas. Esto es por medio de los iones del coagulante. Sin embargo, existe otra fuerza de atracción entre las partículas llamadas fuerzas de Van der Waals, la cual depende de los átomos de las partículas y de la densidad de estos.
- Absorción y neutralización de cargas: las partículas coloidales poseen carga negativa en su superficie, estas cargas atraen los iones positivos que se encuentran en el agua y forman la primera capa adherida al coloide.
- A partir de la teoría de doble capa la coagulación es considerada como la anulación del potencial obtenido por adición de productos coagulantes y

de floculación y por medio del movimiento browniano no se requiere una energía complementaria necesaria como agitación mecánica.

- Atrapamiento de partículas de un precipitado: al momento de obtener partículas coloidales desestabilizadas, estas pueden formar un floculo, cuando se adiciona la cantidad necesaria de coagulante.

2.3.5. Factores que influyen en la coagulación

- Influencia del pH: es uno de los parámetros más importantes, ya que, al momento de coagulación, existe un rango de pH óptimo en donde la coagulación tiene un proceso rápido, depende de la naturaleza de los iones y de la alcalinidad del agua. Si la coagulación se realiza fuera del pH óptimo, se debe aumentar la dosis del coagulante.
- Influencia de sales disueltas: las sales disueltas en el agua poseen influencias sobre la coagulación en la modificación del rango del pH óptimo, tiempo requerido para la floculación, cantidad de coagulante requeridos y cantidad residual del coagulante dentro del efluente.
- Influencia de la temperatura del agua: la variación de temperatura del agua tiene relación con la variación de la densidad de esta. Afectando la energía cinética de las partículas en suspensión, por lo que la coagulación se hace más lenta. Sin embargo, las temperaturas muy elevadas no favorecen a la coagulación.
- Influencia de la dosis de coagulante: se debe tener una dosis óptima de coagulante para tener una gran eficiencia de coagulación. En el caso de tener poca cantidad de coagulante, no neutraliza la carga de la partícula,

la formación de flóculos es muy escaso, y como resultado, la turbiedad es elevada. Una alta cantidad de coagulante produce la inversión de la carga de la partícula, produce la formación de grandes cantidades de flóculos con tamaños muy pequeños en donde las velocidades de sedimentación son bajas, dando como resultado de la misma forma una turbiedad elevada.

- Influencia de mezcla: la influencia de la mezcla se relaciona con el grado de agitación que se realiza a la masa de agua en la adición del coagulante, y la cual determina si la coagulación es completa. Una agitación irregular produce que cierta porción de agua tenga mayores concentraciones de coagulantes que otras partes. Es por ello por lo que la agitación debe ser uniforme e interesa en toda la masa de agua, y de esta manera se asegura que se haya producido la reacción química de neutralización de cargas correspondiente.
- Influencia de la turbiedad: la turbiedad es una forma de medida de la concentración de las partículas suspendidas en un líquido. Se mide el efecto de la dispersión de estas partículas presentes al paso de luz.

En el proceso de coagulación y floculación existe dos etapas. La primera etapa, se considera como una mezcla rápida, la mezcla es enérgica y de corta duración, que tiene por objetivo dispersar la totalidad del coagulante dentro del volumen de agua a tratar. La segunda etapa es una mezcla lenta para que se pueda producir los micro flóculos.

Existe la dosis óptima en donde la cantidad de coagulante para obtener la turbiedad residual más baja. Cuando la turbiedad aumenta no se debe adicionar mucho mayor la cantidad de coagulante debido a la probabilidad de colisión entre

las partículas es muy elevada, por lo que la coagulación se realiza con facilidad. Sin embargo, si la turbiedad es baja, la coagulación se realiza muy difícilmente, y la cantidad de coagulante es igual o mayor que si la turbiedad fuera alta.

2.3.6. Etapas de coagulación

El tiempo de coagulación se realiza de manera rápida. Sin embargo, se producen las siguientes etapas:

- Hidrólisis de los coagulantes.
- Desestabilización de las partículas de suspensión.
- Formación de compuestos químicos poliméricos.
- Adsorción de cadenas poliméricas por coloides.
- Adsorción de coloides.
- Acción de barrido.

2.3.7. Flocculación

Corresponde a la segunda etapa de la mezcla de coagulación, la cual permite el contacto entre flóculos, turbiedad y color. La velocidad debe ser óptima para que los flóculos no tengan riesgo de rompimiento. Permite el crecimiento y aglomeración de los flóculos recién formados con la finalidad de aumentar su tamaño y pesos necesarios para facilitar su sedimentación. Reúne los flóculos en forma de red, con puentes de una superficie a otra enlazando las partículas individuales en aglomerados.

2.3.7.1. Parámetros de la floculación

- Floculación ortocinética: esta se basa a las colisiones entre las partículas por medio del movimiento del agua, el cual puede ser de origen mecánico o hidráulico.
- Gradiente de velocidad: es la energía necesaria para producir la mezcla.
- Número de colisiones.
- Densidad.
- Tamaño del flóculo.
- Volumen de lodos.

2.4. Prueba de jarras

Esta prueba determina el comportamiento de los coagulantes y floculantes a pequeña escala. Permite obtener el agua de buena calidad y de tal manera que la decantación sea realizada fácilmente. Se realiza con diferentes dosis para obtener una turbiedad diferente. Con esta prueba se pueden determinar las variables físicas y químicas del proceso de coagulación y floculación como la selección del pH óptimo, gradientes de mezcla rápida, correlación de las velocidades de sedimentación y la eficiencia de remoción.

2.5. Coagulantes químicos

Los iones metálicos, sales de hierro y aluminio han sido de los coagulantes más utilizados en la clarificación de agua y en la eliminación de DBO y fosfatos de aguas residuales. Estos coagulantes tienen la desventaja de ser sensibles al cambio de pH, por lo que, si no están en el rango adecuado de pH, la clarificación será menor y puede llegar a solubilizar hierro y aluminio, provocando problemas de contaminación.

2.5.1. Sulfato de aluminio

El sulfato de aluminio reacciona con el agua en medio débilmente ácido, neutro o débilmente alcalino, produciendo hidróxido de aluminio insoluble. Es un floculo gelatinoso que sedimenta lentamente y arrastra consigo a las partículas en suspensión. El hidróxido de aluminio recién precipitado tiene la importante propiedad de adsorber fuertemente ciertos colorantes orgánicos formando lo que denominan lacas.

2.6. Coagulantes naturales

Los coagulantes naturales de origen vegetal, utilizados en la remoción de turbidez en el proceso de tratamiento de aguas residuales son de muy buen uso, ya que todos los extractos de origen vegetal son eficientes en la remoción de la turbidez del agua, producen menor cantidad de lodos y su principal mecanismo de coagulación utilizado es la adsorción y la neutralización de cargas. Por lo general, poseen una pequeña o nula parte de toxicidad y pueden ser productos alimenticios con alto contenido de carbohidratos y proteínas solubles en agua.

2.7. Papaya (Carica papaya)

“El origen de la papaya se ubica en las tierras bajas de América tropical, específicamente la región que pertenece el sureste de México hasta Costa Rica. Pertenece a la familia de la caricácea”⁶.

Los usos que son destinados a la papaya, la cual es una de las mayores fuentes de enzimas vegetales se divide en fruta fresca como alimento, industrial,

⁶ JIMÉNEZ, José A. *Manual práctico para El Cultivo de la Papaya Hawaiana*. p.73.

medicinal y culinario. Los usos culinarios de la papaya son aplicaciones de sus propiedades medicinales proveniente de la enzima papaína, parecida a la peptina animal, y este contenido en el látex. Actúa como una singular y apreciable medicina.

2.7.1. Descripción botánica

- Reino: *Vegetal*.
- Subreino: *Embroyonta*.
- Clase: *Magnoliophyta*
- Subclase: *Dillenidae*.
- Segundo grupo evolutivo: *Diapetala*.
- Orden: *Parietales*.
- Familia: *Caricaceae*.
- Género: *Carica*.
- Especie: *Papaya*.

2.7.2. Composición

Todo lo relacionado al fruto y la planta de la papaya contiene látex, que se considera como un jugo lechoso donde se encuentra la papaína, que se emana con facilidad al momento que se hiere superficialmente cualquier parte del árbol. Sin embargo, es más abundante en las partes tiernas de la planta, en la cáscara de la fruta. Por esta razón, en temas de producción industrial de papaína se extrae de la superficie de la fruta, donde alcanza su máxima actividad productiva. Para la extracción de látex se realiza con incisiones en la fruta, a 10 mm de distancia entre cada una de ellas, y únicamente 5 mm de profundidad.

La composición química del látex del fruto contiene enzimas proteolíticas como la papaína, quimiopapaína y lizosima. También posee ácidos orgánicos, carotenoides, vitaminas A, C y E, y sales minerales como el potasio. Las hojas ya maduras contienen carpaina, el cual es un alcaloide que se deshace con el calor. Las semillas contienen tropacolina, mirocina, caricina y carpasemina, ácido málico, pepsina y pancreatina.

2.7.3. Enzima

Las enzimas son un tipo de catalizadores muy potentes y eficaces, químicamente son proteínas. Al utilizarlas como catalizadores las enzimas actúan en pequeñas cantidades y se recuperan indefinidamente.

2.7.4. Papaína

La papaína es una proteasa que es conocida por su actividad proteolítica. Esta enzima que es utilizada de manera industrial y se encuentra presente en la *Carica papaya*, específicamente en las hojas, tallos, raíces y frutos de la papaya, que cataliza la hidrólisis de la proteína, quiere decir que se adiciona una molécula de agua.

Es una enzima proteolítica, que se encuentra en el látex de la fruta de papaya inmadura. Pertenece a la familia de las proteinasas de cisteína. La enzima es estable en altas temperaturas y pH neutro, pero desnaturalizado a un pH por debajo de 4. El pH óptimo de la papaína se encuentra en un rango de 5,5 - 7,0. Puede conservar su actividad en diversos medios orgánicos. La alta estabilidad de la papaína a condiciones extremas y su disponibilidad de costo accesible hace que sea utilizado para muchos aspectos industriales, como por

ejemplo en ablandador de carne y en la prevención de la neblina de frío en la industria cervecera.

