



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

**EVALUACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN DE FLOCULANTE EN LA  
CLARIFICACIÓN DE REFINACIÓN DE AZÚCAR Y SU INCIDENCIA EN LA  
REDUCCIÓN DE POTENCIAL FLOC EN EL AZÚCAR REFINADO**

**Emilce Concepción López Aldana**

Asesorado por el Ing. Carlos Roberto Morales Cuellar

Coasesorado por el Ing. Juan Pedro Quiñónez Fernández

Guatemala, septiembre de 2014



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN DE FLOCULANTE EN LA  
CLARIFICACIÓN DE REFINACIÓN DE AZÚCAR Y SU INCIDENCIA EN LA  
REDUCCIÓN DE POTENCIAL FLOC EN EL AZÚCAR REFINADO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**EMILCE CONCEPCIÓN LÓPEZ ALDANA**

ASESORADO POR EL ING. CARLOS ROBERTO MORALES CUELLAR  
COASESORADO POR EL ING. JUAN PEDRO QUIÑÓNEZ FERNÁNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA QUÍMICA**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2014



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Erwin Manuel Ortíz Castillo
EXAMINADOR	Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
EXAMINADOR	Ing. Renato Giovanni Ponciano Sandoval
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 DOSIFICACIÓN DE FLOCULANTE EN LA CLARIFICACIÓN DE REFINACIÓN DE AZÚCAR Y SU INCIDENCIA EN LA REDUCCIÓN DE POTENCIAL FLOC EN EL AZÚCAR REFINADO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha de 28 de mayo de 2014.



**Emilce Concepción López Aldana**



Guatemala, 24 de junio de 2014

Ingeniero  
Víctor Manuel Monzón Valdés  
Director  
Escuela de Ingeniería Química

Estimado Ingeniero:

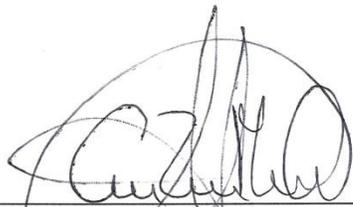
Atentamente me dirijo a usted para informarle que ha sido concluido satisfactoriamente el trabajo de graduación titulado:

**EVALUACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN DE FLOCULANTE EN LA CLARIFICACIÓN DE REFINACIÓN DE AZÚCAR Y SU INCIDENCIA EN LA REDUCCIÓN DE POTENCIAL FLOC EN EL AZÚCAR REFINADO**

Desarrollado por la estudiante de ingeniería Química **Emilce Concepción López Aldana**, identificada con el carné universitario **2009-15380**.

Me remito informarle, que después de haber realizado la revisión del respectivo informe y haberle hecho las correcciones pertinentes, considero que llena los requisitos para su aprobación.

Atentamente,



Carlos Roberto Morales Cuellar  
Ingeniero Químico  
Colegiado 1237

Ing. Carlos Roberto Morales Cuellar

Colegiado 1237

Asesor de Tesis



Guatemala, 07 de julio de 2014

Ingeniero  
Víctor Manuel Monzón Valdés  
Director  
Escuela de Ingeniería Química

Estimado Ingeniero:

Atentamente me dirijo a usted para informarle que ha sido concluido satisfactoriamente el trabajo de graduación titulado:

**EVALUACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN DE FLOCULANTE EN LA CLARIFICACIÓN DE REFINACIÓN DE AZÚCAR Y SU INCIDENCIA EN LA REDUCCIÓN DE POTENCIAL FLOC EN EL AZÚCAR REFINADO**

Desarrollado por la estudiante de Ingeniería Química **Emilce Concepción López Aldana**, identificada con el carné universitario **2009-15380**.

Me remito informarle, que después de haber realizado la revisión del respectivo informe y haberle hecho las correcciones pertinentes, considero que llena los requisitos para su aprobación.

