



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

**COMPARACIÓN ECONÓMICA DE LA APLICACIÓN DE SEIS COAGULANTES
FABRICADOS POR REPRESENTACIONES QUÍMICAS, S.A., EN EL TRATAMIENTO
FISICOQUÍMICO DE VINAZAS TOMADAS DE UN REACTOR ANAEROBIO PARA EL
MEJORAMIENTO DE SUS CARACTERÍSTICAS PARA SU DISPOSICIÓN**

Claudia Elisa Castellanos Jurado

Asesorado por el Ing. Zenon Much Santos

Guatemala, marzo 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**COMPARACIÓN ECONÓMICA DE LA APLICACIÓN DE SEIS COAGULANTES
FABRICADOS POR REPRESENTACIONES QUÍMICAS, S.A., EN EL TRATAMIENTO
FISICOQUÍMICO DE VINAZAS TOMADAS DE UN REACTOR ANAEROBIO PARA EL
MEJORAMIENTO DE SUS CARACTERÍSTICAS PARA SU DISPOSICIÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

CLAUDIA ELISA CASTELLANOS JURADO
ASESORADO POR EL ING. ZENON MUCH SANTOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, MARZO 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

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

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Wong Davi
EXAMINADOR	Ing. Lorena Victoria Pineda Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Sergio Alejandro Recinos
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**COMPARACIÓN ECONÓMICA DE LA APLICACIÓN DE SEIS COAGULANTES
FABRICADOS POR REPRESENTACIONES QUÍMICAS, S.A., EN EL TRATAMIENTO
FISICOQUÍMICO DE VINAZAS TOMADAS DE UN REACTOR ANAEROBIO PARA EL
MEJORAMIENTO DE SUS CARACTERÍSTICAS PARA SU DISPOSICIÓN**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 14 de octubre de 2013.



Claudia Elisa Castellanos Jurado

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 8 de marzo de 2017

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
Director Escuela de Ingeniería Química
Presente

Por medio de la presente le informo que apruebo el informe final del trabajo de EPS titulado **“Comparación económica de la aplicación de seis coagulantes fabricados por Representaciones Químicas S. A., en el tratamiento fisicoquímico de vinazas tomadas de un reactor anaerobio para el mejoramiento de sus características para su disposición”**, realizado por la estudiante **Claudia Elisa Castellanos Jurado** con CUI **2499 12791 0101**, por lo que lo someto a su consideración para que continúe con los trámites requeridos en la Escuela de Ingeniería Química.

Agradeciendo la atención a la presente, le saluda respetuosamente,


Ing. Zenon Much Santos
ASESOR
ZENON MUCH SANTOS
Ing. Químico Col. No. 420
M. Sc. en Ingeniería Sanitaria

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIDAD DE EPS

Guatemala, 27 de octubre de 2016.
Ref.EPS.DOC.757.10.16.

Inga. Christa del Rosario Classon de Pinto
Directora Unidad de EPS
Facultad de Ingeniería
Usac.

Inga. Classon de Pinto:

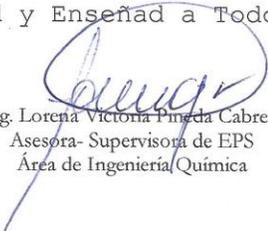
Por este medio atentamente le informo que como Asesora-Supervisora de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), de la estudiante universitaria **Claudia Elisa Castellanos Jurado** de la Carrera de Ingeniería Química, con carné No. **200312807**, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **"COMPARACIÓN ECONÓMICA DE LA APLICACIÓN DE SEIS COAGULANTES FABRICADOS POR REPRESENTACIONES QUÍMICAS, S.A., EN EL TRATAMIENTO FISICOQUÍMICO DE VINAZAS TOMADAS DE UN REACTOR ANAEROBIO PARA EL MEJORAMIENTO DE SUS CARACTERÍSTICAS PARA SU DISPOSICIÓN"**.

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Lorena Victoria Pineda Cabrera
Asesora - Supervisora de EPS
Área de Ingeniería Química



c.c. Archivo
LVPC/ra

Edificio de EPS, Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria, zona 12.
Teléfono directo: 2442-3509

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIDAD DE EPS

Guatemala, 27 de octubre de 2016.
Ref.EPS.D.473.10.16.

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ingeniero Wong Davi.

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado "COMPARACIÓN ECONÓMICA DE LA APLICACIÓN DE SEIS COAGULANTES FABRICADOS POR REPRESENTACIONES QUÍMICAS, S.A., EN EL TRATAMIENTO FISICOQUÍMICO DE VINAZAS TOMADAS DE UN REACTOR ANAEROBIO PARA EL MEJORAMIENTO DE SUS CARACTERÍSTICAS PARA SU DISPOSICIÓN" que fue desarrollado por la estudiante universitaria **Claudia Elisa Castellanos Jurado**, quien fue debidamente asesorada por el Ing. Zenon Much Santos y supervisada por la Ingeniera Lorena Victoria Pineda Cabrera.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte de la Asesor y la Supervisora de EPS, en mi calidad de Directora apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,
"Id y Enseñad a Todos"


Inga. Christa del Rosario Classon de Pinto
Directora Unidad de EPS



CdRCdP/ra



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Edificio T-5, Ciudad Universitaria, Zona 12, Guatemala, Centroamérica
EIQD-REG-SG-001

Ref.EIQ.TG.018.2019

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Ejercicio Profesional Supervisado (**EPS final**) de la **carrera de Ingeniería Química** del estudiante **CLAUDIA ELISA CASTELLANOS JURADO** titulado: **“COMPARACIÓN ECONÓMICA DE LA APLICACIÓN DE SEIS COAGULANTES FABRICADOS POR REPRESENTACIONES QUÍMICAS, S.A., EN EL TRATAMIENTO FISICOQUÍMICO DE VINAZAS TOMADAS DE UN REACTOR ANEROBIO PARA EL MEJORAMIENTO DE SUS CARACTERÍSTICAS PARA SU DISPOSICIÓN”** Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

“Id y Enseñad a Todos”

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

FACULTAD DE INGENIERIA USAC
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
DIRECTOR

Guatemala, febrero de 2019

Cc: Archivo
CSWD/ale



Formando Ingenieros Químicos en Guatemala desde 1939

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG.134.2019

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **COMPARACIÓN ECONÓMICA DE LA APLICACIÓN DE SEIS COAGULANTES FABRICADOS POR REPRESENTACIONES QUÍMICAS, S. A., EN EL TRATAMIENTO FÍSICOQUÍMICO DE VINAZAS TOMADAS DE UN REACTOR ANAEROBIO PARA EL MEJORAMIENTO DE SUS CARACTERÍSTICAS PARA SU DISPOSICIÓN**, presentado por la estudiante universitaria: **Claudia Elisa Castellanos Jurado**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polar
Decano



Guatemala, marzo de 2019

/gdech

2.3.4.	Factores que influyen en la coagulación.....	15
2.3.5.	Influencia del pH.....	15
2.3.6.	Influencia de la turbiedad.....	16
2.3.7.	Fases de la coagulación	17
2.3.7.1.	Coagulación por barrido o arrastre	19
2.3.8.	Zonas de la coagulación.....	19
2.4.	Floculación	21
2.4.1.	Objetivo de la floculación.....	21
2.4.2.	Tipos de floculación	22
2.4.2.1.	Floculación pericinetica	22
2.4.2.2.	Floculación ortocinetica	22
2.4.3.	Parámetros de la floculación	22
2.4.4.	Floculantes	23
2.5.	Rendimiento de remoción de parámetros.....	24
2.6.	Ensayo de pruebas de jarras.....	24
2.6.1.	Definición.....	24
2.6.2.	Objetivo de la prueba de jarras.....	25
2.6.3.	Preparación de los químicos a utilizar en prueba de Jarras.....	25
2.6.3.1.	Cloruro férrico al 10 %.....	25
2.6.3.2.	Solución de polímero (floculante) al 0,1 %	25
2.7.	Comparación económica.....	26
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	27
3.1.	Variables	27
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	27
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	28
3.3.1.	Transporte	28
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	29

3.4.1.	Equipo.....	29
3.4.2.	Cristalería.....	29
3.4.3.	Reactivos	29
3.4.3.1.	Coagulantes.....	30
3.4.3.2.	Floculantes.....	30
3.4.3.3.	Reguladores de pH.....	30
3.4.4.	Otros	30
3.5.	Técnica cuantitativa	31
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	32
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	32
3.8.	Análisis estadístico	37
4.	RESULTADOS	43
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	53
6.	LOGROS OBTENIDOS	57
	CONCLUSIONES	59
	RECOMENDACIONES.....	61
	BIBLIOGRAFÍA	63
	APÉNDICE	65

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Anulación de cargas en la etapa de coagulación	9
2.	Reestabilización de cargas cuando existe un exceso de coagulante.....	11
3.	Atrapamiento de las partículas	12
4.	Efecto de puente en las partículas en suspensión	13
5.	Fases de la coagulación.....	18
6.	Coagulación por adsorción.....	18
7.	Coagulación por barrido	19
8.	Zonas de la coagulación.....	20
9.	Etapa de floculación en donde se generan las aglomeraciones de los coloides desestabilizados.....	21
10.	Turbidímetro LaMotte 2020 e/i	31
11.	Colorímetro Hanna Instruments HI 93727	31
12.	Porcentajes de remoción de turbiedad y color en el agua aplicando la dosis óptima del coagulante A	46
13.	Porcentajes de remoción de turbiedad y color en el agua aplicando la dosis óptima del coagulante B	47
14.	Porcentajes de remoción de turbiedad y color en el agua aplicando la dosis óptima del coagulante C	47
15.	Porcentajes de remoción de turbiedad y color en el agua aplicando la dosis óptima del coagulante D	48
16.	Porcentajes de remoción de turbiedad y color en el agua aplicando la dosis óptima del coagulante E	48

17. Porcentajes de remoción de turbiedad y color en el agua aplicando la dosis óptima del coagulante F 49
18. Representación gráfica del costo por metro cúbico que posee el tratamiento fisicoquímico de la vinaza con cada coagulante evaluado.. 51

TABLAS

I.	Sedimentación de partículas en función de sus características físicas	6
II.	Dosis de coagulante a distintos valores de pH y alcalinidad del agua	15
III.	Variables independientes y dependientes.	27
IV.	Turbiedad final del agua medida para cada dosis y coagulante evaluados, utilizando un estándar de 0 NTU realizando tres corridas por prueba.	33
V.	Color final del agua para cada dosis y coagulante evaluados utilizando un estándar de 0 UPC realizando tres corridas por prueba	34
VI.	Eficiencia de la remoción de turbiedad en la vinaza frente a las dosis óptimas de los coagulantes evaluados utilizando un estándar de 0 NTU realizando tres corridas por prueba.....	35
VII.	Eficiencia en la remoción de color en la vinaza frente a las dosis óptimas de los coagulantes evaluados utilizando un estándar de 0 UPC realizando tres corridas por prueba.....	36
VIII.	Experimento de dos factores para el rendimiento de la remoción de turbiedad en la vinaza aplicando 6 tipos distintos de coagulante.....	38

IX.	Experimento de dos factores para el rendimiento de la remoción de color en la vinaza aplicando 6 tipos distintos de coagulante.	39
X.	Tabla de totales para el análisis de varianza I.	40
XI.	Tabla de totales para el análisis de varianza II.	41
XII.	Análisis de varianza del rendimiento de remoción de turbiedad en la vinaza aplicando 6 tipos distintos de coagulante.....	42
XIII.	Análisis de varianza del rendimiento de remoción de color en la vinaza aplicando 6 tipos distintos de coagulante.....	42
XIV.	Medición de turbiedad y color en la aplicación del coagulante A para cada corrida realizada.....	43
XV.	Medición de turbiedad y color en la aplicación del coagulante B para cada corrida realizada.	43
XVI.	Medición de turbiedad y color en la aplicación del coagulante C para cada corrida realizada.	44
XVII.	Medición de turbiedad y color en la aplicación del coagulante D para cada corrida realizada.	44
XVIII.	Medición de turbiedad y color en la aplicación del coagulante E para cada corrida realizada.	45
XIX.	Medición de turbiedad y color en la aplicación del coagulante F para cada corrida realizada.	45
XX.	Medición del color en la vinaza para las dosis óptimas de cada coagulante evaluado.....	46
XXI.	Dosis óptima de aplicación con base a un valor promedio de remoción de color igual o mayor a 95 % para coagulante evaluado.	49
XXII.	Costo del tratamiento fisicoquímico por metro cúbico de vinaza a tratar aplicando 6 coagulantes distintos.....	50

LISTADO DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
a	Año
[H⁺]	Concentración de iones hidrógeno
°C	Grado Celsius
cm²	Centímetro cuadrado
cm³	Centímetro cúbico
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
d	Día
f₁	Factor de conversión de miligramos a kilogramos
F	Factor de la prueba de hipótesis ANOVA
F_{crítico}	Factor crítico de la prueba de hipótesis ANOVA
°C	Grado Celsius
g	Gramo
g/l	Gramo por litro
g/ml	Gramo por mililitro
g/mol	Gramo por mol
h	Hora
Kg	Kilogramos
l/s	Litros por segundo
μ	Media
μm	Micrómetro
min	Minuto
mg/l	Miligramo por litro

ml	Mililitro
mm	Milímetro
%R	Porcentaje de remoción de parámetros
pH	Potencial de hidrógeno
Q	Quetzales
Q/día	Quetzales por día
s	Segundo
T_o	Turbiedad inicial (NTU)
NTU	Unidades nefelométricas de turbiedad
V_fP	Valor final del parámetro a evaluar
V_oP	Valor inicial del parámetro a evaluar

GLOSARIO

Agua residual	El agua que ha recibido uso y cuya calidad ha sido modificada.
Agua superficial	Aguas que se encuentran sobre la superficie del suelo, producidas por la escorrentía generada a partir de las precipitaciones o por el afloramiento de las aguas subterráneas.
Anaerobio	Que puede vivir y desarrollarse en ausencia completa o casi completa de oxígeno molecular libre.
Anóxico	Carente de oxígeno.
Biodegradable	Que se descompone por un proceso natural biológico.
Clarificación	Proceso en donde se lleva a cabo la remoción de las partículas que causan la turbiedad y color en el agua.
Cuerpo receptor	Embalse natural, lago, laguna, río, quebrada, manantial humedal, estuario, estero, manglar, pantano, aguas costeras y aguas subterráneas donde se descargan aguas residuales.