La papaína puede separarse del resto de las enzimas, prepararse rápida y económicamente en una forma cristalina, con un estado de pureza bueno y en cantidades razonables. Esta separación se realiza con el fin de reducir el contenido de componentes no proteolíticos para obtener una fracción con mayor actividad proteolítica, obtener un producto más estable para incrementar su vida de almacenamiento y obtener un producto estéril para una aplicación específica.

La papaína es soluble en agua y en alcohol etílico o metílico con concentración del 70 % y notablemente estable en solución de urea, pero puede ser precipitada fácilmente en solución, especialmente a bajas temperaturas.

2.7.5. Propiedades físicas

Las propiedades físicas con sus valores de la papaína se pueden definir a continuación:

Tabla IV. Propiedades físicas de la papaína

Propiedad	Valor
Punto isoeléctrico	pH = 8,5
Constante de sedimentación	2,4+0,04 segundos
Constante de difusión	10,27+0,13x10 ⁷ cm ² seg ⁻¹
Peso molecular	23 350 Daltons

Continuación de la tabla IV.

Coeficiente de extinción	25
Rotación óptica (pH = 5,7, 25 °C)	-66,7

Fuente: GARCÍA, Víctor. ROLDAN, Edwin. *Ensayo de actividad de la enzima papaína inmovilizada y su aplicación en aguas residuales de la industria alimenticia*. p. 24.

2.7.6. Composición química

“La papaína se clasifica como una enzima hidrolasa y proteasa tiolica. Fue la primera enzima reconocida como miembro de una clase de enzimas proteolíticas que necesitan un grupo sulfhídrico libre para desarrollar su actividad”⁷.

Existe como un monómero consistente de 212 aminoácidos. Es una proteína simple que contiene solamente aminoácidos y desprovista de carbohidratos. Están presentes todos los aminoácidos usuales con excepción de la metionina. La composición elemental de la papaína cristalina ha sido comprobada que contiene 16,1 % de nitrógeno y 1,2 % de azufre.

⁷ GARCÍA, Víctor; ROLDAN, Edwin. *Ensayo de actividad de la enzima papaína inmovilizada y su aplicación en aguas residuales de la industria alimenticia*. p. 23.

Tabla V. **Composición de aminoácidos de la papaína**

Nombre aminoácido	Número de aminoácidos presentes en la papaína
Lisina	10
Histidina	2
Arginina	12
Ácido aspártico	6
Asparagina	13
Ácido glutámico	8
Glutamina	12
Treonina	8
Serina	13
Prolina	10
Glicina	28
Alanina	14
Valina	18
Isoleucina	12
Leucina	11
Tirosina	19
Fenilalanina	4
Triptófano	5
Cisteína	1
Cistina	6

Fuente: GARCÍA, Víctor. ROLDAN, Edwin. *Ensayo de actividad de la enzima papaína inmovilizada y su aplicación en aguas residuales de la industria alimenticia*. p. 25.

2.7.7. Látex de la papaya

El látex se encuentra bajo la cáscara de la papaya verde y plenamente desarrollada. Está contenido en unos pequeños vasos largos. Al momento que estos vasos son cortados, aparece un líquido claro como el agua, que se vuelve opaco por su exposición al aire, este líquido es de las fuentes más importantes de la papaína. Existe papaína en otras partes del fruto, pero es más utilizado en la cáscara, ya que las exudaciones son más vigorosas en este lugar.

El látex de papaya consiste en una mezcla de proteasas o enzimas. Se ha comprobado la existencia de cuatro componentes principales con actividad proteolítica como lo son la papaína, quimio papaína, lisozima y material no caracterizado en las proteínas solubles del látex. Estas cuatro proteínas son aproximadamente el 64 % de las proteínas solubles del látex. La quimio papaína es el componente proteolítico más abundante en el extracto.

Tabla VI. **Características de las enzimas de látex de la papaya**

Enzima	Peso molecular	Punto isoelectrico	Concentración en látex
Papaína	21.000	8,75	10 %
Quimio papaína	36.000	10,10	45 %
Lisozima	25.000	10,50	20 %

Fuente: GARCÍA, Víctor. ROLDAN, Edwin. *Ensayo de actividad de la enzima papaína inmovilizada y su aplicación en aguas residuales de la industria alimenticia*. p. 22.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Las variables en la investigación se pueden definir a continuación:

Tabla VII. Definición de las variables a utilizar

No.	Variable	Dimensional	Descripción
1	Dosis de coagulante natural (Papaína de la cáscara de papaya)	Miligramo por litro $\left(\frac{mg}{L}\right)$	Cantidad de coagulante para la remoción de la contaminación del agua residual.
2	Sólidos suspendidos totales (SST)	Miligramo por litro $\left(\frac{mg}{L}\right)$	Cantidad de sólidos retenidos por un filtro de fibra de vidrio en las aguas residuales.
3	Color	Unidades platino-cobalto (U Pt-Co)	Parámetro que mide la cantidad de color contenida en la muestra.

Continuación de la tabla VII.

4	Fósforo total (P _{Total})	Miligramo por litro $\left(\frac{mg}{L}\right)$	El fósforo es un elemento esencial para el crecimiento biológico. Por medio de la digestión todas las formas de fósforo se convierten a fósforo total.
---	--	---	--

Fuente: elaboración propia, empleando en Microsoft Word.

3.1.1. Variable dependiente

La variable dependiente de la investigación fue la siguiente:

Tabla VIII. **Variable dependiente de la investigación**

No.	Variable	Variación
1	Dosis de coagulante natural (Papaína de la cáscara de papaya)	(90-450) mg/L

Fuente: elaboración propia, empleando en Microsoft Word.

3.1.2. Variables independientes

Las variables independientes de la investigación se consideran los siguientes:

Tabla IX. Variables independientes de la investigación

No.	Variable	Variación
1	Sólidos suspendidos totales	(0-100) mg/L
2	Color	(0-500) Unidades platino-cobalto
3	Fósforo total	(0-10) mg/L

Fuente: elaboración propia, con información del artículo 21, Acuerdo Gubernativo de Guatemala, 236-2006, empleando Microsoft Word.

3.2. Delimitación del campo de estudio

El campo de estudio fue delimitado con muestras del efluente original de la manufactura de una industria de embotellado de bebidas carbonatadas, en donde se tomaron en día de trabajo normal y en condiciones estándar de operación, dichas muestras fueron procesadas por medio del equipo de jarras. Luego, fueron analizadas dependiendo los métodos establecidos. Se buscó la evaluación a escala laboratorio de la remoción de sólidos suspendidos totales, color y fósforo total del agua residual al aplicar el coagulante natural de papaína extraída de la cáscara de papaya, variando la dosis de esta.

3.3. Obtención de las muestras

El procedimiento que se realizó para obtener las muestras fue el siguiente:

3.3.1. Recolección de la papaya verde

La recolección de la materia prima (*Carica papaya L.*) fue en la central de mayoreo (CENMA). Luego, se trasladó al laboratorio donde se evaluó si es utilizable para la extracción de papaína a partir de la cáscara y lavar para eliminar contaminantes.

3.3.2. Extracción de la papaína

La extracción de la papaína fue a partir de la cáscara de papaya verde, la cual posee la mayor cantidad de látex en su interior. Se realizaron cortes con cuchillas de acero inoxidable para no dañar la papaína, ya que pierde sus propiedades al ser manipulada por otro tipo de material, y de esta manera obtener solamente la cáscara del fruto. Luego, se secó por medio de un horno a una temperatura de 50 °C por 24 horas. La cáscara seca se trituró. El polvo fue recolectado y almacenado, evitando que obtenga humedad.

3.3.3. Recolección del agua residual

El agua residual será recolectada de los desechos de manufactura de la industria de embotellado de bebidas gaseosas.

3.4. Recursos humanos disponibles

Investigador: Br. Andy Noé Solares Zarceño

Asesor: Ing. Jorge Mario Estrada Asturias

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

Para los recursos materiales se utilizaron los siguientes para la elaboración de la investigación:

3.5.1. Cristalería

- Pipeta serológica 1 mL.
- Pipeta serológica 5 mL.
- Pipeta serológica 10 mL.
- Probeta 50 mL.
- Probeta 100 mL.
- Balón aforado 100 mL.
- Beacker 1 000 mL.
- Beacker 500 mL.
- Beacker de 100 mL.
- Beacker de 50 mL.
- Kitasato.

3.5.2. Equipo

- Balanza analítica de cuatro cifras decimales.
- Espectrofotómetro.
- Termoreactor.

- Horno.
- Molino.
- Desecador.
- Equipo de jarras.
- Equipo de filtración.

3.5.3. Elementos varios

- Recipiente para colocar la materia prima.
- Recipiente para toma de muestras.
- Recipiente para colocar la cáscara de papaya.
- Recipiente para almacenar el polvo de la papaína.
- Cuchillas de acero inoxidable.
- Tamiz.
- Bomba de vacío.
- Filtro de fibra de vidrio.
- Cápsulas de porcelana.
- Pinzas metálicas para manejo de cápsulas y filtros.
- Succionador.
- Agitador magnético.
- Jeringa

3.5.4. Reactivos

- Persulfato de potasio.
- Hidróxido de sodio.
- Sulfato de aluminio.
- Agua desmineralizada.
- Sistema de filtrado.

3.6. Técnicas cuantitativas

Para la recolección numérica de los datos se utilizó las siguientes técnicas:

3.6.1. Prueba de jarras

La prueba de jarras del coagulante natural se realizó por medio de cinco dosis distintas, siguiendo el método de las normas ASTM D2035.

El procedimiento para la prueba de jarras es la siguiente:

- Medir un volumen de 1 000 mL de la muestra a analizar.
- Introducir el volumen en la jarra.
- Encender el agitador a una velocidad de 120 rpm.
- Realizar una disolución del coagulante natural hasta que este disuelto.
- Agitar previamente la disolución a dosificar para que este homogenizado.
- Agregar en la jarra la disolución de coagulante natural dependiendo la dosis a aplicar.
- Dejar agitando por 1 minuto.
- Reducir la velocidad de agitación a 50 rpm.
- Dejar agitando por 20 minutos.
- Retirar las paletas de agitación.
- Esperar 15 minutos para la sedimentación de las partículas.
- Por medio de una pipeta o jeringa, recolectar 150 mL de la parte superior de la muestra.