Atentamente,



Ing. Juan Pedro Quiñónez Fernández

Colegiado 1247

Asesor de Tesis





Guatemala, 18 de agosto de 2014  
Ref. EIQ.TG-IF.027.2014

Ingeniero  
**Victor Manuel Monzón Valdez**  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **012-2014** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

**INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN**

Solicitado por la estudiante universitaria: **Emilce Concepción López Aldana**.  
Identificada con número de carné: **2009-15380**.

Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA**.

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

**EVALUACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN DE FLOCULANTE EN LA CLARIFICACIÓN DE  
REFINACIÓN DE AZÚCAR Y SU INCIDENCIA EN LA REDUCCIÓN DE POTENCIAL  
FLOC EN EL AZÚCAR REFINADO**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Carlos Roberto Morales Cuellar**.

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

"ID Y ENSEÑADA TODOS"

  
Licda. Ingrid Lorena Benítez Pacheco  
COORDINADORA DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





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 Trabajo de Graduación de la estudiante, **EMILCE CONCEPCIÓN LÓPEZ ALDANA** titulado: "**EVALUACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN DE FLOCULANTE EN LA CLARIFICACIÓN DE REFINACIÓN DE AZÚCAR Y SU INCIDENCIA EN LA REDUCCIÓN DE POTENCIAL FLOC EN EL AZÚCAR REFINADO**". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.



Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, septiembre 2014

Cc: Archivo  
VMMV/ale



Universidad de San Carlos  
de Guatemala

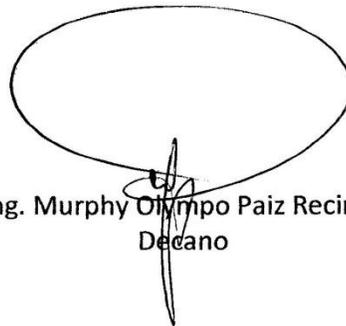


Facultad de Ingeniería  
Decanato

DTG. 464.2014

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: **EVALUACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN DE FLOCULANTE EN LA CLARIFICACIÓN DE REFINACIÓN DE AZÚCAR Y SU INCIDENCIA EN LA REDUCCIÓN DE POTENCIAL FLOC EN EL AZÚCAR REFINADO**, presentado por la estudiante universitaria **Emilce Concepción López Aldana**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos  
Decano



Guatemala, 10 de septiembre de 2014

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por estar a mi lado en cada momento de la vida y darme sabiduría, paciencia y entendimiento. También a mi madre del cielo, la Virgen María, por su amor infinito.
- Mi madre** Emilce López, por su ejemplo, apoyo y amor incondicional, sin el cual no hubiera alcanzado mis metas. Este logro es tuyo también.
- Mi abuela** Mirna de López, por su cariño de madre y ejemplo de humildad, responsabilidad y paciencia, que me han forjado como persona.
- Mi abuelo** José Ángel López (q.e.p.d.), por ser más que un padre y un abuelo, un ejemplo a seguir; tu coraje, entrega y lucha durante toda tu vida me demostraron que las metas se alcanzan cuando se lucha por ellas.
- Mi familia** Por estar presentes en mi vida, dándome su amor, alegría y apoyo en cada momento.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

- Dios** Por darme vida, sabiduría y entendimiento para afrontar los retos de la vida.
- Mi madre** Por darme la vida y ser ejemplo de superación y lucha personal y profesional.
- Mis abuelos** Por su gran amor, comprensión y apoyo en todo momento. Me han dado lecciones de vida que me han convertido en una mejor persona.
- Mis tíos** Mirna López y Antonio Morales, por ser parte esencial de mi formación personal y profesional, principalmente por su amor y consejos.
- Mis tíos** Por su cariño y apoyo incondicional.
- Mis primos** Karen Morales, Cindy Morales, Emilia Morales, Nancy Morales, Andrea Quiñonez, José Morales, Carlos Morales, Erick Morales, William Quiñonez, Cristhian Quiñonez y Daniel Quiñonez, por ser como hermanos para mí., y a mis otros primos por su cariño incondicional.

**Mis sobrinos**

Emilio Morales, Ricardo Morales, Guadalupe Morales, Izel Sincal, Citlali Sincal, Erick Morales y Santiago Morales, por los momentos alegres que pasamos juntos.