DBO	Demanda bioquímica de oxígeno. Medida indirecta del contenido de materia orgánica en aguas residuales, que se determina por la cantidad de oxígeno utilizado en la oxidación bioquímica de la materia orgánica biodegradable durante un período de cinco días y una temperatura de veinte grados Celsius.
Decantación	Separación por diferencia de densidades de dos productos, uno de los cuales es un líquido.
Degradación	Disminución gradual de cualidades o características.
DQO	Demanda química de oxígeno. Medida indirecta de la cantidad de materia orgánica e inorgánica oxidable en aguas residuales, que se determina por la cantidad equivalente de oxígeno utilizado en la oxidación química.
Efluente	Las aguas descargadas por un ente generador.
Enzima	Molécula formada principalmente por proteína, que producen las células vivas y que actúa como catalizador y regulador en los procesos químicos del organismo.

Fermentación	Proceso químico por el que se forman los alcoholes y ácidos orgánicos a partir de los azúcares a partir de los fermentos.
Filtración	Paso de una solución a través de un medio filtrante.
Flóculo	Grumo de la materia contaminante del agua, formado por la acción de la aglomeración de las partículas desestabilizadas por el coagulante, cuando estas entran en contacto con un floculante.
Fotómetro	Cualquier instrumento utilizado para medir la intensidad de la luz, registrando medidas indirectas de ciertos parámetros.
Hidrólisis	Es una reacción química entre una molécula de agua y otra molécula, en la cual la molécula de agua se divide y sus átomos pasan a formar parte de la otra especie química.
Levadura	Hongos microscópicos unicelulares que son importantes por su capacidad para realizar la descomposición mediante fermentación de diversos cuerpos orgánicos, principalmente los azúcares.

Lodos activados	Cultivo bacteriano disperso en forma de flóculo en un tanque agitado, aireado y alimentado por el agua residual, que es capaz de metabolizar como nutrientes los contaminantes biológicos presentes en esa agua.
Manto freático	La capa de roca subterránea, porosa y fisurada que actúa como reservorio de aguas que pueden ser utilizables por gravedad o bombeo.
Melaza	Es un producto líquido y espeso derivado de la caña de azúcar, obtenido de los residuos en las cubas de extracción de los azúcares.
Poliacrilamida catiónica	Floculante orgánico de síntesis con carga iónica positiva
Poliacrilamida aniónica	Floculante orgánico de síntesis con carga iónica negativa.
Poliamina	Poli-electrolito catiónico que se hidroliza en el agua
Polímero	Sustancia química que resulta de un proceso de polimerización.
Recalcitrante	Que permanece o reincide.
Sustrato	Cosa que está en la base u origen de algo.

Ultrafiltración

Es un tipo de filtración por membranas en la cual la presión hidrostática fuerza un líquido contra una membrana semipermeable.

RESUMEN

Se realizó la evaluación de seis distintos coagulantes a base de hierro, en una muestra puntual de agua residual proveniente de una destilería (vinazas), después de haber producido un proceso de biodegradación anaerobia. Dicha evaluación consistió en determinar el rendimiento que presentó cada uno de los coagulantes en la remoción de turbiedad y color presentes el agua, midiendo estos parámetros antes y después de cada aplicación mediante instrumentos de laboratorio denominados fotómetros, propios para este fin. La dosis óptima de cada uno de los coagulantes se determinó alcanzando un porcentaje mayor al 95 % de remoción de color. La aplicación del coagulante se realizó de forma fraccionada, dividiendo proporcionalmente la dosis referida en los antecedentes del estudio, para evitar un resultado no real de la clarificación.

Se realizó una prueba a nivel laboratorio denominada Prueba de Jarras, la cual consiste en la disposición de cuatro *beakers* o más, cada uno con su propio agitador que permite la mezcla lenta y rápida de los químicos que se aplican al agua, siendo controlada esta velocidad por un regulador eléctrico.

Para llevar a cabo de una forma correcta el proceso fisicoquímico de clarificación, también se hizo uso de un floculante catiónico de alto peso molecular y mediana densidad de carga, el cual funcionó como aglomerante de la materia desestabilizada por el coagulante.

Las sales de hierro utilizadas se definieron dentro del desarrollo del estudio de la literal A a la F, las cuales correspondieron al cloruro férrico (FeCl_3) como

el coagulante A, el sulfato férrico como B, una mezcla de B y A en proporción 95:5, como C, una mezcla de B y A en proporción 90:10, como D, una mezcla de A con una poliamina en proporción 95:5, como E, y una mezcla de A más una poliamina en proporción 90:10, como el coagulante F.

La hipótesis aceptada con base en el análisis estadístico realizado, es la hipótesis nula para la remoción de turbiedad frente al tipo de coagulante. Por otra parte las hipótesis que se rechazaron fueron las de la turbiedad respecto a la dosis de coagulante aplicado, al igual que ambas del rendimiento de remoción de color tanto para la dosis de coagulante como para el tipo de coagulante, con lo cual se concluyó que el sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)$) fue la mejor opción para el tratamiento fisicoquímico de la vinaza, debido a su menor costo por metro cúbico de vinaza a tratar, el cual fue de Q.240.,00, aún cuando la dosis fue mayor a la del Cloruro Férrico, continuándole en orden ascendente las mezclas B, C y D.

OBJETIVOS

General

Comparar económicamente el costo del tratamiento fisicoquímico de las aguas residuales de una destilería (vinazas), con la aplicación de seis distintos coagulantes en función del rendimiento de cada uno.

Específicos

1. Hallar la mejor dosis de aplicación de los diferentes coagulantes, con base en un porcentaje de remoción de color en la vinaza del 95 %.
2. Determinar el costo del tratamiento por metro cúbico de vinaza a tratar, con base a los precios de mercado de cada uno de los coagulantes a evaluar.
3. Establecer el coagulante adecuado para el tratamiento de la vinaza, en función de la eficiencia de la remoción de color en la vinaza y el menor costo de tratamiento por metro cúbico de vinaza a tratar.
4. Especificar la disposición que tendrá el agua tratada.

HIPÓTESIS

- Hipótesis de la investigación

Es posible evaluar la eficiencia (η) de la remoción de color en la vinaza para cada uno de los seis coagulantes que se aplicarán en el tratamiento fisicoquímico de dicho efluente.

- Hipótesis nula (H_0):

No existe diferencia significativa en el rendimiento de remoción de color respecto a la dosis de coagulante aplicada.

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5 = \mu_6$$

Dónde μ_i representa a la media del rendimiento de remoción de cada coagulante evaluado.

- Hipótesis nula (H'_0):

No existe diferencia significativa en el rendimiento de remoción de color respecto al tipo de coagulante aplicado.

$$\mu'_1 = \mu'_2 = \mu'_3 = \mu'_4 = \mu'_5 = \mu'_6$$

Donde μ_i representa a la media del rendimiento de remoción de cada coagulante evaluado.

INTRODUCCIÓN

La fermentación alcohólica es el proceso biológico en el cual un sustrato orgánico ($C_{12}H_{22}O_{11}$) es transformado en alcohol etílico (C_2H_6O) y dióxido de carbono (CO_2), mediante la intervención de enzimas originadas por levaduras. El alcohol producido en la etapa de fermentación contiene una gran cantidad de impurezas como, aceites y alcoholes no deseables (metanol), por lo que es sometido a varias etapas de separación por destilación. Los productos más pesados de la destilación van a formar parte de las aguas residuales y son denominados vinazas.

El estudio que se propone tratará vinazas generadas en uno de los Ingenios pertenecientes a la industria azucarera guatemalteca. Dichas vinazas han sufrido con antelación una degradación anaerobia, en donde se ha extraído la mayor cantidad de gases de descomposición producidos.

Los coagulantes que se evaluarán son fabricados localmente por la empresa Representaciones Químicas, S.A. y consisten en sales inorgánicas de naturaleza iónica, las cuales son: cloruro férrico ($FeCl_3$) y sulfato férrico ($Fe_2(SO_4)_3$). También se evaluarán mezclas de estas sales con una Poliamina, la cual añadirá características especiales a dichas sales, con el fin de potencializar su funcionalidad.

1. ANTECEDENTES

En el proceso de producción de alcohol se generan aguas residuales conocidas como vinazas, las cuales tienen un alto contenido en materia orgánica y sales inorgánicas, además de una temperatura elevada, aproximadamente de 90 °C, y valores de pH en el rango de 3,5 a 4,5, todas estas características la hacen un efluente sumamente contaminante. Por tal motivo la Coordinación de Bioprocesos Ambientales del Instituto de Ingeniería de la UNAM, realizó una investigación en donde se presentan resultados del tratamiento mediante floculación-coagulación de los efluentes que descarga un reactor anaerobio que trata vinazas de tequila, con el fin de determinar la dosis efectiva de floculantes para eliminar el color y materia orgánica.

Las pruebas se realizaron a nivel laboratorio en un equipo de Jarras, con ayuda de floculantes tales como Sulfato de Aluminio, Cloruro Férrico, entre otros, probados de forma individual y en mezclas, variando la dosis y el pH de la vinaza. Los resultados obtenidos muestran que los floculantes más adecuados son: el sulfato de aluminio, cloruro férrico, colfloc y permanganato de potasio, y en mezclas, las de sulfato de aluminio-cloruro férrico, colfloc-sulfato de aluminio y colfloc-permanganato de potasio. Sin embargo, considerando aspectos económicos, resultó más atractivo el sulfato de aluminio (2,5g/l) con eficiencias de 70 % en color y 37 % en DQO_t y la combinación Sulfato de Aluminio-Cloruro Férrico(1.5-1.0 g/l), puesto que se remueve en 82 % el color y 41 % la DQO_t ambas pruebas a pH de 6. De lo anterior, se pudo determinar que el floculante más adecuado para realizar el postratamiento de los efluentes de las vinazas tratadas por vía anaerobia es el Sulfato de Aluminio.

La escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes en Venezuela, realizó el estudio de factibilidad del tratamiento de las aguas residuales de una destilería (vinazas) utilizando los coagulantes: cloruro de polialuminio, poliacrilamida aniónica y catiónica, mezcla de ellos y una membrana de ultrafiltración. Los parámetros que se tomaron como base de análisis fueron el color y turbiedad, determinando el coagulante óptimo y su dosis.

Se encontró que las poliacrilamidas aniónicas, catiónicas y el Cloruro de polialuminio remueven la turbiedad en 0, 35 % y 70 %, respectivamente. Posteriormente se sometió la vinaza a un proceso de ultrafiltración con una membrana cerámica con diámetro de poro de 0,005 μ m con y sin el uso de coagulantes. Los resultados mostraron una reducción de color del 70 % y turbiedad del 90 %. Al usar coagulantes la remoción de la turbiedad aumento a 97 %. Se concluyó que la eficiencia de los coagulantes utilizados es baja aunque su uso en conjunto con membranas de ultrafiltración condujo a resultados más satisfactorios.

En la literatura disponible se reportan diversos estudios para el tratamiento de las vinazas. Se han evaluado tratamientos fisicoquímicos con el uso de floculantes convencionales, como el alumbre, sulfato férrico y cloruro férrico, lográndose remociones de sólidos suspendidos, DBO y DQO, hasta del 60 % y para el Policloruro de Aluminio (PAC) y sus mezclas con caolín hasta de 70 % de remoción de los parámetros mencionados.

El Centro de Química, Posgrado de Ciencias Ambientales del Instituto de Ciencias Benemérita de la Universidad Autónoma de Puebla y el Departamento de Biotecnología de la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa en México, realizaron un trabajo de investigación del tratamiento fisicoquímico de

coagulación-floculación aplicado a efluentes de vinaza de la industria del ron de caña de azúcar con previo tratamiento anaerobio. El proceso químico de coagulación-floculación fue realizado con Sulfato de Aluminio, Cloruro Férrico, entre otros, probados en forma individual y combinados, variando la dosis y el pH de la vinaza tratada biológicamente. Se determinó la dosis óptima de coagulante que reduce significativamente el color y materia orgánica natural. De acuerdo a los resultados experimentales se puede asumir que el floculante más adecuado para realizar un postratamiento de los efluentes de la vinaza tratada por vía anaerobia es el Cloruro Férrico con el cual se obtuvieron eficiencias del 99,8 % en color y turbiedad y 75,2 % en la DQO a pH 8,4.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Generalidades

La turbiedad y el color del agua son efectos causados por partículas muy pequeñas denominadas coloides. Estas partículas permanecen en suspensión en el agua por tiempo prolongado, como consecuencia de su igual carga iónica, la cual genera fuerzas de repulsión que le dan la estabilidad a dichas partículas. Estos coloides pueden atravesar un medio filtrante muy fino.

Para eliminar estas partículas se recurre a los procesos de coagulación y floculación. La coagulación consiste en desestabilizar las partículas que se encuentran suspendidas, es decir, facilita su aglomeración. En la práctica este procedimiento es caracterizado por la aplicación y mezcla rápida de productos químicos, tales como sales inorgánicas y algunos polímeros. La floculación tiene por objetivo favorecer, con la ayuda de una mezcla lenta, el contacto entre las partículas desestabilizadas, aglutinándolas para formar un floculo que pueda ser fácilmente removido por los procedimientos de sedimentación y filtración.

2.2. Partículas en suspensión

Las partículas en suspensión o coloides provienen de la erosión de suelos de la disolución de sustancias minerales y de la descomposición de sustancias orgánicas. A este aporte natural se debe adicionar las descargas de desagües domésticos, industriales y agrícolas. En general la turbiedad del agua es causada por las partículas de materias inorgánicas (arcillas), en tanto que el

color está formado por las partículas de materias orgánicas e hidróxidos de metal, por ejemplo el hierro.