3.6.2. Sólidos suspendidos totales

Para determinar los sólidos suspendidos totales se realizó a partir del método estándar APHA 2540 para el examen de agua y aguas residuales, edición 23.

El procedimiento para los sólidos suspendidos totales es la siguiente:

- Preparar el equipo de filtración al vacío.
- Colocar filtro de fibra de vidrio en el equipo de filtración.
- Encender el equipo de filtración.
- Lavar el filtro de fibra de vidrio con tres porciones sucesivas de 20 mL de agua destilada.
- Retirar el filtro de fibra de vidrio y colocarlo a una capsula de porcelana.
- Secar el filtro de fibra de vidrio en un horno a 103-105 °C durante 1 hora.
- Retirar el filtro de fibra de vidrio.
- Enfriar el filtro en un desecador a temperatura ambiente.
- Pesar el filtro y la capsula de porcelana.
- Colocar el filtro de fibra de vidrio en el equipo de filtración.
- Tomar 30 mL de la muestra a analizar.
- Homogenizar la muestra, agitándola antes de filtrar.
- Filtrar la muestra a través del filtro de fibra de vidrio.
- Por medio de unas pinzas, retirar con cuidado el filtro del equipo de filtración.
- Colocar el filtro en la capsula de porcelana.
- Secar el filtro en un horno a 103-105 °C durante un tiempo mayor a 1 hora.
- Retirar el filtro de fibra de vidrio.
- Enfriar el filtro en un desecador a temperatura ambiente.

- Pesar el filtro y la capsula de porcelana.
- Repetir el proceso de secado, enfriamiento, desecación y pesaje hasta que el cambio del peso sea menor a 0,5 mg.
- Realizar los cálculos de los sólidos suspendidos totales a partir de la siguiente ecuación:

$$\frac{mg\ SST}{L} = \frac{(A-B)* 1\ 000}{V}$$

Dónde:

$\frac{mg\ SST}{L}$ = miligramos de sólidos suspendidos totales por litro.

A = Peso final del filtro y residuo seco (mg).

B= Peso del filtro (mg).

V= Volumen de la muestra (mL).

3.6.3. Color

Para la determinación de color se realizó a partir del método 8025, color verdadero y aparente, método estándar APHA de platino-cobalto para aguas, aguas residuales y aguas de mar.

El procedimiento para el color es la siguiente:

- Armar el equipo de filtrado (filtro de membranas, soporte del filtro, tubo del filtro y aspirador).
- Enjuagar el filtro vertiendo alrededor de 50 mL de agua destilada a través del filtro. Desechar el agua del enjuague.
- Verter otros 50 mL de agua destilada a través del filtro.
- Llenar una celda de muestra (blanco) con 25 mL de agua destilada filtrada del paso anterior. Desechar el excedente.
- Ingresar el número del programa almacenado para el color verdadero.

- Fijar longitud de onda de 455 nm en el programa, girando el cuadrante de longitud de onda.
- Presionar para la medición de la muestra cero.
- Aparecerá las unidades de medida UNITS PtCo APHA
- Verter alrededor de 50 mL de la muestra a través del filtro.
- Llenar una segunda celda de muestra (la muestra preparada) con 25 mL de la muestra filtrada.
- Ubicar el blanco en el soporte de la celda. Cerrar el escudo para la luz.
- Presionar ZERO y mostrará 0 UNITS PtCo APHA.
- Ubicar la muestra preparada en el soporte de la celda. Cerrar el escudo para la luz.
- Presionar READ.
- Tomar el resultado de color en unidades de platino-cobalto.

3.6.4. Fósforo total

Para la determinación de fósforo total se realizó a partir del método 8190 Fósforo, Total, método de PhosVer 3; digestión con persulfato ácido para aguas, aguas residuales y aguas de mar.

El procedimiento para el fósforo total es la siguiente:

- Encender el termoreactor y calentar a 150 °C.
- Ingresar el número del programa en el espectrofotómetro para el fósforo reactivo.
- Fijar una longitud de onda de 890 nm, girando el cuadrante de la longitud de onda.
- Utilizar una pipeta para agregar 5 mL de muestra a un tubo de fósforo total.

- Agregar 2 mL de ácido sulfúrico al tubo.
- Realizar un blanco reactivo para esta prueba utilizando agua desmineralizada en lugar de la muestra a analizar.
- Por medio de un embudo, agregar los contenidos de una bolsa de polvo de persulfato de potasio para fosfonato al tubo.
- Tapar herméticamente y agitar para disolver.
- Calentar el tubo durante 30 minutos a 150 °C.
- Retirar cuidadosamente el tubo del reactor.
- Colocar el tubo en un soporte para tubos de ensayo.
- Dejar enfriar a temperatura ambiente.
- Utilizar una pipeta para agregar 2 mL de hidróxido de sodio 1.54 N al tubo.
- Tapar y mezclar el tubo.
- Colocar el adaptador de DQO en el soporte de la celda del espectrofotómetro con el indicador a la derecha.
- Limpiar el exterior del tubo con una toalla.
- Colocar el tubo de muestreo en el adaptador con el logotipo al frente del instrumento. Colocar la tapa en el adaptador.
- Presionar ZERO.
- Con un embudo agregar los contenidos de una bolsa de polvo de reactivo de fosfato PhosVer 3 para 10 mL en el tubo.
- Tapar herméticamente y agitar durante 10 a 15 segundos.
- Presionar SHIFT TIMER y comenzará un periodo de espera de 2 minutos.
- Al momento de sonar el cronómetro, limpiar el exterior del tubo de muestreo con una toalla.
- Colocar el tubo de muestreo preparado en el adaptador con el logo de cara al frente del instrumento. Tapar el adaptador.
- Presionar READ.
- Tomar el resultado en miligramos por litro del fósforo total (PO₄-3).

3.6.5. Porcentaje de remoción

Para determinar el porcentaje de remoción de cada una de las pruebas a analizar a partir de la aplicación del coagulante natural de papaína extraída de la cáscara de papaya, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\%R = \left(\frac{D_i - D_f}{D_i} \right) * 100$$

Dónde:

%R= Porcentaje de remoción.

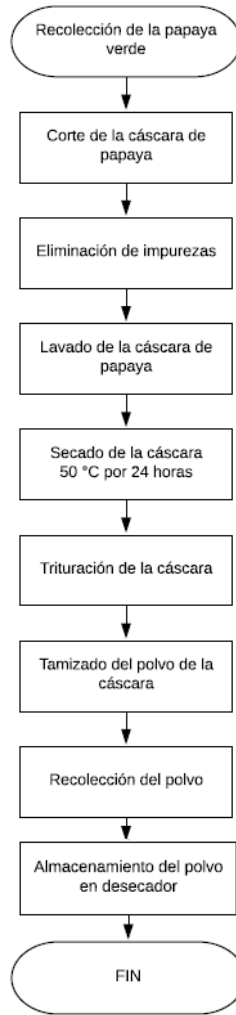
D_i = Dato inicial del parámetro a analizar (agua cruda).

D_f = Dato final del parámetro a analizar (utilizando coagulante).

3.7. Recolección y ordenamiento de la información

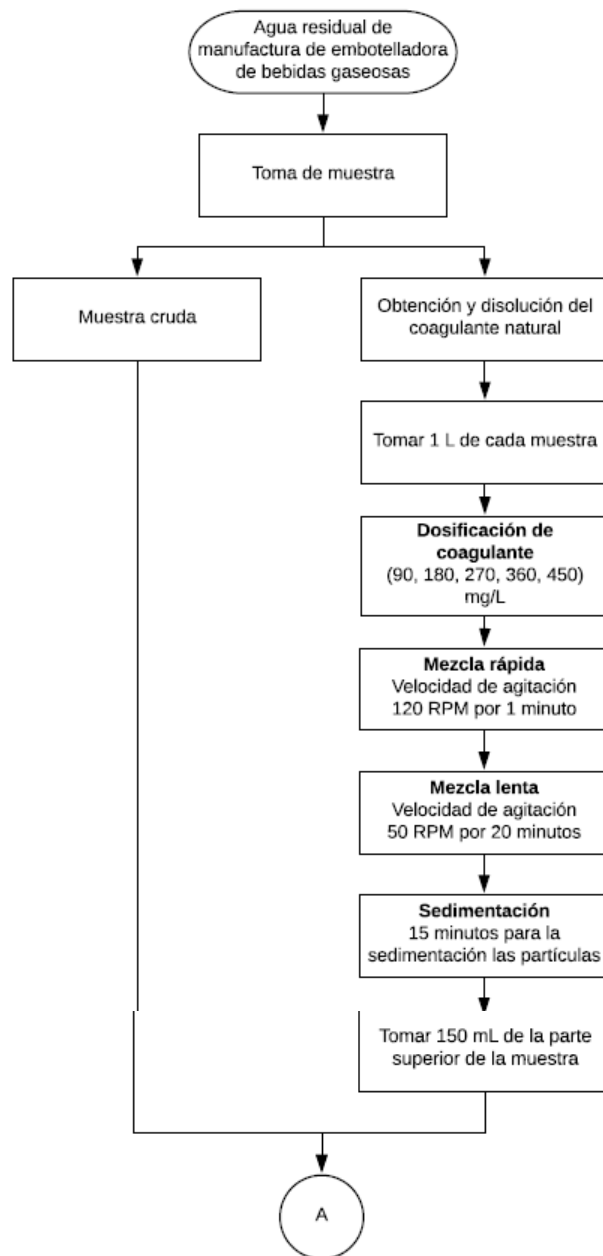
El proceso se llevará a cabo de la siguiente manera:

Figura 1. **Procedimiento de la obtención del coagulante natural**

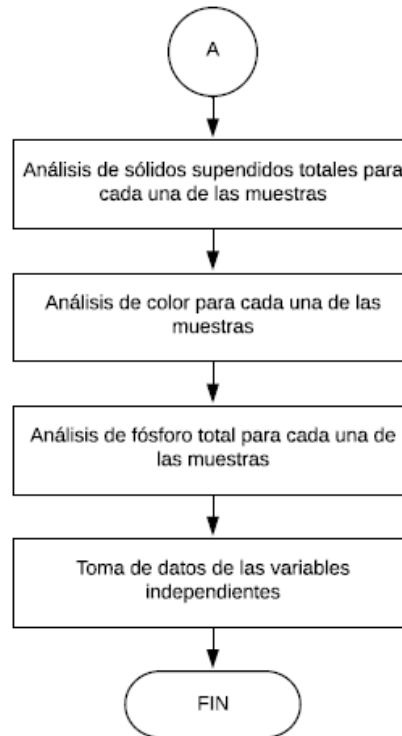


Fuente: elaboración propia, empleando Lucidchart.