**Pavel Roulet**

Por su apoyo y motivación constante.

**Alejandro Díaz**

Por las muestras de cariño que me ha dado en estos años y por ser un ejemplo de superación.

**Brenda Franco**

Por estar pendiente de mí en todo momento y compartir este triunfo conmigo.

**Mercelina Cifuentes**

Por su cariño y consejos incondicionales.

**Mis amigos**

Gabriela Pérez, Gabriela Santa Cruz, Alejandra Ávila, Marlith de León, Maira Cecaída, Narda Pacay, Odalis López, Annelisse Fernández, Indira Barreno, Nancy Castro, Norma Castro Leonel Morataya, Pedro García, Juan Pablo Samaniego, Byron Roldán, Bryan Carrera, Diego Ochoa, Rodrigo Ríos, Erick Orozco, Haniel Girón, Jacobo Ariel, Luis Fernando Mejicanos y todos con los que compartí momentos agradables. Gracias a ustedes reí y disfruté de cada uno de los momentos de esta grandiosa etapa de mi vida.

**Ingenio La Unión**

Por la oportunidad de aprender y de realizar este trabajo. Especialmente a Cupertino Mejía, José Ortiz, Juan Pedro Quiñónez, Julio Mox, Josué Figueroa, Fernando García y personal de Refinería.

**Facultad de Ingeniería**

Especialmente a la Escuela de Ingeniería Química, por darme la oportunidad de ser ahora profesional.



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN .....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
Hipótesis.....	XVI
INTRODUCCIÓN .....	XVII
1. ANTECEDENTES .....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Descripción del proceso de producción de azúcar refinado .....	5
2.1.1. Estación de tratamiento de licor.....	5
2.1.1.1. Disolución .....	5
2.1.1.2. Clarificación .....	6
2.1.1.3. Decoloración.....	7
2.1.1.4. Filtración .....	7
2.1.2. Estación de recuperación de sacarosa .....	7
2.1.2.1. Cristalización .....	8
2.1.2.2. Centrifugación.....	8
2.1.2.3. Secado y enfriado .....	8
2.1.3. Estación de envasado .....	8
2.2. Características generales del equipo.....	9
2.2.1. Clarificadores.....	9
2.2.2. Clarificador tipo Talofloc .....	10

2.3.	Clarificación de licor .....	10
2.3.1.	Efectos prácticos de la clarificación.....	11
2.3.2.	Fisicoquímica de la clarificación .....	12
2.3.3.	Relación entre los coloides y la carga iónica del licor mezclado .....	13
2.4.	Agentes químicos utilizados durante clarificación .....	14
2.4.1.	Sacarato de cal .....	14
2.4.2.	Ácido fosfórico.....	15
2.4.3.	Floculante.....	16
2.4.3.1.	Características de los floculantes aniónicos .....	17
2.4.3.2.	Fisicoquímica de la formación de los flóculos .....	17
2.5.	Floc ácido de bebidas .....	18
2.5.1.	Antecedentes .....	19
2.5.2.	Tipos de floc.....	20
2.5.3.	Importancia del ABF .....	22
2.5.4.	Formación del floc.....	23
2.5.5.	Factores de formación de floc.....	23
2.5.6.	Técnicas de identificación .....	24
2.5.7.	La perspectiva de los productores de bebidas .....	25
2.5.8.	Floc en bebidas preparadas con azúcar de caña.....	26
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	27
3.1.	Variables .....	27
3.2.	Técnica cuantitativa.....	31
3.2.1.	Diseño preliminar .....	31
3.2.2.	Análisis de medición de color .....	33
3.2.2.1.	Remoción de color.....	34