2.2.1. Tamaño de las partículas

Las partículas se pueden clasificar de acuerdo a su tamaño. En la siguiente tabla se detallan valores de velocidad de sedimentación correspondientes a partículas de peso específico $2,65 \text{ Kg/dm}^3$ y a una temperatura del agua de 10°C , teniendo en cuenta distintos diámetros y el tiempo necesario para sedimentar $0,3 \text{ m}$.

Tabla I. **Sedimentación de partículas en función de sus características físicas**

Diámetro (mm)	Clasificación	Velocidad de Sedimentación (mm/s)	Tiempo para sedimentar 0,3 m
10,0	Grava	1000,00	0,3 s
1,0	Grava	100,00	3,0 s
0,1	Arena gruesa	8,00	38 s
0,01	Arena fina	0,154	33 m
0,001	Bacterias	0,00154	35 h
0,001	Coloides	0,0000154	230 d
0,0001	Coloides	0,000000154	63 años

Fuente: PÉREZ, Luis. *Teoría de la sedimentación, sedimentación de partículas en función de sus características físicas*. <http://www.fi.uba.ar>. Consulta: agosto de 2014.

Se observa que para una misma densidad, las partículas de menor tamaño tienen un tiempo de sedimentación más grande, esto no permite que la sedimentación se lleve a cabo sin la necesidad de adicionar un coadyuvante.

2.2.2. Interacción de las partículas coloidales con el agua

Las partículas coloidales son hidrofílicas, es decir, tienen afinidad por el agua. Los coloides hidrófilos se dispersan dentro del agua de forma natural, rodeándose de moléculas de agua que impiden su contacto entre estas partículas. Son generalmente material orgánico.

2.2.3. Factores de estabilidad e inestabilidad de las partículas en el agua

Las partículas coloidales están sometidas a dos grandes de fuerzas:

- Fuerzas de atracción de Van der Waals: E_a (factores de inestabilidad); son fuerzas de atracción producidas por el movimiento continuo de las partículas.
- Fuerzas de repulsión electrostáticas: E_b (colúmbicas – factor de estabilidad); son fuerzas que impiden la aglomeración de las partículas cuando éstas se acercan unas a otras; por ejemplo dos partículas de igual carga iónica no se pueden aproximar, se repelen.

El equilibrio de una suspensión coloidal depende de la fuerza resultante entre la fuerza de atracción y la de repulsión.

2.3. Coagulación

A continuación se realiza una descripción de lo que es la coagulación, mecanismos de la coagulación, entre otros.

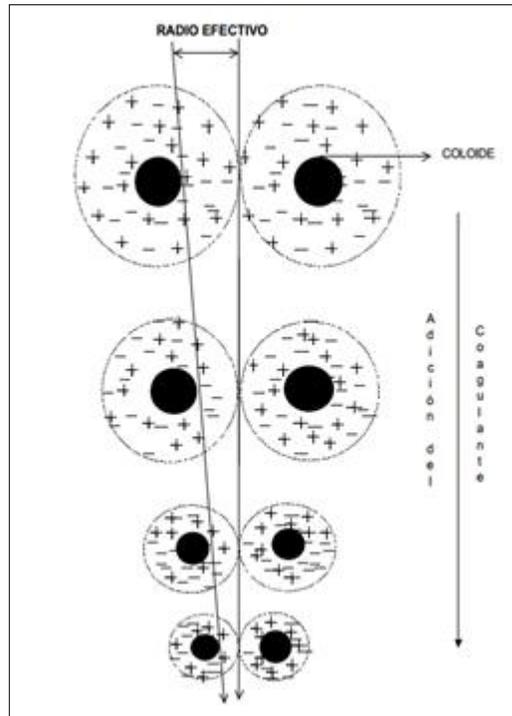
2.3.1. Qué es la coagulación

Es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se produce al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados por medio de la adición de los coagulantes químicos y la aplicación de la energía de mezclado. Su objetivo es desestabilizar las partículas coloidales que se encuentran en suspensión, para favorecer su aglomeración. La coagulación no solo elimina la turbiedad sino también la concentración de las materias orgánicas y los microorganismos, estos últimos por efectos de arrastre.

La coagulación es un proceso eficaz, sin embargo, cuando no se aplica de forma adecuada resulta ser una operación de alto costo. Se considera como el método universal de tratamiento por lograr la remoción de una gran cantidad de sustancias de diversas naturalezas, en comparación con otros métodos, otra consecuencia de una mala realización de la coagulación es una rápida degradación de calidad del agua.

En la figura 1 se muestra cómo las sustancias químicas anulan las cargas eléctricas sobre la superficie del coloide, permitiendo que las partículas coloidales se aglomeren formando partículas sedimentables.

Figura 1. **Anulación de cargas en la etapa de coagulación**



Fuente: ANDÍA, Lidia. *Tratamiento de aguas, coagulación y floculación*.
<http://www.sedapal.com.pe>. Consulta: agosto de 2014.

2.3.2. **Mecanismo de la coagulación**

La desestabilización se puede obtener por los mecanismos fisicoquímicos siguientes:

- Compresión de la doble capa.
- Adsorción y neutralización de cargas.
- Atrapamiento de partículas en un precipitado.
- Adsorción y puente.

2.3.2.1. Compresión de la doble capa

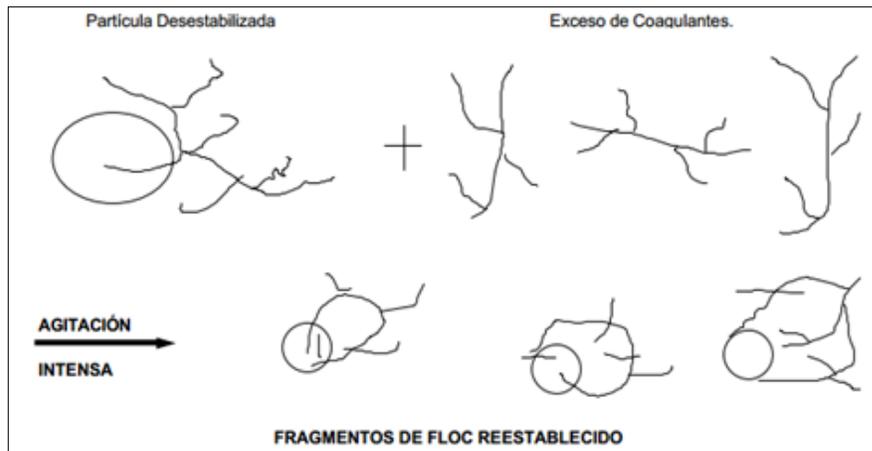
Cuando dos partículas iguales se aproximan una con la otra, se crea un efecto de repulsión, esta fuerza de rechazo está en función de la distancia que las separa y se reduce velozmente cuando incrementa la cantidad de iones de carga opuesta al de dichas partículas, lo cual se logra únicamente con los iones que aporta el coagulante, como se observa en la figura 2.

2.3.2.2. Absorción y neutralización de cargas

Las partículas coloidales generalmente poseen carga negativa en su superficie, estas cargas atraen los iones positivos (coagulante) que se encuentran en solución dentro del agua y forman la primera capa adherida al coloide.

Un efecto adverso ocurre cuando se aplica un exceso de coagulante al agua, produciéndose la reestabilización de las cargas de las partículas, esto se explica debido a que el exceso de coagulante es absorbido en la superficie de la partícula generando una carga inversa a la carga iónica original, según se observa en la figura 2.

Figura 2. **Reestabilización de cargas cuando existe un exceso de coagulante**



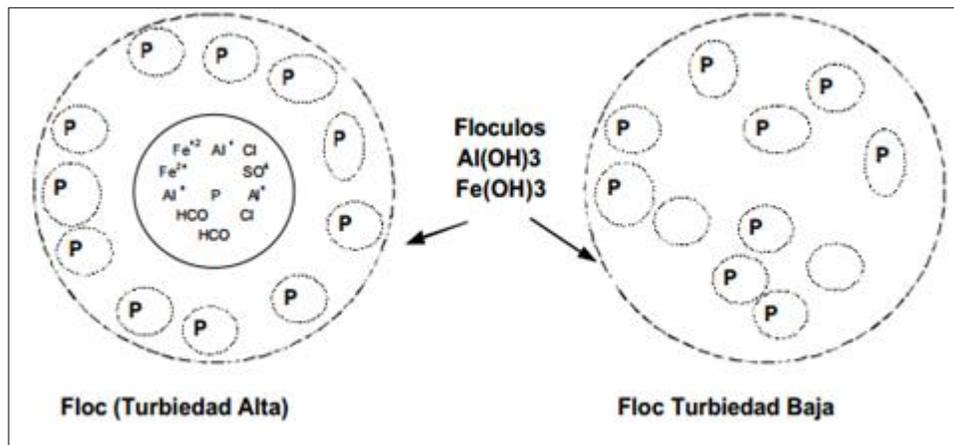
Fuente: ANDÍA, Lidia. *Tratamiento de aguas, coagulación y floculación*.
<http://www.sedapal.com.pe>. Consulta: agosto de 2014.

2.3.2.3. **Atrapamiento de partículas dentro de un precipitado**

Las partículas coloidales desestabilizadas pueden ser atrapadas dentro de un floculo, cuando se adiciona una cantidad suficiente de coagulante, comúnmente sales de inorgánicas de metales trivalentes como el sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), o cloruro férrico (FeCl_3). El floculo que se forma básicamente consiste en moléculas de hidróxido de aluminio ($\text{Al}(\text{OH})_3$) o de hidróxido de hierro ($\text{Fe}(\text{OH})_3$). Las partículas coloidales funcionan como un anillo durante la formación del floculo; este fenómeno puede tener una relación inversa entre la turbiedad y la cantidad de coagulante requerida. En otras palabras, una concentración importante de partículas en suspensión puede

requerir menor cantidad de coagulante.

Figura 3. **Atrapamiento de las partículas**



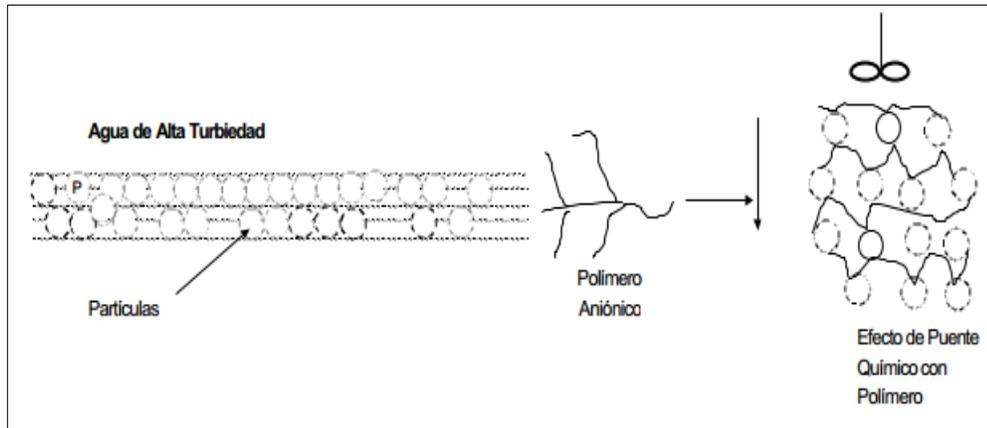
Fuente: ANDÍA, Lidia. *Tratamiento de aguas, coagulación y floculación, atrapamiento de las particular*. <http://www.sedapal.com.pe>. Consulta: agosto de 2014.

2.3.2.4. **Adsorción y puente**

Una vez llevada a cabo la desestabilización de las cargas de las partículas coloidales, frecuentemente se adiciona al agua una sustancia química denominada polímero aniónico (carga negativa), el cual al entrar en contacto con las partículas desestabilizadas las aglomera, como consecuencia de la atracción que genera hacia los iones que aportó el coagulante, y forma un puente por su naturaleza química de poseer moléculas muy largas lo que la teoría del puente.

De la misma forma que sucede con el coagulante, un exceso de polímero puede causar la reestabilización de la suspensión, revirtiendo su función.

Figura 4. Efecto de puente en las partículas en suspensión



Fuente: ANDÍA, Lidia. *Tratamiento de aguas, coagulación y floculación, efecto de puente en las partículas en suspensión*. <http://www.sedapal.com.pe>. Consulta: agosto de 2014.

2.3.3. Coagulantes

Los coagulantes son sustancias químicas, en su mayoría sales inorgánicas, que al aplicarse al agua producen una reacción química con los componentes químicos del agua, especialmente con la alcalinidad del agua para formar un sólido casi imperceptible, constituido generalmente por el hidróxido metálico del coagulante que se está utilizando.

Los coagulantes habitualmente utilizados para producir la desestabilización de la materia contaminante del agua, son:

- Sulfato de Aluminio, $Al_2(SO_4)_3$
- Aluminato de Sodio, $NaAlO_2$
- Cloruro de Aluminio, $AlCl_3$
- Cloruro Férrico, $FeCl_3$

- Sulfato Férrico, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$
- Sulfato Ferroso, $\text{Fe}(\text{SO}_4)$
- Polielectrolitos (como coadyuvantes de floculación)

La cantidad del coagulante a utilizar tiene influencia directa en la eficiencia de la coagulación de la siguiente forma:

- Cuando no se adiciona o aplica la suficiente cantidad de coagulante, éste no neutraliza de manera total la carga de la partícula y la formación de los micro-flóculos es mínima, y como resultado se obtiene una alta turbiedad residual.
- Por el contrario si se aplica una alta dosis de coagulante, se produce la inversión de la carga de la partícula, dejando sin efecto la desestabilización de la misma, por lo que también se obtiene una alta turbiedad residual.
- La selección del coagulante y la cantidad óptima de aplicación se determina mediante los ensayos de rueba de Jarras.

La selección del coagulante y la dosis juegan un rol muy importante sobre:

- La buena o mala calidad del agua clarificada.
- El buen o mal funcionamiento de los decantadores.

En la tabla II se observa que para una turbiedad inicial de $T_0 = 20$ NTU, los valores de dosis de coagulantes son diferentes para los diferentes valores de pH y alcalinidad.