Figura 2. **Procedimiento de recolección y ordenamiento de la información**

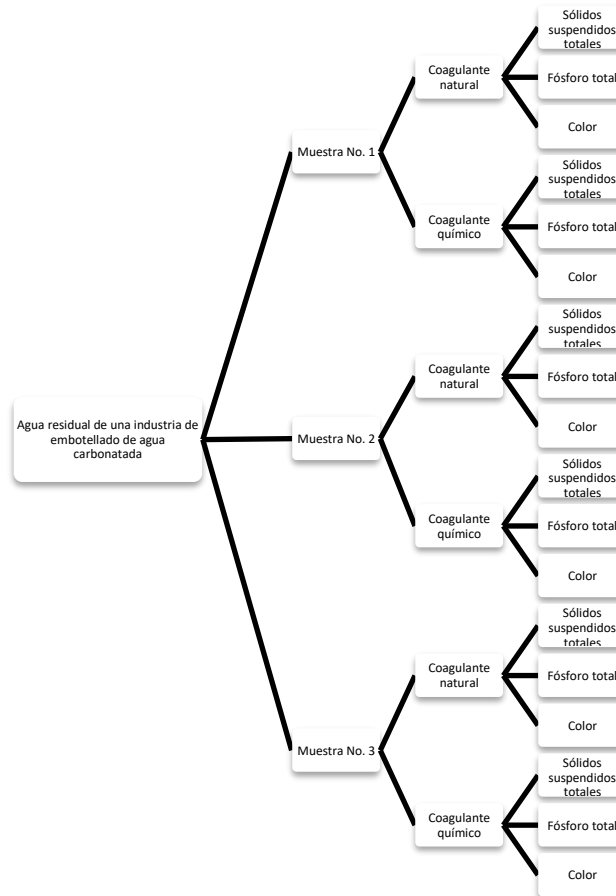


Continuación de la figura 2.



Fuente: elaboración propia, empleando Lucidchart.

Figura 3. Descripción del experimento



Fuente: elaboración propia, empleando Lucidchart.

3.8. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Se recolectaron los datos experimentales obtenidos a partir de las pruebas de jarras a las distintas concentraciones, luego, se ordenaron y tabularon los datos en Microsoft Excel y posteriormente se utilizó el programa estadístico Infostat para realizar el análisis estadístico.

3.9. Análisis estadístico

Se realizó el análisis estadístico mediante los siguientes procedimientos:

3.9.1. Determinación del número de corridas

En este estudio se realizaron 3 muestreos, en tres días distintos, por lo que se realizó la prueba de jarras y se analizó para estas 3 muestras.

3.9.2. Media aritmética de las muestras

La ecuación de la media aritmética se observa a continuación:

$$\underline{x} = \frac{\sum X_i}{N}$$

Dónde:

\underline{x} = Media aritmética.

$\sum X_i$ = Sumatoria de valores.

N = Número de datos.

3.9.3. Varianza

La ecuación de varianza se observa a continuación:

$$S^2 = \frac{\sum(X_i - \underline{x})^2}{N}$$

Dónde:

S^2 = Varianza.

\underline{x} = Valor promedio.

X_i = Valor de la muestra.

N = Número de datos.

3.9.4. Desviación estándar

La ecuación de la desviación estándar se observa a continuación:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(X_i - \underline{x})^2}{N}}$$

Dónde:

s = desviación estándar

\underline{x} = valor promedio.

X_i = valor de la muestra.

N = número de datos.

3.9.5. Análisis de varianza

Para esta investigación se realizó el análisis de varianza de dos factores con varias muestras por grupo para poder determinar si existe relación entre las diferentes dosis de coagulante aplicados a la muestra y el porcentaje de remoción en los parámetros de sólidos suspendidos totales, color y fósforo total, esto al utilizar coagulante natural y coagulante químico.

3.9.6. Prueba de Tukey

La prueba de Tukey permitió obtener la dosis óptima de coagulante natural, ya que realiza una comparación entre las medias de dosis de coagulante para saber qué tan significativo diferente son entre sí.

3.10. Plan de análisis de los resultados

El plan de análisis de resultados se llevó a cabo por medio estadística y gráficas que se describen a continuación:

3.10.1. Métodos y modelos de los datos según tipo de variables

Se analizaron los datos obtenidos de las pruebas de forma matemática, estadística y gráfica, así obteniendo el comportamiento que posee la dosis de coagulante natural en relación con la remoción de sólidos suspendidos totales, color y fósforo total, de esta manera determinar si la papaína extraída de la cáscara de papaya es un material utilizable para la remoción de contaminantes en aguas residuales.

3.10.2. Programas para utilizar para análisis de datos

- Microsoft Excel: para la realización de ordenamiento de la información, obtención de gráficas, correlaciones matemáticas.
- Microsoft Word: procesamiento de textos, tabulación y ordenamiento de resultados y presentación.
- INFOSTAT: para realizar el análisis estadístico, validación de hipótesis y gráficas estadísticas sobre los datos recolectados.

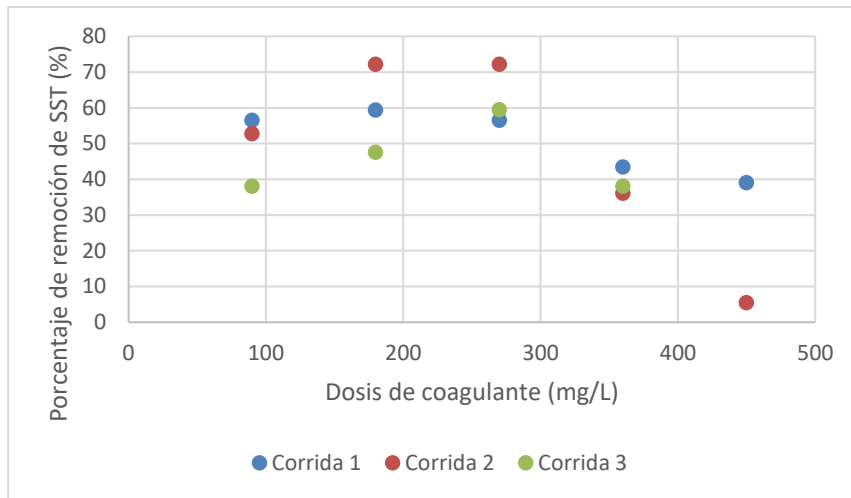
4. RESULTADOS

Tabla X. **Caracterización del agua residual de la industria de agua carbonatada sin tratamiento previo**

Muestra	Sólidos suspendidos totales $\left(\frac{mg}{L}\right)$	Color (U Pt-Co)	Fósforo total $\left(\frac{mg}{L}\right)$
1	0,23	1.412	0,12
2	0,12	897	0,14
3	0,14	1.244	0,16

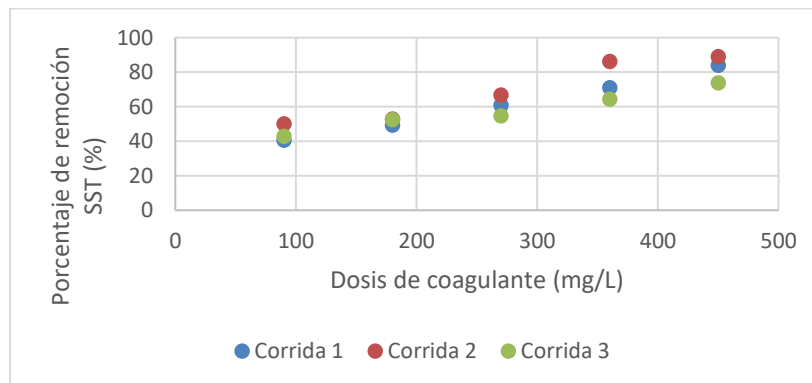
Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 1 y 2, empleando Microsoft Word.

Figura 4. **Porcentaje de remoción de sólidos suspendidos totales en función de dosis de coagulante papaína en distintas corridas**



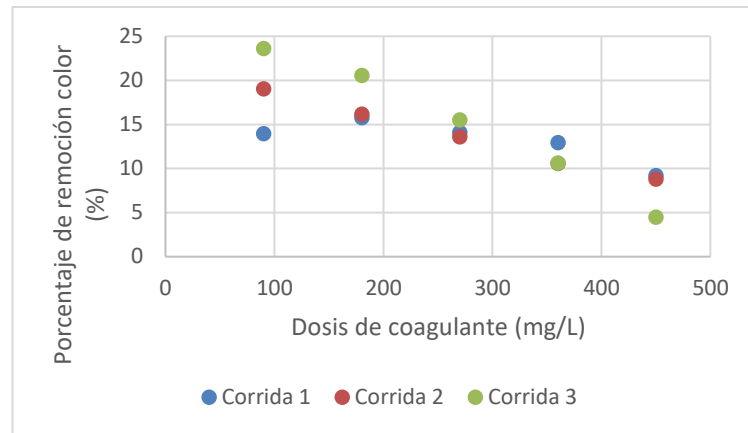
Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 7, empleando Microsoft Excel.

Figura 5. **Porcentaje de remoción de sólidos suspendidos totales en función de dosis de coagulante sulfato de aluminio en distintas corridas**



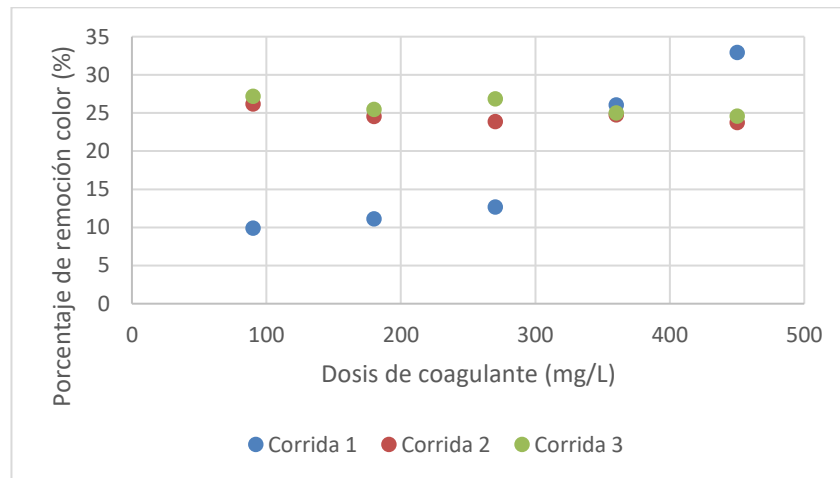
Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 8, empleando Microsoft Excel.