3.2.3.	Análisis de medición de turbidez .....	35
3.2.3.1.	Remoción de turbidez .....	36
3.2.4.	Análisis de potencial floc.....	36
3.3.	Recolección y ordenamiento de la información .....	38
3.3.1.	Diseño de tratamientos .....	41
3.4.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información .....	42
3.5.	Análisis estadístico .....	45
3.5.1.	Promedio de una muestra.....	45
3.5.2.	Errores de muestreo .....	45
3.5.2.1.	Desviación estándar .....	46
3.5.2.2.	Coefficiente de variación.....	46
3.5.3.	Análisis de varianza.....	46
4.	RESULTADOS .....	53
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	57
	CONCLUSIONES .....	61
	RECOMENDACIONES .....	63
	BIBLIOGRAFÍA.....	65
	APÉNDICE.....	69



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Formación del precipitado de fosfato de calcio .....	16
2.	Diagrama de flujo de la técnica cuantitativa .....	32
3.	Proceso escalonado para la evaluación de la dosificación de floculante y su incidencia en la reducción de potencial floc .....	38
4.	Diseño experimental de la evaluación de dosificación de floculante y su incidencia en la reducción de potencial floc.....	40
5.	Relación entre el nivel de potencial floc y la dosificación de floculante.....	53
6.	Relación entre la remoción de turbidez y la dosificación de floculante.....	54
7.	Relación entre la remoción de color y la dosificación de floculante .....	55

### TABLAS

I.	Tipos de floc según su origen .....	21
II.	Descripción de las variables de control en la etapa de preparación del floculante en la estación de clarificación .....	27
III.	Descripción de las variables de control en la etapa de adición de floculante en la estación de clarificación .....	28
IV.	Variables independientes en la etapa de adición de floculante de la estación de clarificación .....	28
V.	Variables respuesta del trabajo de investigación .....	29

VI.	Técnicas cuantitativas de análisis de licor clarificado y azúcar refinado, a partir de metodologías ICUMSA .....	33
VII.	Resultados obtenidos en análisis de potencial floc.....	37
VIII.	Diseño factorial de tratamientos para evaluación de las condiciones de adición de floculante .....	42
IX.	Formulario de tabulación y ordenamiento de los análisis de color y turbidez del licor de azúcar .....	43
X.	Formulario de tabulación y ordenamiento de los análisis fisicoquímicos .....	43
XI.	Formulario de tabulación y ordenamiento del análisis de potencial floc .....	44
XII.	Tratamiento experimental de los análisis químicos .....	44
XIII.	Datos típicos para el diseño de bloques al azar .....	47
XIV.	Análisis de varianza para el experimento de bloques al azar .....	48
XV.	Análisis de varianza sobre relación entre dosificación de floculante y remoción de turbidez .....	49
XVI.	Análisis de varianza sobre relación entre dosificación de floculante y remoción de color .....	50
XVII.	Análisis de varianza sobre relación entre dosificación de floculante y nivel de potencial floc .....	50
XVIII.	Prueba de medias de remoción de color con diferentes dosificaciones de floculante.....	51
XIX	Prueba de medias de potencial floc con diferentes dosificaciones de floculante .....	51
XX.	Relación matemática de la dosificación de floculante con los parámetros evaluados .....	56
XXI.	Análisis de varianza de las relaciones de dosificación de floculante con los parámetros evaluados.....	56
XXII.	Dosificación óptima de floculante .....	56

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>Abs</b>	Absorbancia
<b>Bx</b>	Brix
<b>cm</b>	Centímetro
<b>cm<sup>3</sup></b>	Centímetro cúbico
<b>cv</b>	Coefficiente de variación
<b><math>\rho</math></b>	Densidad
<b>s</b>	Desviación estándar
<b>d</b>	Dosificación de floculante
<b>°C</b>	Grado celsius
<b>g</b>	Gramo
<b>kg</b>	Kilogramo
<b>L</b>	Litro
<b><math>\bar{x}</math></b>	Media aritmética
<b><math>\mu\text{S}</math></b>	Microsiemen
<b>mL</b>	Mililitro
<b>min</b>	Minuto
<b>nm</b>	Nanómetro
<b>ppm</b>	Partes por millón
<b>%RC</b>	Porcentaje de remoción de color
<b>%RT</b>	Porcentaje de remoción de turbidez
<b>Pf</b>	Potencial floc
<b>TSSH</b>	Tonelada de sólido soluble por hora
<b>UI</b>	Unidades ICUMSA