Tabla II. **Dosis de coagulante a distintos valores de pH y alcalinidad del agua**

Unidades pH	Alcalinidad	Dosis óptima FeCl₃	Dosis óptima Al₂(SO₄)₃
7,46	91 mg/l CaCO ₃	14 mg/l	26 mg/l
7,29	85 mg/l CaCO ₃	16 mg/l	30 mg/l

Fuente: ANDÍA, Lidia. *Tratamiento de aguas, coagulación y floculación, dosis de coagulante a distintos valores de pH y alcalinidad del agua*. <http://www.sedapal.com.pe>. Consulta: agosto de 2014.

2.3.4. Factores que Influyen en la coagulación

El proceso de coagulación es sensible al tipo de coagulante que se aplique, con la finalidad de que el proceso sea óptimo.

Los parámetros de pH, turbiedad, color y su interrelación, permitirán predecir cuál es la cantidad de coagulante que se debe adicionar al agua.

2.3.5. Influencia del pH

El pH es una medida de la acidez de una solución y se define como el logaritmo negativo de la concentración del ion hidrógeno

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$$

El pH es la variable más importante a tener en cuenta al momento de la coagulación, para cada agua existe un rango de pH óptimo para la cual la coagulación tiene lugar rápidamente, ello depende de la naturaleza de los iones y de la alcalinidad del agua.

El rango de pH es función del tipo de coagulante a ser utilizado y de la naturaleza del agua a tratar; si la coagulación se realiza fuera del rango de pH óptimo entonces se debe aumentar la cantidad del coagulante; por lo tanto la dosis requerida es alta.

Para sales de aluminio el rango de pH para la coagulación, es de 6,5 a 8,0 y para las sales de hierro, el rango de pH óptimo es de 5.5 a 8.5 unidades, con algunas excepciones como lo es el Sulfato Férrico, el cual posee un rango más amplio, de 4,5 a 8

2.3.6. Influencia de la turbiedad

La turbiedad es una forma indirecta de medir la concentración de las partículas suspendidas en un líquido. Un haz de luz se hace pasar a través de un volumen específico de la muestra del agua que se desea analizar, en un punto de origen y en otro punto se mide la cantidad de luz que logró atravesar dicho volumen. Este paso de luz está en función del número, tamaño y forma de las partículas presentes.

- Para cada turbiedad existe una cantidad de coagulante con el que se obtiene la turbiedad residual más baja, que corresponde a la dosis óptima.
- Cuando la turbiedad aumenta, la cantidad de coagulante a adicionar no debe ser mucha debido a que la probabilidad de que las partículas colisionen entre sí es muy alta; por lo a altos valores de turbiedad la coagulación se realiza con facilidad; por el contrario cuando la turbiedad es baja la coagulación se realiza con mayor dificultad, y la cantidad del coagulante es igual o mayor que si la turbiedad fuese alta.

- Cuando la turbiedad es muy alta, conviene realizar una pre-sedimentación natural, por medio de sistemas que generen un flujo laminar que permitan que las partículas descendan a lo largo del recorrido del flujo, por efecto de la gravedad.
- Siempre es más fácil coagular las aguas de alta turbiedad y aquellas contaminadas por desagües domésticos industriales, porque requieren mayor cantidad de coagulante que los no contaminados.

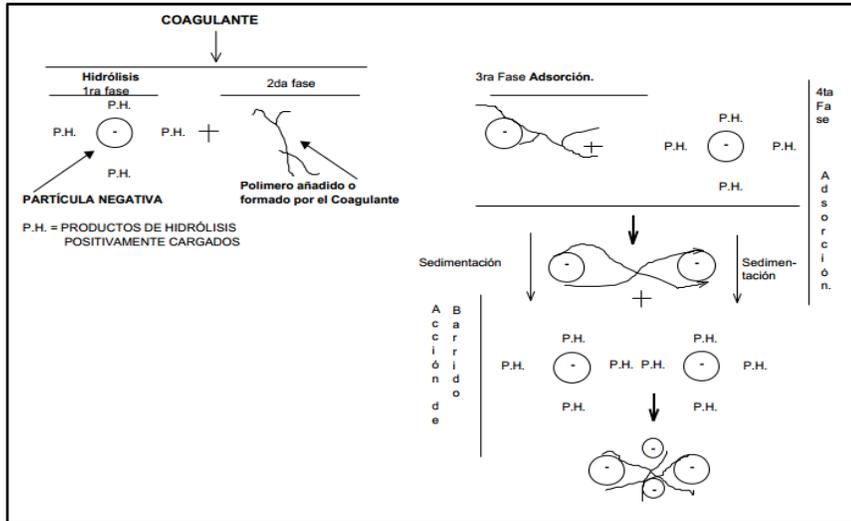
Los mecanismos que permiten la eliminación del color no son los mismos que los utilizados para la turbiedad.

2.3.7. Fases de la coagulación

El proceso de coagulación se lleva a cabo en un tiempo muy corto (casi instantáneo), en el que se presenta las siguientes etapas:

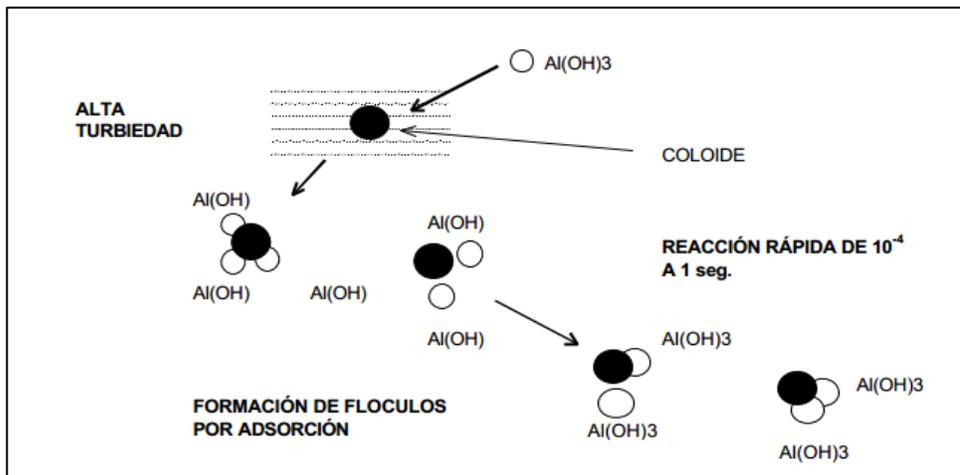
- Hidrólisis de los coagulantes y desestabilización de las partículas en suspensión.
- Adsorción de cadenas poliméricas por los coloides.
- Adsorción mutua de coloides.
- Acción de barrido.

Figura 5. Fases de la coagulación



Fuente: ANDÍA, Lidia. *Tratamiento de aguas, coagulación y floculación, fases de coagulación.* <http://www.sedapal.com.pe>. Consulta: agosto de 2014.

Figura 6. Coagulación por adsorción

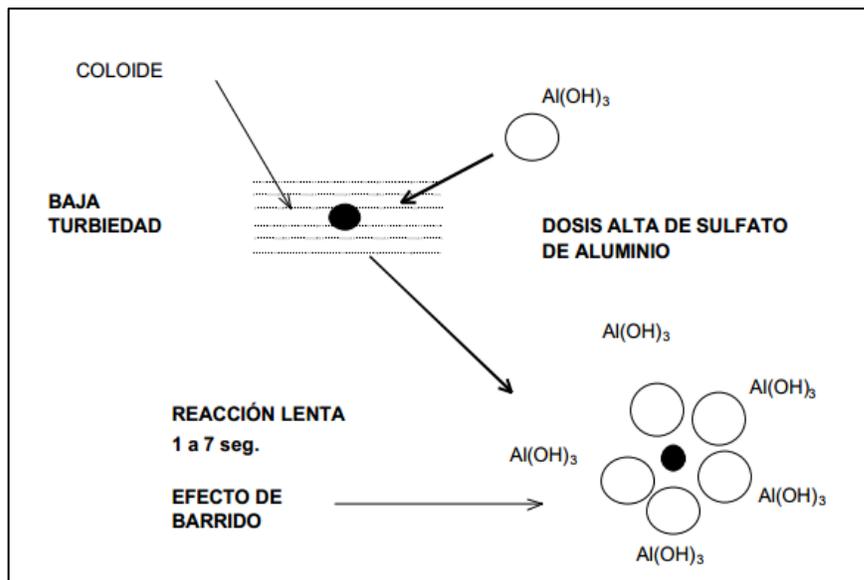


Fuente: ANDÍA, Lidia. *Tratamiento de aguas, coagulación y floculación, coagulación por adsorción.* <http://www.sedapal.com.pe>. Consulta: agosto de 2014.

2.3.7.1. Coagulación por barrido o arrastre

Este tipo de coagulación se presenta cuando el agua es clara (presenta baja turbiedad) y la cantidad de partículas coloides es pequeña; en este caso las partículas son entrampadas al producirse una sobresaturación de precipitado del coagulante.

Figura 7. Coagulación por barrido



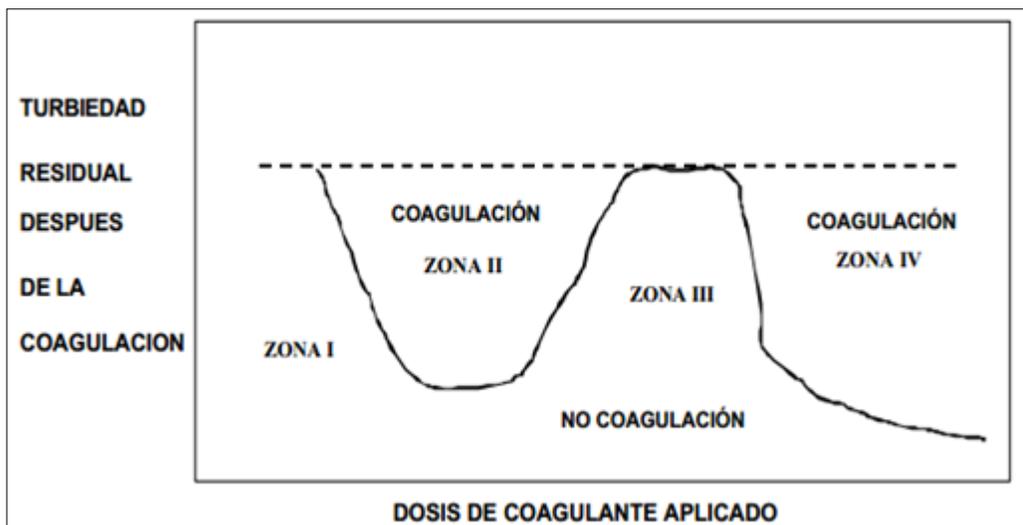
Fuente: ANDÍA, Lidia. *Tratamiento de aguas, coagulación y floculación, coagulación por barrido*.
<http://www.sedapal.com.pe>. Consulta: agosto de 2014.

2.3.8. Zonas de la coagulación

La aplicación de una dosis creciente del coagulante al agua presenta diferentes zonas de coagulación, como se puede observar en la figura 8.

- Zona 1: la dosis de coagulante no es suficiente para desestabilizar las partículas y por lo tanto se produce una deficiente coagulación.
- Zona 2: al incrementar la dosis de coagulante, se produce una rápida aglutinación de los coloides.
- Zona 3: si se continúa incrementando la dosis, se produce la reestabilización de los coloides.
- Zona 4: al aumentar aún más la dosis, hasta producir una saturación del coagulante, se produce de nuevo una rápida precipitación de los coagulantes que hace un efecto de barrido, arrastrando en su descenso las partículas que causan la turbiedad.

Figura 8. **Zonas de la coagulación**



Fuente: ANDÍA, Lidia. *Tratamiento de aguas, coagulación y floculación, zonas de coagulación.*

<http://www.sedapal.com.pe>. Consulta: agosto de 2014.

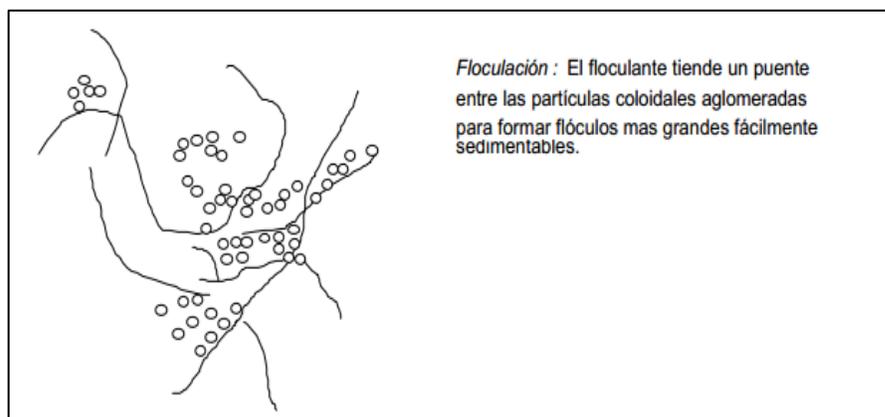
2.4. Floculación

A continuación se describe la floculación, objetivos de la floculación, entre otros.

2.4.1. Objetivo de la floculación

En la segunda etapa del proceso fisicoquímico se da una mezcla lenta, que tiene por objetivo aglomerar los coloides desestabilizados en la coagulación, formando floculos de un mayor tamaño sensibles al efecto de la gravedad, por lo que estos tienden a sedimentar rápidamente. La velocidad de mezcla debe ser controlada, ya que si la velocidad se eleva más de lo que el floculo puede soportar, éste se romperá perdiendo efectividad en el proceso de separación. Generalmente estas velocidades oscilan entre las 20 rpm y 40 rpm.

Figura 9. **Etapa de floculación en donde se generan las aglomeraciones de los coloides desestabilizados**



Fuente: ANDÍA, Lidia. *Tratamiento de aguas, coagulación y floculación, etapa de floculación en donde se general las aglomeraciones de los coloides desestabilizados.*

<http://www.sedapal.com.pe>. Consulta: agosto de 2014.