Figura 6. **Porcentaje de remoción de color en función de dosis de coagulante papaína en distintas corridas**



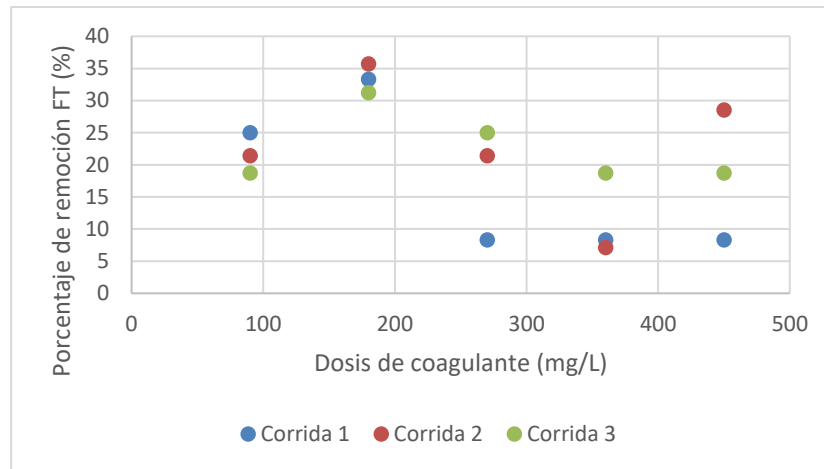
Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 7, empleando Microsoft Excel.

Figura 7. **Porcentaje de remoción de color en función de dosis de coagulante sulfato de aluminio en distintas corridas**



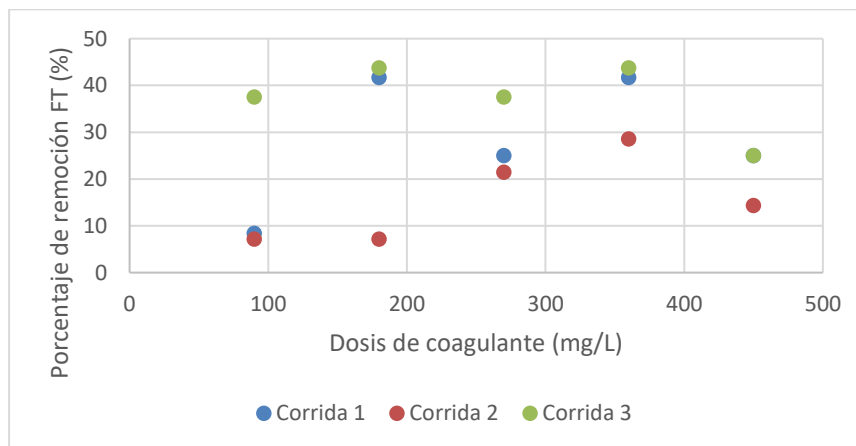
Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 8, empleando Microsoft Excel.

Figura 8. **Porcentaje de remoción de fósforo total en función de dosis de coagulante papaína en distintas corridas**



Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 7, empleando Microsoft Excel.

Figura 9. **Porcentaje de remoción de fósforo total en función de dosis de coagulante sulfato de aluminio en distintas corridas**



Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 8, empleando Microsoft Excel.

Tabla XI. **Dosis óptima de coagulante natural, papaína con sus respectivos porcentajes de remoción**

Coagulante	Parámetro	Dosis de coagulante $\left(\frac{mg}{L}\right)$	Media de porcentaje de remoción (%)
Papaína	Sólidos suspendidos totales	270	63,76
	Color	90	18,88
	Fósforo total	90	21,73

Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 9, empleando Microsoft Excel.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En el tratamiento de aguas residuales, un proceso importante es la coagulación y floculación, que nos ayuda a mejorar la calidad de agua residuales, y de esta manera, se puede aprovechar esta agua en otro tipo de proceso secundario o vertimiento en un cuerpo de agua, evitando así su contaminación. Una de las principales pruebas que se realizan en el proceso de coagulación y floculación es la prueba de jarras, ya que con esta prueba a pequeña escala se puede evaluar la dosis óptima de coagulante necesario en el proceso.

Según GUZMÁN, Luis en tesis *Reducción de la turbidez del agua usando coagulantes naturales: una revisión*, se concluyó que todos los extractos de origen vegetal reportados en ella son eficientes en la remoción de la turbidez del agua, producen menor cantidad de lodos, lo cual genera un beneficio al momento del tratamiento posterior de dichos lodos, al tener una menor cantidad, el costo de tratamiento de igual forma disminuye. Basado en esto, en la presente investigación se decidió evaluar la eficacia de la papaína extraída de la cáscara de papaya para remover sólidos suspendidos totales, color y fósforo total.

Se han realizado estudios similares utilizando la enzima papaína obtenida a partir de las semillas de papaya como coagulante natural para la remoción de turbidez en plantas de tratamiento de aguas residuales. Este estudio fue realizado por Jakelin Díaz en la Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, en donde se concluyó que la dosis óptima de coagulante a base de le enzima papaína fue de 200 mg/L, sin embargo, no hubo diferencia significativa en las dosis evaluadas. Asimismo, se concluye que la semilla de papaya es efectiva para la remoción de turbidez del agua.

Se escogió trabajar con la industria de agua carbonatada, debido a la alta demanda que tiene y el alto grado de utilización de agua en la misma. Por lo que el tratamiento adecuado del agua residual debe ser de las principales prioridades de esta industria. Los parámetros evaluados se escogieron debido al tipo de tratamiento anaerobio y aerobio en la industria donde se obtuvieron las muestras, lo cual hacen importante monitorear los niveles de sólidos suspendidos totales y fósforo total para que no afecte de manera considerable a los microorganismos que consumen la materia orgánica del agua residual. El color de igual forma es un parámetro que se regula en Guatemala y por la entidad en donde se tomaron las muestras.

Se realizaron pruebas de coagulación con enzima papaína extraída de la cáscara de papaya, esto debido que los coagulantes naturales son eficientes en la remoción de contaminantes en el tratamiento de aguas residuales, al igual que son de bajo costo, ya que se puede utilizar de los desechos de un proceso anterior, como en este caso la cáscara. El efecto de la papaína, como coagulante, fue comparado con el sulfato de aluminio, un coagulante utilizado normalmente en el tratamiento de aguas residuales.

En esta investigación se realizó una caracterización del agua residual sin tratamiento. El resultado de las muestras se puede observar en la tabla No. X. A partir del análisis estadístico de varianza, con un nivel de significancia de 0,05, se comparó el agua residual sin tratamiento, con el agua residual tratada con papaína. Los resultados de este análisis permitieron concluir que el tratamiento con papaína provoca variaciones en los sólidos suspendidos totales y en la concentración de fósforo total. También se evaluó si el uso de este coagulante provocaba cambios en el color del agua residual, pero el análisis estadístico mostró que el tratamiento con papaína no provocaba una diferencia significativa en el color, obteniendo un porcentaje de remoción promedio de 18,88 %.

De la misma manera, se evaluó de manera estadística la variación entre el agua residual sin tratamiento y la tratada con papaína con sus diferentes dosis de coagulante, en donde se determinó que para los tres parámetros: sólidos suspendidos totales, color y fósforo total no hay variación al modificar la dosis de coagulante. Sin embargo, la dosis con mayor porcentaje de remoción en sólidos suspendidos totales es la de 270 mg/L, con un porcentaje de remoción del 63,76 %, por lo que es recomendable utilizar esta dosis de coagulante al requerir remover los sólidos suspendidos totales. En parámetros de color y fósforo total se utiliza como dosis óptima la dosis más baja, esto debido a que no hay una variación significativa entre dosis, no se evidencia un porcentaje de remoción alto y se puede considerar el uso mínimo de papaína para el menor consumo de material.

En la figura 5, se pueden observar los porcentajes de remoción de los sólidos suspendidos totales en función de la dosis de papaína aplicada en las diferentes repeticiones. La cual muestra que la dosis con mayor porcentaje de remoción se encuentra en un rango de 180 mg/L a 270 mg/L. Por la tendencia, al aplicar una dosis más alta, el porcentaje de remoción disminuye, por lo que es recomendable utilizar el rango anteriormente mencionado. En la figura 6, se puede observar el porcentaje de remoción de sólidos suspendidos totales en función de dosis de sulfato de aluminio, en donde se muestra que la dosis con mayor porcentaje de remoción se encuentra en 450 mg/L, por lo cual es recomendable utilizar esta dosis de coagulante. Al realizar la comparativa entre los dos coagulantes evaluados, el sulfato de aluminio posee un mayor porcentaje de remoción de sólidos suspendidos totales, este porcentaje se encuentra entre 75 % al 90 %. Mientras que para la papaína el mayor porcentaje de remoción se encuentra entre 58 % al 72 %. Sin embargo, se debe considerar que se necesita una mayor dosis de coagulante de sulfato de aluminio para poder alcanzar el mayor porcentaje de remoción.

Para el porcentaje de remoción de color en función de dosis de coagulante papaína se puede observar en la figura 7, en donde el mayor porcentaje de remoción se encuentra al aplicar una dosis de 90 mg/L. Para la dosis óptima se recomienda una dosis de 90 mg/L, ya que no hay una variación significativa entre dosis. El efecto de aplicar una dosis mayor de coagulante provoca una disminución en el porcentaje de remoción, por lo que es recomendable utilizar la dosis anteriormente mencionada. Sin embargo, el efecto de papaína para la remoción de color no es recomendada, ya que el rango del porcentaje de remoción se encuentra entre 14 % al 24 %. En la figura 8, se encuentra el porcentaje de remoción de color para el sulfato de aluminio, por lo que se observa que la dosis de coagulante con mayor porcentaje de remoción es 450 mg/L, pero de igual forma, como en el caso de la papaína, el rango de porcentaje de remoción se encuentra bajo, entre 25 % al 34 %. Por lo que, no es recomendable utilizar estos coagulantes para la remoción de color por sus bajos porcentajes de remoción.