## GLOSARIO

<b>ABF</b>	<i>Acid Beverage Floc.</i>
<b>Azúcar blanco</b>	Azúcar que ha sufrido la pérdida de color al pasar por un proceso de sulfatación por medio de anhídrido sulfuroso. Este azúcar también llamado de consumo directo, es el que se cuece directamente a partir del jugo de caña concentrado.
<b>Azúcar crudo</b>	Azúcar que proviene directamente del proceso normal de formación de azúcar utilizando únicamente como producto químico la cal hidratada, como neutralizador de acidez y suciedad. Ésta azúcar se utiliza para su posterior trato en una refinería.
<b>Clarificador</b>	Equipo para separación por sedimentación o flotación de los sólidos suspendidos en soluciones de azúcar turbias.
<b>Coloide</b>	Sistema formado por partículas líquidas y sólidas, en el cual las partículas sólidas no son visibles directamente y no se separan por sedimentación.
<b>Color</b>	Medida de la disminución de la intensidad de un haz de luz que atraviesa una solución.

<b>Espuma</b>	Subproducto de la etapa de clarificación, compuesto de fosfatos de calcio e impurezas del licor.
<b>Floculación</b>	Conjunto de reacciones ocurridas por la atadura de partículas simples de impureza a lugares activos en la molécula del polímero floculante.
<b>Floculante</b>	Son polímeros sintéticos basados en la repetición de unidades de ácido acrílico y sus derivados. Se pueden obtener en un amplio rango de pesos moleculares, contienen grupos ionizados y a menudo se les conoce como polyelectrolitos. Se utilizan en el proceso de clarificación como ayuda de la floculación.
<b>Flóculo</b>	Es la unión de componentes de materia por medio de diferencia de cargas, que toma una densidad más elevada que el líquido que los contiene y tiende a sedimentarse hacia el fondo del recipiente.
<b>Fosflotación</b>	Tipo de clarificación que utiliza ácido fosfórico, cal y aire, en la cual ciertos no-azúcares son removidos por flotación.
<b>ICUMSA</b>	International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis.
<b>ISP</b>	<i>Indigenous Sugar Polysaccharide.</i>

<b>Licor</b>	Solución azucarada preparada a partir de azúcar blanco o crudo, que alimenta el proceso de refinación.
<b>Polímero</b>	Macromoléculas formadas por la unión de moléculas pequeñas llamadas monómeros.
<b>Polisacárido</b>	Biomoléculas formadas por la unión de una gran cantidad de monosacáridos.
<b>SPRI</b>	Sugar Processing Research Institute.
<b>Turbidez</b>	Es la falta de transparencia de un líquido debida a la presencia de partículas en suspensión. Cuantos más sólidos en suspensión haya en el líquido, más alta será su turbidez.



## RESUMEN

El presente trabajo de graduación tiene como objetivo principal la evaluación de la dosificación de floculante en la clarificación de licor para determinar la mayor eficiencia en términos de remoción de turbidez y color, que logren una reducción de los niveles de potencial floc en el azúcar refinado.

Se analizaron tres variaciones de dosificación de floculante, con tres corridas por variación. Las variables analizadas para la determinación de la calidad del licor previo y posterior a la clarificación se definieron en color y turbidez, en términos de su porcentaje de remoción dado por la eficiencia del equipo de clarificación; además, se analizó la calidad del azúcar refinado por medio de la variable de potencial floc.

Se estableció la relación de la dosis de floculante con cada uno de los parámetros analizados; potencial floc, remoción de turbidez y remoción de color. Por medio de una correlación de datos se establecieron las relaciones lineales entre los factores y se analizaron por medio de los coeficientes de correlación estadística. También se utilizó un análisis de varianza para determinar la dosificación óptima de floculante requerida en la clarificación de licor de azúcar de la refinería de Ingenio La Unión.