La floculación no solo incrementa el tamaño de las partículas formando el floculo, sino que también aumenta su peso.

2.4.2. Tipos de floculación

Hay 2 tipos de floculación:

2.4.2.1. Floculación pericinética

Es producida por el movimiento natural de las moléculas del agua y está inducida por la energía térmica, este movimiento es conocido como el movimiento browniano.

2.4.2.2. Floculación ortocinética

Se basa en las colisiones de las partículas debido al movimiento del agua, el que es inducido por una energía exterior a la masa de agua y que puede ser de origen pericinética, luego se produce la floculación ortocinética.

2.4.3. Parámetros de la floculación

Los parámetros que caracterizan la floculación, son los siguientes:

- Floculación ortocinética (se da por el grado de agitación proporcionada: mecánica o hidráulica).
- Gradiente de velocidad (energía necesaria para producir la mezcla).
- Número de colisiones (choque entre micro-floculos).
- Tiempo de retención (tiempo que permanece el agua en la unidad de floculación), también llamado tiempo de residencia.

- Densidad y tamaño de floculo.
- Volumen de lodos (los floculos formados no deben sedimentar en las unidades de floculación).

2.4.4. Floculantes

Los floculantes son polímeros o polielectrolitos con pesos moleculares, en su mayoría, muy altos, formados por moléculas orgánicas solubles en agua que consisten por bloques denominados monómeros.

Estos floculantes pueden ser de naturaleza mineral, orgánica natural y orgánica de síntesis.

- Floculantes minerales: entre ellos se encuentra la sílice activada. Su preparación es tan delicada y presenta el riesgo de la gelatinización; produce la neutralización parcial de la alcalinidad de silicato de sodio en solución.
- Floculantes orgánicos naturales: son polímeros naturales extraídos de sustancias animales o vegetales.
- Floculantes orgánicos de síntesis: son los más utilizados y son macromoléculas de cadena larga, obtenidos por asociación de monómeros sintéticos con masa molecular elevada, estos se clasifican de acuerdo a la carga iónica que poseen, de la siguiente forma:
 - Aniónicos (generalmente copolímeros de la acrilamida y del ácido acrílico de sodio).
 - Neutros o no iónicos (poliacrilamidas).

- Catiónicos (copolímero de acrilamidas + un monómero catiónico).

2.5. Rendimiento de remoción de parámetros

El rendimiento de remoción o disminución de parámetros que se miden en el agua, generalmente se registra como un porcentaje, calculándose de la siguiente manera:

$$\% R = (V_oP - V_fP) / V_oP * 100$$

Donde:

% R = porcentaje de remoción para cada parámetro

V_oP = valor inicial de parámetro (antes del tratamiento fisicoquímico)

V_fP = valor final de parámetro (después del tratamiento fisicoquímico)

2.6. Ensayo de pruebas de jarras

Las pruebas más representativas para determinar el comportamiento y rendimiento de los coagulantes y floculantes a escala pequeña, es el ensayo de prueba de Jarras.

2.6.1. Definición

Es un método de simulación de los procesos de coagulación y floculación realizados a nivel de laboratorio que permite obtener agua clarificada, fácilmente separable de los lodos que se producen, por decantación.

2.6.2. Objetivo de la prueba de Jarras

Determinar las variables físicas y químicas de los procesos de coagulación, floculación y sedimentación, tales como: selección del coagulante, selección del pH óptimo, gradientes y tiempos de mezcla rápida y lenta y correlación de las velocidades de sedimentación y la eficiencia de remoción.

2.6.3. Preparación de los químicos a utilizar en prueba de Jarras

El método que se describe a continuación es el que se utiliza durante las Pruebas de Jarras

2.6.3.1. Cloruro férrico al 10 %

Se obtiene a partir una solución de cloruro férrico concentrado (comúnmente al 40 %) el cual se deposita en los tanques de almacenamiento de las plantas de tratamiento. Para la preparación se tendrá en cuenta la densidad del cloruro férrico, la cual es en promedio 1,40 g/ml.

Se toman 10 g de la muestra de cloruro férrico y se coloca en un *beacker* de 100 ml, luego se añaden 90 g de agua desmineralizada. Esta solución tendrá un máximo de 5 días de anaquel, a los cuales se desecha y se prepara otra con el mismo procedimiento.

2.6.3.2. Solución de polímero (floculante) al 0,1 %

Se pesa en la balanza analítica 1g de la muestra de polímero (extraída del punto de almacenamiento) y se coloca en un vaso de precipitados, se

procede a disolver con agua utilizando un equipo de agitación magnética (en caso de no contar con este equipo se puede realizar manualmente) hasta que la solución se encuentre homogénea, la cantidad de agua a aplicar corresponde a 999 g. Esta solución es la que se utiliza en los ensayos y tiene un tiempo de duración no mayor de 1 semana.

2.7. Comparación económica

Teniendo en cuenta los análisis de los resultados que se obtienen en la prueba de Jarras, se determinan las dosis óptimas de cada uno de los coagulantes, las cuales corresponde a las dosis con las que se alcanza o supera el porcentaje de remoción de color deseado.

Para tener un costo de tratamiento por metro cúbico de agua a tratar (m^3) se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{Costo (Q. /m}^3\text{)} = \text{Dosis óptima (g/m}^3\text{)} * \text{Costo coagulante (Q. /Kg)} * f_1$$

Donde:

$$f_1 = \frac{1Kg}{1 \times 10^3 g}$$

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Las variables tanto dependientes como independientes se definen en la tabla III.

Tabla III. Variables independientes y dependientes

PARÁMETRO	INDEPENDIENTE	DEPENDIENTE	DIMENSIONAL
Dosis de coagulante	X		mg/l
Remoción de turbiedad en el agua		X	%
Remoción de color en el agua		X	%

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

La evaluación económica de los 6 coagulantes se realizará con vinazas que han sido tratadas con antelación en un reactor biológico anaerobio, en el

cual se ha extraído el gas metano que se produce de la descomposición que sufre la materia orgánica bajo condiciones anóxicas. Se tomará una sola muestra puntual, la cual será almacenada a condiciones normales de temperatura y presión, no será preservada.

También se debe considerar el alcance del proyecto, y se debe ser cuidadoso y tener en cuenta que posiblemente se requiera la autorización de algún recurso que no se ha considerado, como el que el Ingenio Azucarero acceda proporcionar otra muestra de vinaza, cuando ésta se requiera.

El proyecto es una investigación a nivel de ensayos de laboratorio, que permitirá determinar la dosis óptima de cada uno de los coagulantes que se evaluarán para alcanzar los objetivos definidos, generando así, la información de los consumos mensuales de cada producto y calculando los gastos económicos que el tratamiento demandará con base en el caudal que se desea atender.

Este estudio no abarca el diseño de equipo para la dosificación de los productos a nivel Industrial.

3.3. Recursos humanos disponibles

Los recursos humanos disponibles para este proyectos serán los siguientes:

3.3.1. Transporte

- Piloto/colaborador para la toma de muestras

3.4. Recursos materiales disponibles

Asimismo, los recursos de materiales disponibles se describen a continuación:

3.4.1. Equipo

- Una prueba de Jarras de cuatro plazas, marca Velp Modelo FP4
- Un medidor de turbiedad o Fotómetro, marca LaMotte Modelo 2020e/i
- Un medidor de color o Fotómetro, marca Hanna Instruments Modelo HI 93727
- Un agitador magnético, marca Jintan Precies Machinery
- Una balanza analítica, marca Radwag Modelo 200 WTB
- Medidor de pH electrónico, marca Hanna Instruments HI98108

3.4.2. Cristalería

- Pipetas serológicas de 1 ml, 2 ml, 5 ml y 10 ml
- Beackers de 25 ml, 50 ml, 250 ml y 1000 ml
- Vidrios de reloj
- Varillas de agitación
- Earlenmeyers
- Lápices de succión

3.4.3. Reactivos

Entre los reactivos se encuentran los siguientes:

3.4.3.1. Coagulantes

- Solución concentrada de Cloruro Férrico al 38 %
- Solución concentrada de Sulfato Férrico al 38 %
- Solución de dos coagulantes orgánicos

Según la revisión bibliográfica realizada con relación a tratamientos fisicoquímicos, llevados a cabo en vinazas pre-tratadas biológicamente en un reactor anaerobio, se determinó utilizar dosis y concentraciones altas, tanto de coagulante como de coadyuvante (floculante) ya que para dosis bajas (inferiores a 30 000 mg/l) no se presentan resultados apreciables de remoción. Lo anterior fue corroborado por ensayos preliminares desarrollados por la empresa.

3.4.3.2. Floculantes

- 100 g de Poliacrilamida catiónica, de alta densidad de carga y alto peso molecular

3.4.3.3. Reguladores de pH

- Ácido Sulfúrico concentrado
- Ácido Clorhídrico concentrado
- Hidróxido de calcio
- Solución de Hidróxido de Sodio al 50 %

3.4.4. Otros

Potenciómetro

3.5. Técnica cuantitativa

- Medidores electrónicos (fotómetros) para la cuantificación de los parámetros de turbiedad y color residual en el agua tratada.

Figura 10. **Turbidímetro LaMotte2020 e/i**



Fuente: Laboratorio Representaciones Químicas, S.A.

Figura 11. **Colorímetro Hanna Instruments HI 93727**



Fuente: Laboratorio Representaciones Químicas, S.A.

- La evaluación económica se realizó por medio de cálculos matemáticos, con base en la demanda de coagulante (dosis óptima) y su precio, este último fijado por Representaciones Químicas, S.A.

$$\text{Costo (Q. /m}^3\text{)} = \text{Dosis óptima (g/m}^3\text{)} * \text{Costo coagulante (Q. /Kg)} * f_1$$

Donde:

$$f_1 = \frac{1\text{Kg}}{1 \times 10^3 \text{g}}$$

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

La recolección y ordenamiento de datos se detalla en las tablas IV y V.

3.7. Tabulación, ordenamiento Y procesamiento de la información

En la tabla VI se observa la eficiencia de la remoción de turbiedad en la vinaza frente a las dosis óptimas de los coagulantes evaluados, utilizando un estándar de 0 NTU realizando tres corridas por prueba.

Ver tablas VI y VII.

Tabla IV. **Turbiedad final del agua medida para cada dosis y coagulante evaluados, utilizando un estándar de 0 NTU, realizando tres corridas por prueba**

Dosis (mg/l)	Turbiedad (NTU)					
	A	B	C	D	E	F
10 000	370	308	264	160	160	170
	112	66	86	106	52	68
	166	170	136	122	198	254
20 000	192	490	676	684	460	342
	66	132	152	410	972	130
	394	334	338	354	388	456
30 000	128	368	466	816	786	272
	494	634	662	804	972	0
	980	986	786	1064	596	1 260
32 000	162	276	350	640	599	276
	50	477	496	603	363	0
	163	976	749	999	524,5	1 020
38 000	0	2,07	2,44	110,4	40	288
	0	5,78	1,11	0	63,1	0
	0	948	638	804	310	300
46 000	0	0,41	0	42,4	5,14	17,9
	0	1,16	7,86	0	34	0
	0	223	17,8	72,5	10,3	36,9
48 000	0	0	0	6,3	7,89	2,35
	0	0	0	0	4,15	0
	0	41,8	5,41	8,2	6,96	1,26

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Color final del agua para cada dosis y coagulante evaluados utilizando un estándar de 0 UPC realizando tres corridas por prueba**

Dosis (mg/l)	COLOR (UPC)					
	A	B	C	D	E	F
10 000	96 000	108 000	112 000	100 000	100 000	104 000
	132 000	124 000	132 000	132 000	132 000	132 000
	120 000	116 000	120 000	116 000	112 000	104 000
20 000	64 000	88 000	88 000	80 000	76 000	76 000
	92 000	88 000	108 000	104 000	88 000	80 000
	96 000	104 000	96 000	104 000	76 000	76 000
30 000	3 500	88 000	76 000	76 000	52 000	28 000
	5 500	48 000	32 000	48 000	6 000	1 600
	40 000	62 000	52 000	72 000	11 500	18 000
32 000	2 000	81 000	68 500	68 500	40 000	22 500
	2 000	37 000	25 500	36 600	5 100	0
	4 000	54 000	44 500	64 500	9 700	14 600
38 000	0	60 000	46 000	8 000	4 000	6 000
	0	5 500	6 000	2 600	2 500	0
	0	30 000	22 000	42 000	4 400	4 600
46 000	0	94 000	2 400	2 000	2 000	1 700
	0	4 000	5 200	0	1 800	0
	0	9 000	2 800	2 800	3 800	4 000
48 000	0	2 200	600	2 000	1 600	1 200
	0	3 800	2 400	2 000	1 200	0
	0	4 400	2 000	2 000	2 000	2 400

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Eficiencia de la remoción de turbiedad en la vinaza frente a las dosis óptimas de los coagulantes evaluados, utilizando un estándar de 0 NTU realizando tres corridas por prueba**

Dosis (mg/l)	Porcentaje de remoción de turbiedad (%)					
	A	B	C	D	E	F
10 000	67,1	72,6	76,6	85,8	85,8	84,9
	90,1	94,1	92,4	90,6	95,4	94,0
	85,3	84,9	87,9	89,2	82,4	77,4
20 000	82,9	56,5	40,0	39,3	59,1	69,6
	94,1	88,3	86,5	63,6	13,7	88,5
	65,0	70,3	70,0	68,6	65,5	59,5
30 000	88,6	67,3	58,6	27,5	30,2	75,8
	56,1	43,7	41,2	28,6	13,7	100,0
	13,0	12,4	30,2	5,5	47,1	-11,9
32 000	85,6	75,5	68,9	43,2	46,8	75,5
	95,6	57,6	56,0	46,4	67,8	100,0
	85,5	13,3	33,5	11,3	53,4	9,4
38 000	100,0	99,8	99,8	90,2	96,4	74,4
	100,0	99,5	99,9	100,0	94,4	100,0
	100,0	15,8	43,3	28,6	72,5	73,4
46 000	100,0	100,0	100,0	96,2	99,5	98,4
	100,0	99,9	99,3	100,0	97,0	100,0
	100,0	80,2	98,4	93,6	99,1	96,7
48 000	100,0	100,0	100,0	99,4	99,3	99,8
	100,0	100,0	100,0	100,0	99,6	100,0
	100,0	96,3	99,5	99,3	99,4	99,9