La remoción de fósforo total aplicando dosis de papaína se puede observar en la figura 9, en donde la dosis con mayor porcentaje de remoción está en 180 mg/L, con un rango de porcentaje de remoción entre 31 % a 36 %. El efecto que se tiene con una dosis de coagulante mayor fue que disminuye el porcentaje de remoción. El porcentaje de remoción del sulfato de aluminio se encuentra en la figura 10, en donde se muestra que la dosis de coagulante con mayor porcentaje de remoción está en 360 mg/L y el rango de porcentaje de remoción para esta dosis es de 28 % a 45 %. El porcentaje de remoción entre los dos coagulantes son similares, sin embargo, se utiliza una mayor dosis en el sulfato de aluminio, por lo que para la remoción de fósforo total es recomendable utilizar la papaína como coagulante.

Se realizó análisis estadístico para determinar si existe diferencia de remoción entre el coagulante a base de papaína y el sulfato de aluminio. Para esto se utilizó el análisis de varianza con un nivel de significancia del 0,05. En el caso de sólidos suspendidos totales se determinó que existe variación entre el resultado obtenido con la papaína y el sulfato de aluminio. Sin embargo, para los parámetros color y fósforo total, se concluyó que ambos coagulantes ofrecen resultados similares en el efecto de remoción. Quiere decir, que no existe variación entre los resultados obtenidos con la papaína y el sulfato de aluminio.

A partir de la prueba de Tukey se pudo obtener la dosis óptima de papaína, la cual se logra observar los resultados en la tabla XI y apéndice 9. La dosis óptima de papaína para los sólidos suspendidos totales fue de 270 mg/L con esta dosis se obtiene un porcentaje de remoción de 63,76 %. Se recomienda utilizar esta dosis por su alto porcentaje de remoción, sin embargo, estadísticamente no existe variación entre las dosis de coagulante aplicadas. Para el parámetro de color se tiene una dosis óptima de coagulante del 90 mg/L, con un porcentaje de remoción del 18,88 % y para el fósforo total, la dosis óptima es de 90 mg/L con un porcentaje de 21,73 %, se utiliza la dosis más baja por su poca eficiencia en la remoción de estos dos parámetros y que no existe variaciones entre las dosis aplicadas.

CONCLUSIONES

1. Existe variación entre el agua residual sin tratar y la tratada con papaína para la remoción de sólidos suspendidos totales, pero no existe variación significativa en la remoción de parámetros de color y fósforo total. Estadísticamente, no existe variaciones significativas aplicando diferentes dosis de coagulante.
2. Se determinó la dosis óptima de la papaína extraída de la cáscara de papaya para remover sólidos suspendidos totales, color y fósforo total para la industria de agua carbonatada, en donde para los sólidos suspendidos totales fue de 270 mg/L con una media de porcentaje de remoción de 63,76 %, para el color y fósforo total fue de 90 mg/L con media de porcentaje de remoción de 18,88 % y 21,73 %, respectivamente.
3. Existe variación entre el agua residual tratada con papaína y sulfato de aluminio en la remoción de sólidos suspendidos totales, pero no existe variación en la remoción de parámetros de color y fósforo total al ser tratada con los dos tipos de coagulantes anteriormente mencionados.
4. Para la industria de agua carbonatada, se concluyó que la utilización de papaína como coagulante, se debe utilizar principalmente para la remoción de sólidos suspendidos totales, ya que el porcentaje de remoción comparándolo con los parámetros de color y fósforo total es significativo.

RECOMENDACIONES

1. Realizar el análisis sustituyendo el sulfato de aluminio por cloruro férrico, ya que este es el que se utilizaba anteriormente en el tratamiento de aguas residuales de la industria de agua carbonatada.
2. Realizar un estudio económico para la comparativa entre la utilización de la papaína extraída de la cáscara de papaya y el sulfato de aluminio, para verificar su viabilidad en cuestión de costos, considerando el costo de tratamiento de lodos obtenidos.
3. Realizar el análisis con otro tipo de coagulante natural para la remoción en las aguas residuales de la industria de agua carbonatada.
4. Determinar la remoción de otros parámetros utilizados en el tratamiento de aguas residuales como lo son: DQO, DBO5, pH y nitrógeno, utilizando papaína y sulfato de aluminio como coagulantes.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALENCASTRO, Nikole. *Análisis comparativo de la concentración de aspartame (edulcorante) de tres marcas de bebidas carbonatadas comercializadas en la ciudad de Guayaquil*. Guayaquil, Ecuador: Universidad Agraria del Ecuador. 2020. 192 p.
2. ANDÍA, Yolanda. *Tratamiento de Agua: Coagulación Y Floculación. Evaluación de Plantas y Desarrollo tecnológico*. Lima, Perú: SEDEPAL. 2000. 44 p.
3. ASTM. (2013). *Practice for Coagulation-Flocculation Jar Test of Water*. [en línea]. <<https://doi.org/10.1520/d2035-13>>. [Consulta: 24 de febrero de 2022].
4. BAIRD, Rodger. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23va edición. Washington DC, Estados Unidos. American Public Health Association. 2017. 1546 p.
5. CHOQUE-QUISPE, David; CHOQUE-QUISPE, Yudith; SOLANO-REYNOSO, Aydeé M. y RAMOS-PACHECO, Betsy S. *Capacidad floculante de coagulantes naturales en el tratamiento de agua*. [en línea]. <http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852018000200008&lng=es&nrm=iso>. [Consulta: 13 de marzo de 2022].

6. Consultoría de Aguas. *ENSAYO DE COAGULACION (JAR TEST) Reactivos y Aparatos necesarios*. [en línea]. <<https://www.yumpu.com/es/document/read/14833013/ensayo-de-coagulacion-jar-test>>. [Consulta: 13 de marzo de 2022].
7. DEARMAS, Damileth; RAMÍREZ, Luis. *Remoción de nutrientes mediante coagulantes naturales y químicos en planta de tratamiento de aguas residuales, Valledupar Colombia. Volumen 6(2)*. Colombia. Revista de Investigación Agraria y Ambiental. 2015. 183-196 p.
8. DEVORE, Jay L. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencia. En varianza, desviación estándar y análisis de varianza*. 7ª ed. California: San Luis Obispo. 2005. 396 p.
9. DÍAZ, Jakelin. *Aplicación de la enzima papaína obtenida a partir de las semillas Carica Papaya como coagulante natural para la remoción de turbidez en la PTAR-V.E.S. Villa El Salvador, El Salvador*: Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, El Salvador. 2019. 50 p.
10. FUENTES, Natalia; MOLINA, Emiro José; ARIZA, Carla. *Coagulantes naturales en sistemas de flujo continuo, como sustituto del Al₂(SO₄)₃ para clarificación de aguas*. [en línea]. <http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552016000200005&lng=en&nrm=iso>. [Consulta: 23 de marzo de 2022].

11. GARCÍA, Victor; ROLDAN, Edwin. *Ensayo de actividad de la enzima papína inmovilizada y su aplicación en aguas residuales de la industria alimenticia*. San Salvador, El Salvador: Universidad de El Salvador. 2005. 96 p.
12. GONZÁLEZ, Luis. *Evaluación a nivel laboratorio de la eficiencia de dos coagulantes para el tratamiento de aguas residuales proveniente de la producción de aceites y grasas comestibles*. Guatemala, Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. 2011. 165 p.
13. GUZMÁN, Luis; VILLABONA, Ángel; TEJADA, Candelaria; GARCÍA, Rafael. *Reducción De La Turbidez Del Agua Usando Coagulantes Naturales: Una Revisión*. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica. Cartagena, Colombia. 2013. 254 p.
14. HACH. (2000). *Manual de análisis de agua: Procedimientos Fotométricos, de titulación y microbiológicos de HACH Company*. 2da edición. Colorado, Estados Unidos. HACH Company. 2000. 220 p.
15. JIMÉNEZ, José. *Manual práctico para El Cultivo de la Papaya Hawaiana*. Guácimo, Costa Rica: Universidad EARTH. 2002. 126 p.
16. KAZI, Tasneembano; VIRUPAKSHI, Arjun. *Treatment of Tannery Wastewater Using Natural Coagulants*. Vol. 2. Karnataka, India. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering, and Technology. 2013. 4068 p.

17. KHAPARDE, Shilpa; SINGHAL, Rekkha. *Chemically modified papain for applications in detergent formulations*. Bioresource Technology. Mumbai, India: 2001. 4 p.
18. MARÍN, Rafael. *“Jar-test” en el tratamiento de aguas: una valiosa herramienta*. Córdoba, España. Tecnología Del Agua. 1998. 34 p.
19. MORALES, F.; MÉNDEZ, R.; TAMAYO, M. *TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE RASTRO MEDIANTE SEMILLAS DE Moringa oleifera LAM COMO COAGULANTE*. Tropical and Subtropical Agroecosystems. [en línea]. <<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93912996021>>. [Consulta: 11 de marzo de 2022].
20. MUNDO ZUNA, Juan Carlos; SERRANO ACOSTA, Daniel. *EXTRACCION DE LA ENZIMA PAPAINE DEL LATEX DE Carica papaya (PAPAYO) CULTIVADO EN EL PAIS Y SU APLICACIÓN EN CICATRICES TIPO QUELOIDE Y VERRUGAS*. El Salvador: Universidad de El Salvador, Salvador. 2012. 25 p.
21. NIQUETE, Patrick; MONETTE, Frédéric. *Impacts of Substituting Aluminum-Based Coagulants in Drinking Water Treatment*. Vol. 39. Canadá. Water Quality Research Journal of Canada. 2004. 310 p.
22. NUÑEZ, Thalía. *Tratamiento de aguas residuales de una Embotelladora de Bebidas Carbonatadas aplicando nanoburbujas de aire*. Lima, Perú. Universidad Cesar Vallejo. 2017. 129 p.