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Eficiencia en la remoción de color en la vinaza frente a las dosis óptimas de los coagulantes evaluados utilizando un estándar de 0 UPC realizando tres corridas por prueba**

Dosis (mg/l)	Porcentaje de remoción de color (%)					
	A	B	C	D	E	F
10 000	17,2	6,9	3,4	13,8	13,8	10,3
	-13,8	-6,9	-13,8	-13,8	-13,8	-13,8
	-3,4	0,0	-3,4	0,0	3,4	10,3
20000	44,8	24,1	24,1	31,0	34,5	34,5
	20,7	24,1	6,9	10,3	24,1	31,0
	17,2	10,3	17,2	10,3	34,5	34,5
30000	97,0	24,1	34,5	34,5	55,2	75,9
	95,3	58,6	72,4	58,6	94,8	98,6
	65,5	46,6	55,2	37,9	90,1	84,5
32000	98,3	30,2	40,9	40,9	65,5	80,6
	98,3	68,1	78,0	68,4	95,6	100,0
	96,6	53,4	61,6	44,4	91,6	87,4
38000	100,0	48,3	60,3	93,1	96,6	94,8
	100,0	95,3	94,8	97,8	97,8	100,0
	100,0	74,1	81,0	63,8	96,2	96,0
46000	100,0	19,0	97,9	98,3	98,3	98,5
	100,0	96,6	95,5	100,0	98,4	100,0
	100,0	92,2	97,6	97,6	96,7	96,6
48000	100,0	98,1	99,5	98,3	98,6	99,0
	100,0	96,7	97,9	98,3	99,0	100,0
	100,0	96,2	98,3	98,3	98,3	97,9

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

En el análisis que se llevó a cabo, se determinó el efecto que tienen dos factores respecto a una variable respuesta; es por ello que el experimento es factorial de dos factores (ANOVA Bifactorial), en donde se determinó si existe una interacción significativa entre los factores dosis de coagulante y tipo de coagulante, respecto al porcentaje de remoción de color y turbiedad obtenidos para cada coagulante aplicado.

Tabla VIII. Experimento de dos factores para el rendimiento de la remoción de turbiedad en la vinaza aplicando 6 distintos coagulantes

Factor (A) Dosis, mg/l	Factor (B) Porcentaje de remoción de turbiedad (%)						Total	Media
	A	B	C	D	E	F		
10 000	67,1	72,6	76,6	85,8	85,8	84,9	1536,4	85,4
	90,1	94,1	92,4	90,6	95,4	94,0		
	85,3	84,9	87,9	89,2	82,4	77,4		
20 000	82,9	56,5	40,0	39,3	59,1	69,6	1181,0	65,6
	94,1	88,3	86,5	63,6	13,7	88,5		
	65,0	70,3	70,0	68,6	65,5	59,5		
30 000	88,6	67,3	58,6	27,5	30,2	75,8	727,7	40,4
	56,1	43,7	41,2	28,6	13,7	100,0		
	13,0	12,4	30,2	5,5	47,1	-11,9		
32 000	85,6	75,5	68,9	43,2	46,8	75,5	1025,30	57,0
	95,6	57,6	56,0	46,4	67,8	100,0		
	85,5	13,3	33,5	11,3	53,4	9,4		
38 000	100,0	99,8	99,8	90,2	96,4	74,4	1488,0	82,7
	100,0	99,5	99,9	100,0	94,4	100,0		
	100,0	15,8	43,3	28,6	72,5	73,4		
46 000	100,0	100,0	100,0	96,2	99,5	98,4	1758,3	97,7
	100,0	99,9	99,3	100,0	97,0	100,0		
	100,0	80,2	98,4	93,6	99,1	96,7		
48 000	100,0	100,0	100,0	99,4	99,3	99,8	1792,5	99,6
	100,0	100,0	100,0	100,0	99,6	100,0		
	100,0	96,3	99,5	99,3	99,4	99,9		
Total	1809,0	1528,1	1581,9	1406,8	1518,1	1665,3	9509,2	
Media	86,1	72,7	75,3	67,0	72,3	79,3		528,4

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. Experimento de dos factores para el rendimiento de la remoción de color en la vinaza aplicando 6 distintos coagulantes

Factor (A) Dosis, mg/l	Factor (B) porcentaje de remoción de color (%)						Total	Media
	A	B	C	D	E	F		
10 000	17,2	6,9	3,4	13,8	13,8	10,3	-3,5	-0,19157
	-13,8	-6,9	-13,8	-13,8	-13,8	-13,8		
	-3,4	0,0	-3,4	0,0	3,4	10,3		
20 000	44,8	24,1	24,1	31,0	34,5	34,5	434,5	24,138
	20,7	24,1	6,9	10,3	24,1	31,0		
	17,2	10,3	17,2	10,3	34,5	34,5		
30 000	97,0	24,1	34,5	34,5	55,2	75,9	1179,2	65,512
	95,3	58,6	72,4	58,6	94,8	98,6		
	65,5	46,6	55,2	37,9	90,1	84,5		
32 000	98,3	30,2	40,9	40,9	65,5	80,6	1300,0	72,222
	98,3	68,1	78,0	68,4	95,6	100,0		
	96,6	53,4	61,6	44,4	91,6	87,4		
38 000	10,0	48,3	60,3	93,1	96,6	94,8	1590,0	88,333
	100,0	95,3	94,8	97,8	97,8	100,0		
	100,0	74,1	81,0	63,8	96,2	96,0		
46 000	100,0	19,0	97,9	98,3	98,3	98,5	1683,2	93,511
	100,0	96,6	95,5	100,0	98,4	100,0		
	100,0	92,2	97,6	97,6	96,7	96,6		
48 000	100,0	98,1	99,5	98,3	98,6	99,0	1774,3	98,573
	100,0	96,7	97,9	98,3	99,0	100,0		
	100,0	96,2	98,3	98,3	98,3	97,9		
Total	1533,6	1056,1	1200,1	1181,9	1469,3	1516,7	7957,7	
Media	73,030	50,2915	57,147	56,281	69,967	72,225		441,50

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Tabla de totales para el análisis de varianza I**

Factor (A) Dosis, mg/l	Factor (B) Porcentaje de remoción de turbiedad (%)						Total
	A	B	C	D	E	F	
10 000	67,1	72,6	76.6	85,8	85,8	84,9	1536,4
	90,1	94,1	92.4	90,6	95,4	94,0	
	85,3	84,9	87.9	89,2	82,4	77,4	
20 000	82,9	56,5	40.0	39,3	59,1	69,6	1181,0
	94,1	88,3	86.5	63,6	13,7	88,5	
	65,0	70,3	70.0	68,6	65,5	59,5	
30 000	88,6	67,3	58.6	27,5	30,2	75,8	727,7
	56,1	43,7	41.2	28,6	13,7	100,0	
	13,0	12,4	30.2	5,5	47,1	-11,9	
32 000	85,6	75,5	68.9	43,2	46,8	75,5	1025,30
	95,6	57,6	56.0	46,4	67,8	100,0	
	85,5	13,3	33.5	11,3	53,4	9,4	
38 000	100,0	99,8	99.8	90,2	96,4	74,4	1488,0
	100,0	99,5	99.9	100,0	94.,4	100,0	
	100,0	15,8	43.3	28,6	72,5	73,4	
46 000	100,0	100,0	100.0	96,2	99,5	98,4	1758,3
	100,0	99,9	99,3	100,0	97,0	100,0	
	100,0	80,2	98,4	93,6	99,1	96,7	
48 000	100,0	100,0	100,0	99,4	99,3	99,8	1792,5
	100,0	100,0	100,0	100,0	99,6	100,0	
	100,0	96,3	99,5	99,3	99,4	99,9	
Total	1809,0	1528,1	1581,9	1406,8	1518,1	1665,3	9509,2

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Tabla de totales para el análisis de varianza II**

Factor (A) Dosis, mg/l	Factor (B) Porcentaje de remoción de color (%)						Total
	A	B	C	D	E	F	
10 000	17,2	6,9	3,4	13,8	13,8	10,3	-3,5
	-13,8	-6,9	-13,8	-13,8	-13,8	-13,8	
	-3,4	0,0	-3,4	0,0	3,4	10,3	
20 000	44,8	24,1	24,1	31,0	34,5	34,5	434,5
	20,7	24,1	6,9	10,3	24,1	31,0	
	17,2	10,3	17,2	10,3	34,5	34,5	
30 000	97,0	24,1	34,5	34,5	55,2	75,9	1179,2
	95,3	58,6	72,4	58,6	94,8	98,6	
	65,5	46,6	55,2	37,9	90,1	84,5	
32 000	98,3	30,2	40,9	40,9	65,5	80,6	1300,0
	98,3	68,1	78,0	68,4	95,6	100,0	
	96,6	53,4	61,6	44,4	91,6	87,4	
38 000	100,0	48,3	60,3	93,1	96,6	94,8	1590,0
	100,0	95,3	94,8	97,8	97,8	100,0	
	100,0	74,1	81,0	63,8	96,2	96,0	
46 000	100,0	19,0	97,9	98,3	98,3	98,5	1683,2
	100,0	96,6	95,5	100,0	98,4	100,0	
	100,0	92,2	97,6	97,6	96,7	96,6	
48 000	100,0	98,1	99,5	98,3	98,6	99,0	1774,3
	100,0	96,7	97,9	98,3	99,0	100,0	
	100,0	96,2	98,3	98,3	98,3	97,9	
Total	1533,6	1056,1	1200,1	1181,9	1469,3	1516,7	7957,7

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Análisis de varianza del rendimiento de remoción de turbiedad en la vinaza aplicando 6 distintos coagulantes**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor Crítico para F
Dosis (mg/l)	52060,0	6	8676,8	19,610	3,5300E-14	2,2086
Tipo de coagulante	4576,1	5	915,22	2,0684	0,077397	2,3231
Interacción	7138,4	30	237,95	0,5378	0,97119	1,5950
Dentro del grupo	37167,6	84	442,47			
Total	100943,1	125				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII: **Análisis de varianza del rendimiento de remoción de color en la vinaza aplicando 6 distintos coagulantes**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor Crítico para F
Dosis (mg/l)	151788,9	6	25298,2	138,653	2.07000E-41	2,20855
Tipo de coagulante	9974,97	5	1994,99	10,9340	4.01000E-08	2,32312
Interacción	7926,62	30	264,221	1,44812	0.0957160	1,59496
Dentro del grupo	15326,4	84	182,457			
Total	185017	125				

Fuente: elaboración propia.

4. RESULTADOS

Tabla XIV. Medición de turbiedad y color en la aplicación del coagulante A para cada corrida realizada

Dosis (mg/l)	Corrida 1		Corrida 2		Corrida 3	
	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)
10000	370	96000	112	132000	166	120000
20000	792	64000	66	92000	334	96000
30000	128	3500	494	5500	980	40000
32000	162	2000	50	2000	163	4000

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. Medición de turbiedad y color en la aplicación del coagulante B para cada corrida realizada

Dosis (mg/l)	Corrida 1		Corrida 2		Corrida 3	
	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)
10000	308	108000	66	124000	170	116000
20000	490	88000	132	88000	410	104000
30000	368	88000	634	48000	986	62000
32000	276	81000	477	37000	976	54000
38000	2.07	60000	5.78	5500	948	30000
46000	0.41	94000	1.16	4000	223	9000
48000	0	2200	0	3800	41.8	4400

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Medición de turbiedad y color en la aplicación del coagulante C para cada corrida realizada**

Dosis (mg/l)	Corrida 1		Corrida 2		Corrida 3	
	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)
10000	264	112000	86	132000	136	120000
20000	676	88000	152	108000	338	96000
30000	466	76000	662	32000	786	52000
32000	350	68500	496	25500	749	44500
38000	2.44	46000	111	6000	638	22000
46000	0	2400	7.86	5200	17.8	2800
48000	0	600	0	2400	5.41	2000

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Medición de turbiedad y color en la aplicación del coagulante D para cada corrida realizada**

Dosis (mg/l)	Corrida 1		Corrida 2		Corrida 3	
	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)
10000	160	100000	106	132000	122	116000
20000	684	80000	410	104000	354	104000
30000	816	76000	804	48000	1064	72000
32000	640	68500	603	36600	999	64500
38000	110.4	8000	0	2600	804	42000
46000	42.4	2000	----	----	72.5	2800
48000	6.3	2000	0	2000	8.2	2000

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Medición de turbiedad y color en la aplicación del coagulante E para cada corrida realizada**

Dosis (mg/l)	Corrida 1		Corrida 2		Corrida 3	
	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)
10000	160	100000	52	132000	198	112000
20000	460	76000	972	88000	388	76000
30000	786	52000	463,5	6000	596	11500
32000	599	40000	363	5100	524,5	9700
38000	40	4000	63,1	2500	310	4400
46000	5,14	2000	34,0	1800	10,3	3800
48000	7,89	1600	4,15	1200	6,96	2000

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Medición de turbiedad y color en la aplicación del coagulante F para cada corrida realizada**

Dosis (mg/l)	Corrida 1		Corrida 2		Corrida 3	
	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)
10000	170	104000	68	132000	254	1040000
20000	342	76000	130	80000	456	76000
30000	272	28000	0	1600	1260	18000
32000	276	22500	----	----	1020	14600
38000	288	6000	----	----	300	4600
46000	17.9	1700	----	----	36.9	4000
48000	2.35	1200	----	----	1.26	2400

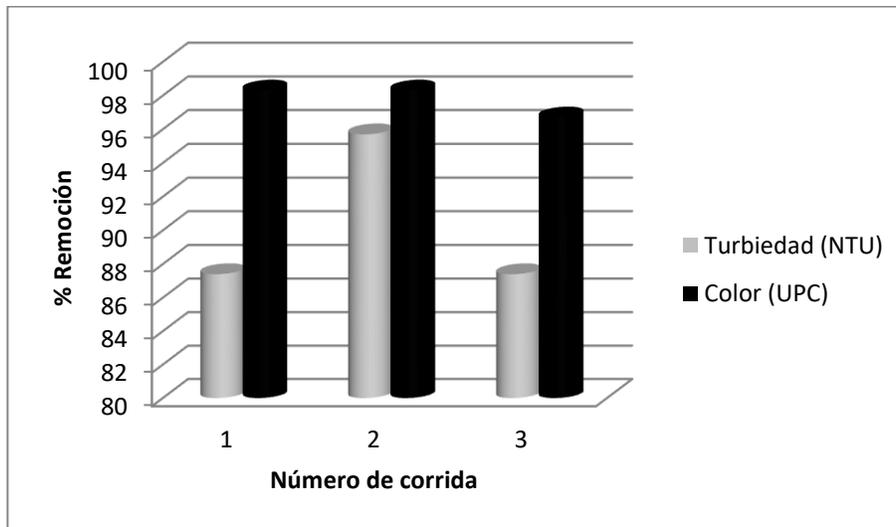
Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Medición del color en la vinaza para la dosis óptima de cada coagulante evaluado**

Coagulante (mg/l)	Dosis óptima (mg/l)	Color (UPC)		
		Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
A	32000	2000	2000	4000
B	48000	2200	3800	4400
C	48000	600	2400	2000
D	48000	2000	2000	2000
E	48000	1600	1200	2000
F	48000	1200	----	2400

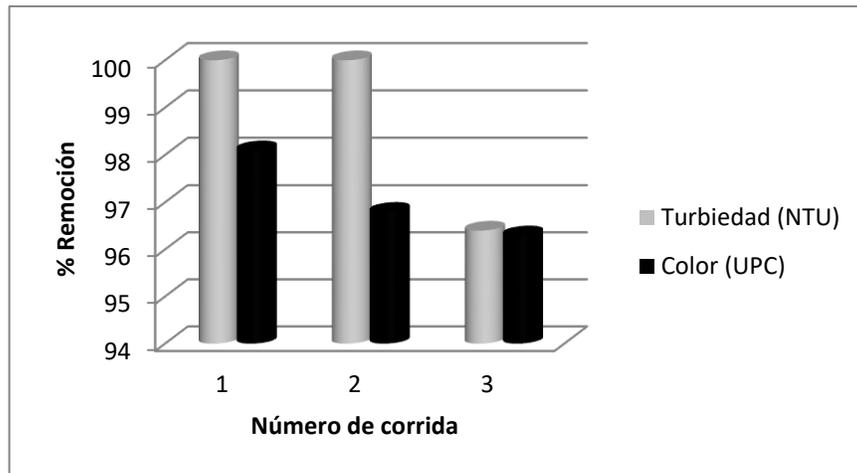
Fuente: elaboración propia.

Figura 12. **Porcentajes de remoción de turbiedad y color en el agua aplicando dosis óptima de coagulante A**



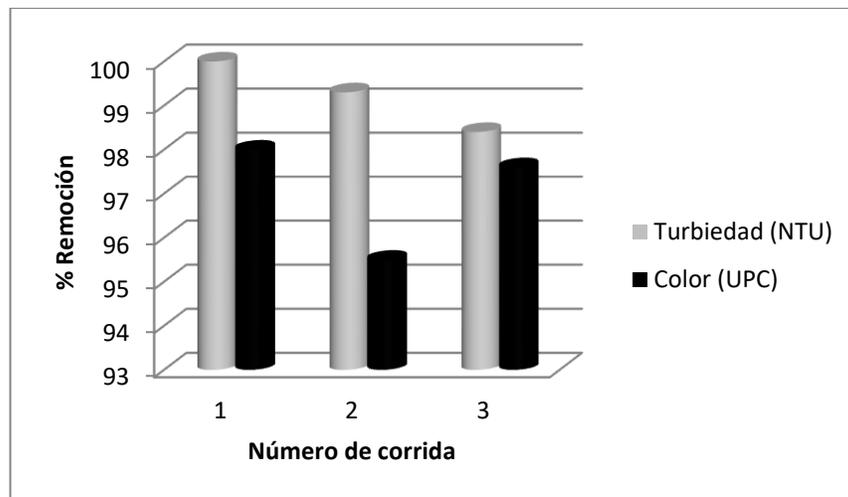
Fuente: elaboración propia.

Figura 13. **Porcentajes de remoción de turbiedad y color en el agua aplicando la dosis óptima del coagulante B**



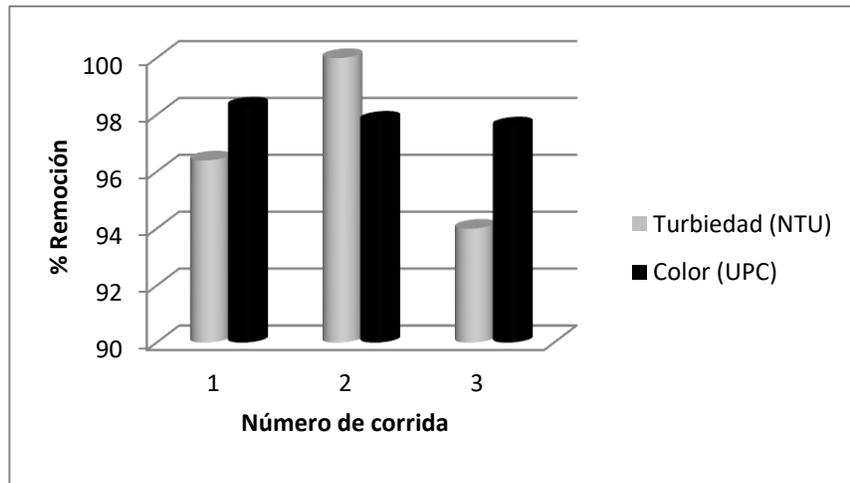
Fuente: elaboración propia.

Figura 14. **Porcentajes de remoción de turbiedad y color en el agua aplicando la dosis óptima del coagulante C**



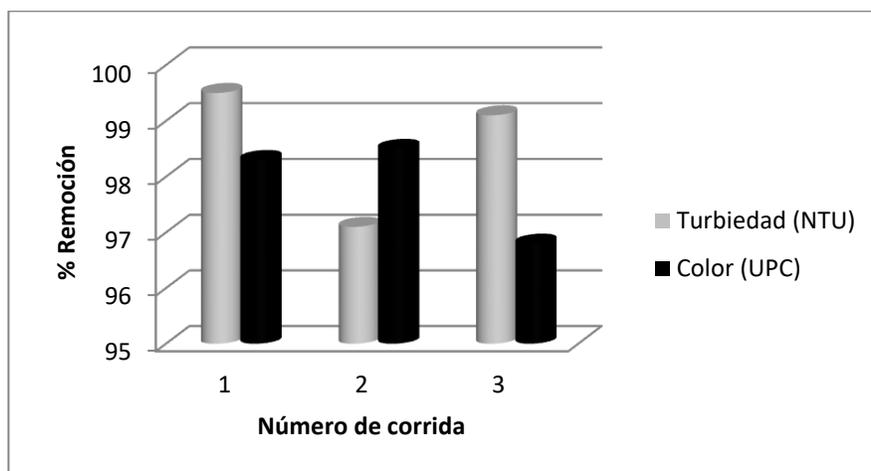
Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Porcentajes de remoción de turbiedad y color en el agua aplicando la dosis óptima del coagulante D**



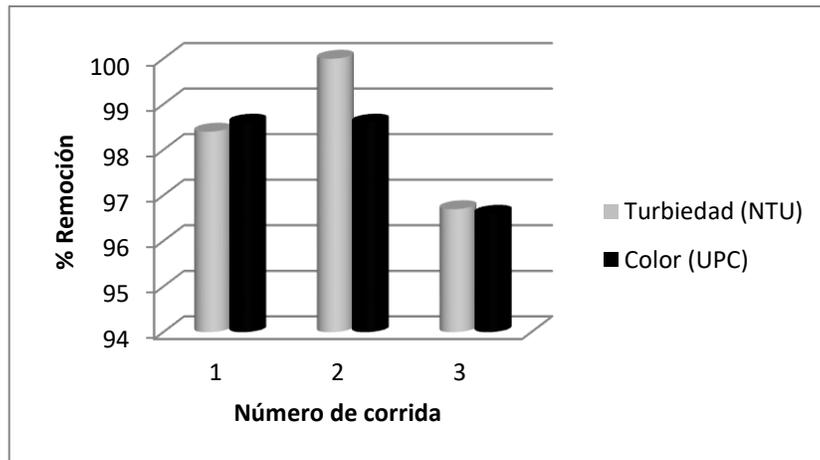
Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Porcentajes de remoción de turbiedad y color en el agua aplicando la dosis óptima del coagulante E**



Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Porcentajes de remoción de turbiedad y color en el agua aplicando la dosis óptima del coagulante F**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Dosis óptima de aplicación con base a un valor promedio de remoción de color igual o mayor a 95 % para cada coagulante evaluado**

Coagulante (mg/l)	Dosis óptima (mg/l)	Valor Promedio Color (UPC)	Porcentaje promedio de remoción de color
A	32 000	2 667	97,7
B	48 000	3 467	97,0
C	48 000	1 667	98,6
D	48 000	2 000	98,3
E	48 000	1 600	98,6
F	48 000	1 800	98,5

Fuente: elaboración propia.

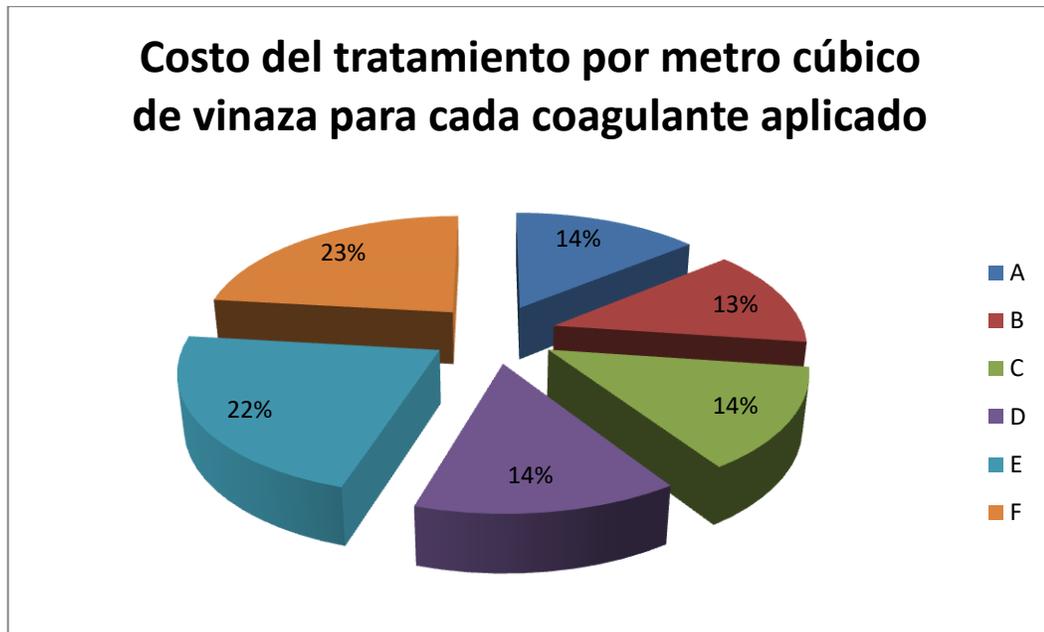
Con base en el artículo 20 del Acuerdo Gubernativo 236-2006, Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos, extendido por el Gobierno de la República de Guatemala, en donde se detallan los límites máximos permisibles de los parámetros para las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, se determina que la vinaza tratada no es apta en ninguno de los casos de aplicación de los seis coagulantes, para su disposición a un cuerpo receptor, ya que ninguna de las opciones evaluadas alcanzó el valor permisible de color de 500 UPC, después de aplicado el tratamiento fisicoquímico, lo que equivale al 99,6 % de remoción de color.

Tabla XXII. **Costo del tratamiento fisicoquímico por metro cúbico de vinaza a tratar aplicando 6 coagulantes distintos**

Coagulante	Dosis (g/m³)	Costo/Kg Coagulante (Q./Kg)	Costo/Metro cúbico de Vinaza tratada (Q./m³)
A	32 000	8,00	256,00
B	48 000	5,00	240,00
C	48 000	5,15	247,20
D	48 000	5,30	254,40
E	48 000	8,40	403,20
F	48 000	8,80	422,40

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Representación gráfica del costo por metro cúbico que posee el tratamiento fisicoquímico de la vinaza con cada coagulante evaluado**



Fuente: elaboración propia.

La figura 18 muestra que el coagulante B representa el de menor costo al ser aplicado en el tratamiento fisicoquímico de la vinaza, mientras que el coagulante F representa el de mayor costo, por lo que el coagulante B debe ser considerado como la mejor opción para el proceso de clarificación de la vinaza.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Las características representativas de una vinaza que es tratada biológicamente en un reactor anaerobio para la producción de un gas combustible, obligaron a que durante la experimentación la aplicación de las dosis de cada coagulante se realizara en forma fraccionada, debido a que dicha vinaza continúa generando gases de descomposición (metano y sulfuro de hidrógeno) aún después de ser tomada la muestra del reactor, por lo que adicionar la dosis completa del coagulante provocaba un desprendimiento agresivo de dicho gas, interfiriendo en el proceso de coagulación, haciéndolo ineficiente al producir una espuma que se desbordaba del vaso de precipitados en el que se contenía la muestra. Otro fenómeno que condicionó el fraccionamiento de las dosis de los coagulantes, fue el impacto en el potencial de hidrógeno del agua que ocasionan las altas dosis aplicadas, debido a su naturaleza, ya que son sales inorgánicas de hierro, las cuales por su proceso de fabricación contiene valores significativos de acidez libre; por lo que a partir de la tercera dosificación parcial se necesitó agregar hidróxido de calcio como corrector de pH, para mantener el valor adecuado de este parámetro, para la correcta función de cada coagulante.