23. RAMALHO, R.S. *Tratamiento de Aguas Residuales. En pretratamientos y tratamientos primarios*. Reverté, S.A. Quebec, Canadá. 2003. 697 p.
24. RAMÍREZ, Alysson. *Análisis comparativo del contenido de metales residuales provenientes de las sales inorgánicas utilizadas como coagulantes en el tratamiento de aguas servidas a un reactor biológico a nivel laboratorio*. Guatemala, Guatemala. Universidad San Carlos de Guatemala, Guatemala. 2017. 92 p.
25. RODRIGUEZ, M.; LUGO, U.; ROJAS, C. *Evaluación del proceso de la coagulación para el diseño de una planta potabilizadora*. [en línea]. <<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30401102>>. [Consulta: 13 de julio de 2022].
26. ROMERO, Jairo. *Tratamiento de aguas residuales. En Características de aguas residuales*. 3ra edición. Bogotá: Colombia. Escuela Colombiana de Ingeniería. 2010. 1248 p.
27. SIGUÍ, Norman. *¿Por qué continúa la contaminación de aguas en Guatemala?* Vol. 3. Guatemala. Ciencia, Tecnología y Salud. 2016. 167-175 p.
28. TURCIO, Edwin. *Uso de semilla de moringa oleífera como coagulante orgánico en el tratamiento de agua para consumo humano*. Vol. 14. Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala. 2017. 53 p.
29. TOVAR, Yanny; ÁVILA, Rita; PIRE-SIERRA, María C; GONZÁLES-ORTÍZ, Marie T. *Purificación de la papaína del látex de la lechosa y*

cuantificación de la actividad enzimática. Vol. 2. Estado Lara, Venezuela. Revista Científica A.S.A. 2018, 59 p.

30. VARGAS, Maricruz; ROMERO, Luis. *Aprovechamiento de algunos materiales en el desarrollo de coagulantes y floculantes para el tratamiento de aguas en Costa Rica*. Vol. 19. Marcha, Costa Rica. Revista Tecnología En Marcha, Costa Rica. 2006. 41 p.
31. VÁSQUEZ, Leonardo. *Remoción de turbiedad de agua con coagulantes naturales obtenidos de semillas (Eritrina americana, Quercus ilex, Acacia farnesiana, Viscum album y Senna candolleana). Removal of water turbidity by natural coagulants obtained from seeds (Eritrina ame, 11)*. Oaxaca, México. Revista Naturaleza y Desarrollo. 2007. 41 p.
32. WALPOLE, Ronald; MYERS, Ronald; MYERS, Sharon. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. 9a ed. México. Pearson Educación. 2012. 816 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Caracterización del agua residual inicial de la industria de agua carbonatada

Muestra	No.	Sólidos suspendidos totales ($\frac{mg}{L}$)	Color (U Pt-Co)	Fósforo total ($\frac{mg}{L}$)
Agua residual	1	0,2300	1 412	0,12
	2	0,1200	897	0,14
	3	0,1400	1 244	0,16

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Apéndice 2. Datos para sólidos suspendidos totales de agua residual inicial

Muestra	No.	Peso inicial (mg)	Peso final (mg)	Sólidos suspendidos totales ($\frac{mg}{L}$)
Agua residual	1	56,4870	56,4939	0,2300
	2	56,4890	56,4926	0,1200
	3	56,4891	56,4933	0,1400

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Apéndice 3. **Datos para sólidos suspendidos totales de agua residual tratada con coagulante natural, papaína**

Muestra	Dosis de coagulante $\left(\frac{mg}{L}\right)$	Peso inicial (mg)	Peso final (mg)	Sólidos suspendidos totales $\left(\frac{mg}{L}\right)$
Agua tratada primera corrida con papaína	90	21,1818	21,1848	0,1000
	180	21,6154	21,6182	0,0933
	270	56,4871	56,4901	0,1000
	360	21,1850	21,1889	0,1300
	450	21,6180	21,6222	0,1400
Agua tratada segunda corrida con papaína	90	21,1830	21,1847	0,0567
	180	21,6163	21,6173	0,0333
	270	56,4877	56,4887	0,0333
	360	21,1830	21,1853	0,0767
	450	21,6156	21,6190	0,1133
Agua tratada tercera corrida con papaína	90	21,1824	21,1850	0,0867
	180	21,6166	21,6188	0,0733
	270	56,4875	56,4892	0,0567
	360	21,1847	21,1873	0,0867
	450	21,6155	21,6188	0,1100

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Apéndice 4. Datos para sólidos suspendidos totales y porcentaje de remoción del agua residual tratada con sulfato de aluminio

Muestra	Dosis de coagulante $\left(\frac{mg}{L}\right)$	Peso inicial (mg)	Peso final (mg)	Sólidos suspendidos totales $\left(\frac{mg}{L}\right)$
Agua tratada primera corrida con sulfato de aluminio	90	15,3651	15,3692	0,1367
	180	56,4880	56,4915	0,1167
	270	21,1844	21,1871	0,0900
	360	21,6168	21,6188	0,0667
	450	15,3644	15,3655	0,0367
Agua tratada segunda corrida con sulfato de aluminio	90	15,3630	15,3648	0,0600
	180	21,6159	21,6176	0,0567
	270	21,1829	21,1841	0,0400
	360	56,4861	56,4866	0,0167
	450	15,3636	15,3640	0,0133
Agua tratada tercera corrida con sulfato de aluminio	90	15,3644	15,3668	0,0800
	180	21,6162	21,6182	0,0667
	270	21,1824	21,1843	0,0633
	360	56,4862	56,4877	0,0500
	450	15,3640	15,3651	0,0367

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Apéndice 5. **Caracterización de agua residual tratada con coagulante natural, papaína**

Muestra	Dosis de coagulante $\left(\frac{mg}{L}\right)$	Sólidos suspendidos totales $\left(\frac{mg}{L}\right)$	Color (U Pt-Co)	Fósforo total $\left(\frac{mg}{L}\right)$
Agua tratada primera corrida con papaína	90	0,1000	1 215	0,09
	180	0,0933	1 189	0,08
	270	0,1000	1 213	0,11
	360	0,1300	1 229	0,11
	450	0,1400	1 282	0,11
Agua tratada segunda corrida con papaína	90	0,0567	726	0,11
	180	0,0333	752	0,09
	270	0,0333	775	0,11
	360	0,0767	802	0,13
	450	0,1133	818	0,10
Agua tratada tercera corrida con papaína	90	0,0867	950	0,13
	180	0,0733	988	0,11
	270	0,0567	1 051	0,12
	360	0,0867	1 112	0,13
	450	0,1100	1 188	0,13

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Apéndice 6. **Caracterización de agua residual tratada con sulfato de aluminio**

Muestra	Dosis de coagulante $\left(\frac{mg}{L}\right)$	Sólidos suspendidos totales $\left(\frac{mg}{L}\right)$	Color (U Pt-Co)	Fósforo total $\left(\frac{mg}{L}\right)$
Agua tratada primera corrida con sulfato de aluminio	90	0,2067	1 272	0,11
	180	0,1667	1 255	0,07
	270	0,1267	1 233	0,09
	360	0,1167	1 044	0,07
	450	0,0900	947	0,09
Agua tratada segunda corrida con sulfato de aluminio	90	0,0767	662	0,13
	180	0,0567	677	0,13
	270	0,0533	683	0,11
	360	0,0167	675	0,10
	450	0,0133	684	0,12
Agua tratada tercera corrida con sulfato de aluminio	90	0,0800	906	0,10
	180	0,0667	927	0,09
	270	0,0633	910	0,10
	360	0,0500	933	0,09
	450	0,0633	938	0,12

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Apéndice 7. **Porcentaje de remoción de agua residual tratada con coagulante natural, papaína**

Muestra	Dosis de coagulante $\left(\frac{mg}{L}\right)$	Sólidos suspendidos totales (%)	Color (%)	Fósforo total (%)
Agua tratada primera corrida con papaína	90	56,5217	13,9518	25,0000
	180	59,4203	15,7932	33,3333
	270	56,5217	14,0935	8,3333
	360	43,4783	12,9603	8,3333
	450	39,1304	9,2068	8,3333
Agua tratada segunda corrida con papaína	90	52,7778	19,0635	21,4286
	180	72,2222	16,1650	35,7143
	270	72,2222	13,6009	21,4286
	360	36,1111	10,5909	7,1429
	450	5,5556	8,8071	28,5714
Agua tratada tercera corrida con papaína	90	38,0952	23,6334	18,7500
	180	47,6190	20,5788	31,2500
	270	59,5238	15,5145	25,0000
	360	38,0952	10,6109	18,7500
	450	21,4286	4,5016	18,7500

Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 2, 3 y 5, empleando Microsoft Word.

Apéndice 8. **Porcentaje de remoción de agua residual tratada con sulfato de aluminio**

Muestra	Dosis de coagulante $\left(\frac{mg}{L}\right)$	Sólidos suspendidos totales (%)	Color (%)	Fósforo total (%)
Agua tratada primera corrida con sulfato de aluminio	90	10,1449	9,9150	8,3333
	180	27,5362	11,1190	41,6667
	270	44,9275	12,6771	25,0000
	360	49,2754	26,0623	41,6667
	450	60,8696	32,9320	25,0000
Agua tratada segunda corrida con sulfato de aluminio	90	36,1111	26,1984	7,1429
	180	52,7778	24,5262	7,1429
	270	55,5556	23,8573	21,4286
	360	86,1111	24,7492	28,5714
	450	88,8889	23,7458	14,2857
Agua tratada tercera corrida con sulfato de aluminio	90	42,8571	27,1704	37,5000
	180	52,3810	25,4823	43,7500
	270	54,7619	26,8489	37,5000
	360	64,2857	25,0000	43,7500
	450	54,7619	24,5981	25,0000

Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 2, 4 y 6, empleando Microsoft Word.

Apéndice 9. **Análisis estadístico**

Análisis de varianza de dos factores con varias muestras por grupo para la evaluación de la variación entre el agua residual inicial y el agua residual tratada con coagulante papaína en sólidos suspendidos totales.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	P	Valor crítico para F
Muestra (Agua residual inicial y tratada con papaína)	0,0448	1	0,0448	21,552	0,0001	4,3512
Columnas (Dosis)	0,0034	4	0,0008	0,411	0,7983	2,8660
Interacción	0,0034	4	0,0008	0,411	0,7983	2,8660
Dentro del grupo	0,0416	20	0,0020			
Total	0,0933	29				

Continuación apéndice 9.