El cloruro férrico aplicado solo, presenta una clara funcionalidad en la remoción de color de la vinaza alcanzando hasta el 98,3 % (figura 12), por el contrario, el sulfato férrico aplicado de la misma forma, presenta un mejor desempeño en la remoción de turbiedad, alcanzando hasta el 100 % (figura 13). La mezcla de cloruro férrico y sulfato férrico en la proporción que corresponde al coagulante C, registró valores de remoción de color más bajos frente a los alcanzados para la turbiedad (figura 14), siendo para el primero la remoción

más alta de 98 % y para el último de 100 %. Por su parte, las mezclas correspondientes a los coagulantes D, E y F, no mostraron tendencias específicas, variando en cada corrida los porcentajes de remoción tanto para el color como la turbiedad.

Los valores de la eficiencia de remoción de turbiedad y color expresados en porcentajes para cada corrida de cada coagulante aplicado, se sometieron a un análisis estadístico para la prueba de la hipótesis planteada, dicho análisis fue el ANOVA bifactorial para varias muestras. Este análisis aplicado al rendimiento de remoción de la turbiedad en la vinaza, reveló que sí existe diferencia significativa entre la dosis de cada coagulante y la eficiencia de remoción, mientras que para el tipo de coagulante no existe diferencia significativa. Para el caso del rendimiento de la remoción de color, el análisis ANOVA resultó en el rechazo de las hipótesis nulas planteadas, es decir, tanto el factor dosis de cada coagulante como el factor tipo de coagulante, sí tienen diferencia significativa frente al rendimiento de la remoción de color en la vinaza. Los valores críticos para probar las hipótesis nulas se determinaron a un nivel de significancia de 0,05, siendo para el rendimiento de remoción de turbiedad, $f_{\text{dosis}} \geq F_{\text{crítico}}$ y $f_{\text{coagulante}} \leq F_{\text{crítico}}$. Para el rendimiento de remoción de color los factores indicaron que, $f_{\text{dosis}} \geq F_{\text{crítico}}$ y $f_{\text{coagulante}} \geq F_{\text{crítico}}$, cayendo ambas en la región de rechazo, tal y como se indicó anteriormente.

El costo del tratamiento por metro cúbico de vinaza, se calculó con base en las dosis óptimas definidas para cada coagulante aplicado y a los precios que Representaciones Químicas, S.A. asignó a cada producto (tabla XXII). Este cálculo evidenció que el tratamiento se encarece con el uso de las mezclas del Cloruro Férrico con la Poliamina en sus diferentes proporciones (coagulantes E y F), siendo desde Q.256,00 por metro cúbico (m^3) de agua a tratar con la

aplicación del cloruro férrico sólo, hasta Q.422,40 por metro cúbico de agua a tratar con la aplicación de la mezcla 90:10 de Cloruro Férrico y Poliamina.

Como los análisis estadísticos revelaron que sí hay diferencia significativa para la remoción de turbiedad con respecto a la dosis, el Cloruro Férrico se confirmó como la mejor opción para el tratamiento, ya que éste reflejó la menor dosis óptima. Con respecto al tipo de coagulante, el trabajo estadístico reveló que no hay diferencia significativa, por lo que se determinó que con base en el costo del tratamiento, el Sulfato Férrico se presentó como la mejor opción.

Para el caso de la remoción de color, debido a que las hipótesis que acompañaron a los factores que se estaban evaluando se rechazaron, se atribuyó al sulfato férrico como la mejor opción para el tratamiento fisicoquímico de vinaza, fundamentándose en que superó el porcentaje de remoción de color que se planteó como uno de los objetivos específicos del estudio, con el menor costo de tratamiento por metro cúbico de vinaza.

En referencia al mayor porcentaje de remoción de color alcanzado, los coagulantes que se identificaron como la mejor opción fueron, la mezcla del sulfato férrico con cloruro férrico en la proporción 95,5 (coagulante C) y la mezcla de cloruro férrico con Poliamina en la proporción 95,5 (coagulante E), (tabla XXI).

Las mediciones de color y turbiedad, realizadas para cada corrida durante el desarrollo de la experimentación, requirieron de la preparación de diluciones para su análisis, ya que la capacidad del turbidímetro y colorímetro las limitaron.

La disposición del agua tratada se evaluó con base al acuerdo gubernativo 236-2006 denominada Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales, en donde se establecen los parámetros de aguas para reúso, presentando opciones de reúso de la vinaza tratada, para riego agrícola en general (Tipo I), reúso para cultivos comestibles (Tipo II), reúso para pastos y otros cultivos (Tipo IV).

6. LOGROS OBTENIDOS

1. La identificación de un coagulante apropiado para la clarificación de la vinaza, considerando su rendimiento frente a otros coagulantes y su costo de aplicación por metro cúbico de vinaza tratada.
2. Se alcanzó la clarificación de la vinaza obteniendo un porcentaje de remoción de color mayor al 95 %.
3. Se proporcionó a Representaciones Químicas, S.A. un escenario de opciones para sus propuestas de tratamiento fisicoquímico de vinazas.

CONCLUSIONES

1. El análisis estadístico determinó que sí hay diferencia significativa para la remoción de turbiedad con respecto a la dosis de coagulante, por lo que el cloruro férrico se confirmó como la mejor opción para el tratamiento en la remoción de turbiedad en la vinaza, ya que la menor dosis óptima aplicada fue de este coagulante.
2. Se verificó que para el rendimiento de la remoción de turbiedad, el tipo de coagulante no tuvo incidencia significativa, estableciendo al Sulfato Férrico como la mejor opción para el tratamiento, en términos de poseer el menor costo de tratamiento por metro cúbico.
3. Para el caso de la remoción de color, debido a que las hipótesis que acompañaron a los factores que se estaban evaluando, se rechazaron, demostrando que no hay incidencia significativa entre el tipo de coagulante y su dosis frente a la eficiencia de remoción, se atribuyó al sulfato férrico como la mejor opción para el tratamiento fisicoquímico de vinaza, fundamentándose en que superó el porcentaje de remoción que se planteó como uno de los objetivos específicos del estudio, con el menor costo de tratamiento por metro cúbico de vinaza.
4. Los valores de los parámetros turbiedad y color medidos en la vinaza después de aplicado el tratamiento fisicoquímico, presentaron en su mayoría, remociones directamente proporcionales a la cantidad de coagulante añadido (dosis).

5. Todos los coagulantes aplicados superaron una eficiencia (η) de remoción de color en la vinaza, del 95 %, con el cual se verificó las dosis óptimas de cada coagulante.
6. Los coagulantes C y E, consistentes en una mezcla de sulfato férrico y cloruro férrico en la proporción 95:5 y una mezcla de cloruro férrico y Poliamina en una proporción 95:5, respectivamente, se registraron como los coagulantes con el mejor rendimiento de remoción de color promedio, alcanzando el 98,6 %.
7. El coagulante con el costo de aplicación más elevado por metro cúbico de agua a tratar, fue la mezcla de cloruro férrico y poliamina en una proporción 90:10.
8. El coagulante con el menor costo por metro cúbico de agua a tratar, fue el sulfato férrico.

RECOMENDACIONES

1. Las sales de hierro, tales como las evaluadas en el estudio que se desarrolló, se caracterizan por el aporte de color al agua cuando éstas se añaden en exceso, por lo que se recomienda aplicar una técnica de remoción de hierro una vez alcanzada la dosis óptima de coagulante propuesta, para determinar el contenido de hierro agregado en exceso.
2. Otra de las consecuencias que se presentaron por adición de altas dosis de sales de hierro, fue la elevación del valor de pH de la muestra, lo cual interfiere en la funcionalidad del coagulante, por lo que este parámetro debe ser controlado con la aplicación de un corrector y de esa forma garantizar que el proceso de desestabilización de las partículas coloidales se dé apropiadamente.
3. El proceso de descomposición biológica que sufre la vinaza produce gases que aún se encuentran atrapados en la solución aún días después de haber sido tomada la muestra del reactor, por lo que se recomienda añadir el coagulante a la muestra de una forma fraccionada, es decir, dividir la dosis óptima total en varias aplicaciones proporcionales, para evitar el agresivo desprendimiento del gas y perder eficiencia en la clarificación.
4. Dejar reposar la muestra de vinaza por lo menos durante 30 días en condiciones de exposición al ambiente, es decir, con ventilación natural, con la finalidad de que el gas contenido en la muestra sea liberado antes de aplicar el tratamiento fisicoquímico de clarificación.

BIBLIOGRAFÍA

1. ANDÍA, Lidia. *Tratamiento de aguas, coagulación y floculación*. [en línea]. <[http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid = 2792d3e3 - 59b7- 4b9e-ae55 - 6209841d9b8 & groupId= 10154](http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-6209841d9b8&groupId=10154)>. [Consulta: agosto de 2014].
2. DEVORE, Jay. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. 7a. ed. San Luis Obispo, California, USA: Latinoamérica, 2008. 710 p.
3. MEZA, Arturo. *Floculación-Coagulación como postratamiento del efluente de un reactor anaerobio que trata vinazas tequileras* [en línea]. <http://www.fi.uba.ar/archivos/institutos_teoriasedimentacion.pdf>. [Consulta: agosto de 2014].
4. PÉREZ, Luis. *Teoría de la sedimentación*. [en línea]. <http://www.fi.uba.ar/archivos/institutos_teoriasedimentacion.pdf>. [Consulta: agosto de 2014].
5. RENNOLA, Leonardo. *Treatment of distillery wastewaters using coagulants and membranes*. Universidad de Los Andes. [en línea]. <[http://www. scielo. org. ve / pdf / rfiuz / v30nespecial / art03.pdf](http://www.scielo.org.ve/pdf/rfiuz/v30nespecial/art03.pdf)>. [Consulta: agosto de 2014].

6. República de Guatemala. *Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos*. Acuerdo Gubernativo 236-2006. Guatemala, mayo 2006. 185 p.

7. ZAYAS, Teresa. *Tratamiento de agua residual con alta carga orgánica y color provenientes del proceso de vinaza* [en línea]. <http://www.uaemex.mx/Red_Ambientales/docs/memorias/Extenso/TA/EC/TAC-51.pdf>. [Consulta: agosto de 2014].

APÉNDICE

Apéndice 1. **Vinaza tratada con coagulante A y coagulante B en sus dosis óptimas en corrida 1**

							
Coagulante	Dosis (mg/l)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)	Coagulante	Dosis (mg/l)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)
A	32000	2000	162	B	48000	2200	0

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Vinaza tratada con coagulante C y coagulante D en sus dosis óptimas en corrida 1**

							
Coagulante	Dosis (mg/l)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)	Coagulante	Dosis (mg/l)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)
C	46000	2400	0	D	46000	2000	42.4

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Vinaza tratada con coagulante E y coagulante F en sus dosis óptimas en corrida 1**

							
Coagulante	Dosis (mg/l)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)	Coagulante	Dosis (mg/l)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)
E	40000	2000	5.14	F	48000	1200	2.35

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Vinaza tratada con coagulante A y coagulante B en sus dosis óptimas en corrida 2**

							
Coagulante	Dosis (mg/l)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)	Coagulante	Dosis (mg/l)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)
A	32000	2000	50	B	48000	3800	0

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Vinaza tratada con coagulante C y coagulante D en sus dosis óptimas en corrida 2

							
Coagulante	Dosis (mg/l)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)	Coagulante	Dosis (mg/l)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)
C	46000	5200	7.86	D	38000	2600	0

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. Vinaza tratada con coagulante E y coagulante F en sus dosis óptimas en corrida 2

							
Coagulante	Dosis (mg/l)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)	Coagulante	Dosis (mg/l)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)
E	40000	1800	34.0	F	30000	1600	0

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Vinaza tratada con coagulante A y coagulante B en sus dosis óptimas en corrida 3**

							
Coagulante	Dosis (mg/l)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)	Coagulante	Dosis (mg/l)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)
A	32000	4000	163	B	48000	4400	41.8

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Vinaza tratada con coagulante C y coagulante D en sus dosis óptimas en corrida 3**

							
Coagulante	Dosis (mg/l)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)	Coagulante	Dosis (mg/l)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)
C	46000	2800	17,8	D	46000	2800	72,5

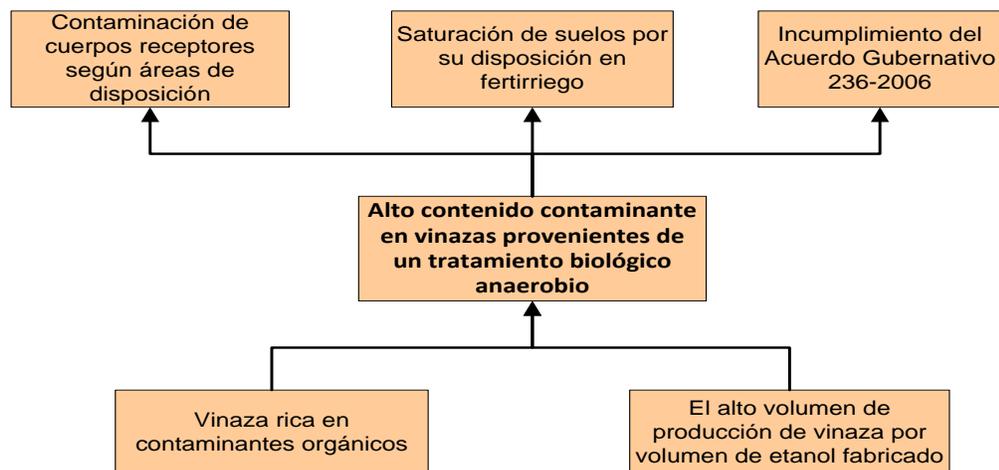
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Vinaza tratada con coagulante E y coagulante F en sus dosis óptimas en corrida 3**

							
Coagulante	Dosis (mg/l)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)	Coagulante	Dosis (mg/l)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)
E	46000	3800	10.3	F	46000	4000	36,9

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Árbol de problemas**



Fuente: elaboración propia.