Análisis de varianza de dos factores con varias muestras por grupo para la evaluación de la variación entre el agua residual inicial y el agua residual tratada con coagulante papaína en color.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	P	Valor crítico para F
Muestra (Agua residual inicial y tratada con papaína)	204 187,5	1	204 187,5	3,3443	0,082	4,3512
Columnas (Dosis)	17 502,66	4	4 375,66	0,0717	0,989	2,8661
Interacción	17 502,66	4	4 375,66	0,0717	0,989	2,8661
Dentro del grupo	1 221 097,33	20	61 054,86			
Total	1 460 290,16	29				

Continuación apéndice 9.

Análisis de varianza de dos factores con varias muestras por grupo para la evaluación de la variación entre el agua residual inicial y el agua residual tratada con coagulante papaína en fósforo total.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	P	Valor crítico para F
Muestra (Agua residual inicial y tratada con papaína)	0,0064	1	0,0064	21,274	0,001	4,3512
Columnas (Dosis)	0,0007	4	0,0001	0,5879	0,675	2,8660
Interacción	0,0007	4	0,0001	0,5879	0,675	2,8660
Dentro del grupo	0,0060	20	0,0003			
Total	0,0139	29				

Continuación apéndice 9.

Análisis de varianza de dos factores con varias muestras por grupo para la evaluación de la variación entre el agua residual tratada con papaína y sulfato de aluminio en sólidos suspendidos totales.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	P	Valor crítico para F
Muestra (Agua residual tratada con papaína y sulfato de aluminio)	0,0038	1	0,0038	4,5136	0,046	4,3512
Columnas (Dosis)	0,0027	4	0,0006	0,8145	0,530	2,8660
Interacción	0,0111	4	0,0027	3,2544	0,032	2,8660
Dentro del grupo	0,0170	20	0,0008			
Total	0,0348	29				

Continuación apéndice 9.

Análisis de varianza de dos factores con varias muestras por grupo para la evaluación de la variación entre el agua residual tratada con papaína y sulfato de aluminio en color.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	P	Valor crítico para F
Muestra (Agua residual tratada con papaína y sulfato de aluminio)	79 464,53	1	79 464,533	1,3736	0,254	4,3512
Columnas (Dosis)	2 024,13	4	506,033	0,0087	0,999	2,8660
Interacción	55 687,46	4	13 921,866	0,2406	0,911	2,8660
Dentro del grupo	1 156 977,33	20	57 848,866			
Total	1 294 153,47	29				

Continuación apéndice 9.

Análisis de varianza de dos factores con varias muestras por grupo para la evaluación de la variación entre el agua residual tratada con papaína y sulfato de aluminio en fósforo total.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	P	Valor crítico para F
Muestra (Agua residual tratada con papaína y sulfato de aluminio)	0,0006	1	0,0006	2,3058	0,144	4,3512
Columnas (Dosis)	0,0011	4	0,0002	0,9882	0,436	2,8660
Interacción	0,0016	4	0,0004	1,4823	0,244	2,8660
Dentro del grupo	0,0056	20	0,0002			
Total	0,0091	29				

Continuación apéndice 9.

Prueba de Tukey para determinar dosis óptima de coagulante natural, papaína en función de porcentajes de remoción de sólidos suspendidos totales.

Dosis de coagulante ($\frac{mg}{L}$)	Medias	N	E.E.				Gráfica
450	16,14	3	5,25	A			
360	37,43	3	5,25	A	B		
90	42,99	3	5,25		B	C	
180	55,82	3	5,25		B	C	
270	63,76	3	5,25			C	

Continuación apéndice 9.

Prueba de Tukey para determinar dosis optima de coagulante natural, papaína en función de porcentajes de remoción de color.

Dosis de coagulante ($\frac{mg}{L}$)	Medias	N	E.E.			Gráfica
450	7,51	3	1,64	A		<p>Remoción color (%)</p> <p>Dosis de coagulante (mg/L)</p>
360	11,39	3	1,64	A	B	
270	14,40	3	1,64	A	B	
180	17,51	3	1,64		B	
90	18,88	3	1,64		B	

Continuación apéndice 9.

Prueba de Tukey para determinar dosis óptima de coagulante natural, papaína en función de porcentajes de remoción de fósforo total.

Dosis de coagulante ($\frac{mg}{L}$)	Medias	N	E.E.			Gráfica																		
360	11,41	3	3,96	A		<table border="1"> <caption>Data for Gráfica: Remoción fósforo total (%) vs Dosis de coagulante (mg/L)</caption> <thead> <tr> <th>Dosis de coagulante (mg/L)</th> <th>Remoción fósforo total (%)</th> <th>Significación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>360.00</td> <td>11.41</td> <td>A</td> </tr> <tr> <td>270.00</td> <td>18.25</td> <td>AB</td> </tr> <tr> <td>450.00</td> <td>18.55</td> <td>AB</td> </tr> <tr> <td>90.00</td> <td>21.73</td> <td>AB</td> </tr> <tr> <td>180.00</td> <td>33.43</td> <td>B</td> </tr> </tbody> </table>	Dosis de coagulante (mg/L)	Remoción fósforo total (%)	Significación	360.00	11.41	A	270.00	18.25	AB	450.00	18.55	AB	90.00	21.73	AB	180.00	33.43	B
Dosis de coagulante (mg/L)	Remoción fósforo total (%)	Significación																						
360.00	11.41	A																						
270.00	18.25	AB																						
450.00	18.55	AB																						
90.00	21.73	AB																						
180.00	33.43	B																						
270	18,25	3	3,96	A	B																			
450	18,55	3	3,96	A	B																			
90	21,73	3	3,96	A	B																			
180	33,43	3	3,96		B																			

Fuente: elaboración propia, con base en apéndices 7 y 8, empleando Infostat y Microsoft Excel.

Apéndice 10. Obtención de papaya en CENMA



Fuente: elaboración propia, zona 12, Ciudad de Guatemala.

Apéndice 11. Secado de la cáscara de papaya



Fuente: elaboración propia, zona 12, Ciudad de Guatemala.

Apéndice 12. Cáscara de papaya triturada y tamizada



Fuente: elaboración propia, zona 12, Ciudad de Guatemala.

Apéndice 13. Recolección de agua residual



Fuente: elaboración propia, zona 11, Ciudad de Guatemala.

Apéndice 14. Prueba de jarras



Fuente: elaboración propia, zona 11, Ciudad de Guatemala.

Apéndice 15. Prueba de color y fósforo total en espectrofotómetro



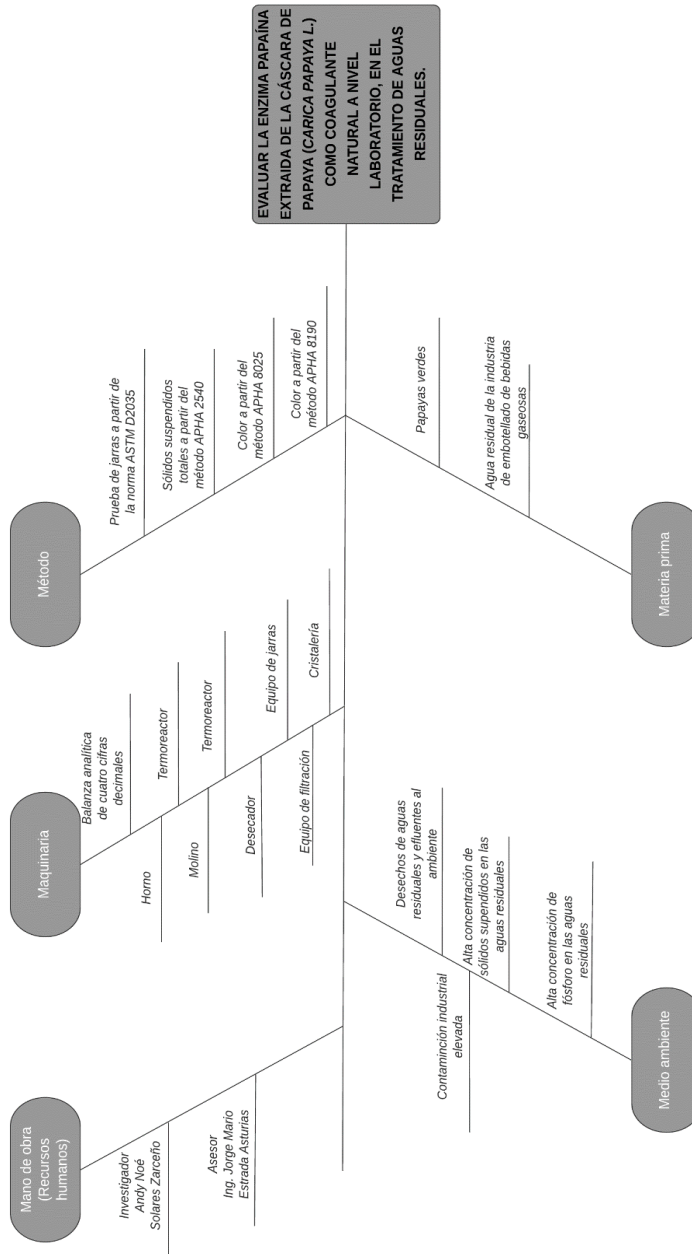
Fuente: elaboración propia, zona 11, Ciudad de Guatemala.

Apéndice 16. **Requisitos académicos**

Área	Curso	Tema
Química	Química 3	Nomenclatura de compuestos inorgánicos
	Química 4	Rendimiento Equilibrio químico
	Química orgánica 1	Nomenclatura de compuestos orgánicos
	Química orgánica 2	Polímeros
	Química ambiental	Contaminación, desechos industriales y degradación del medio ambiente
	Control de contaminantes industriales	Residuos líquidos industriales y tratamiento de aguas
Fisicoquímica	Cinética de procesos químicos	Tiempo de reacción
Operaciones Unitarias	Balance de masa y energía	Balance de masa y proporciones
	Transferencia de masa (IQ4)	Procesos de separación

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Apéndice 17. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia, empleando Lucidchart.