Se determinó una dosificación apropiada de floculante que permitió el menor valor de potencial floc con la mayor remoción de color y turbidez en el licor; la cual significó además un ahorro en el consumo diario de floculante en el ingenio azucarero.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Evaluar la dosificación óptima de floculante en la clarificación de licor en la refinación de azúcar, para determinar la mayor eficiencia en términos de remoción de turbidez y color, que logren una reducción del potencial floc en el azúcar refinado.

### **Específicos**

1. Determinar la relación entre la dosificación de floculante con los parámetros de remoción de color del licor clarificado.
2. Evaluar la relación entre la dosificación de floculante con los parámetros de remoción de turbidez de licor clarificado.
3. Analizar la relación entre la dosificación de floculante con el nivel de potencial floc del azúcar refinado.

## Hipótesis

Es posible reducir los niveles de potencial floc del azúcar refinado por medio del control de la dosificación de floculante en el proceso de clarificación de licor de una refinería.

Hipótesis nula:

No existe diferencia significativa entre la variación de dosificación de floculante ( $\alpha$ ) al licor alcalizado y el nivel de potencial floc del azúcar refinado.

$$\mu\alpha_1 = \mu\alpha_2 = \mu\alpha_3 = 0$$

Hipótesis alternativa:

Existe diferencia significativa entre la variación de dosificación de floculante ( $\alpha$ ) al licor alcalizado y el nivel de potencial floc del azúcar refinado.

$$\text{Al menos una } \mu\alpha_i \neq 0$$

## INTRODUCCIÓN

El azúcar es un producto de consumo masivo en Guatemala y en todo el mundo y existen varios tipos en el mercado, con características singulares que refieren a diferencias en la producción de cada tipo. En Guatemala el azúcar de mayor producción es la denominada azúcar crudo; sin embargo, este tipo de azúcar no es destinada para el consumo, sino a un reprocesamiento, que durante mucho tiempo se realizó principalmente en el extranjero.

Durante los últimos años ha tomado mayor auge en Guatemala la refinación del azúcar crudo para transformarla en un producto de consumo final; debido a que este tipo de azúcar genera mayores ganancias para los ingenios azucareros, pero requiere también mayor control de calidad en el procesamiento.

La característica principal del azúcar refinado es el bajo color que posee, el cual no debe superar 45 unidades en la escala ICUMSA; además, debe tener otras características de alta calidad, entre ellas ausencia de potencial floc, el cual genera partículas visibles blanquecinas en soluciones de azúcar refinado acidificadas, convirtiéndola en un producto no apto para las empresas de bebidas carbonatadas y reduciendo el mercado de venta del azúcar. Por esta razón la presente investigación pretende relacionar la dosificación de floculante en la etapa de clarificación de licor de azúcar con el nivel de potencial floc presente en el azúcar refinado, y determinar la dosis óptima de floculante en el proceso de refinación para Ingenio La Unión.



## 1. ANTECEDENTES

La clarificación del licor de azúcar es una parte esencial en el proceso de fabricación del azúcar refinado, debido a que afecta el rendimiento y la calidad del producto final; el proceso de clarificación en los jugos para la fabricación de azúcar crudo y blanco se ha estudiado intensivamente durante varios años, pero sobre el proceso de clarificación en el licor de refinería existen poca investigación publicada, para tratar de entender las bases teóricas y buscar su optimización. Alrededor del mundo, las normas de calidad del azúcar refinado se basan generalmente en las especificaciones de los productores de bebidas carbonatadas, siendo una de ellas el resultado negativo del análisis de potencial floc o floc ácido de bebidas.

Las principales investigaciones realizadas sobre el tema son:

- En 2013, se publicó la investigación titulada: *Determinación y causas del potencial floc en caña de azúcar*. Realizada por M. Ruiz, M. Sastre, M. Coronel, S. Zossi, O. Diez y M. Saska, en la estación experimental agroindustrial Obispo Colombres de Tucumán, Argentina. En la investigación se analizaron azúcares refinados procedentes de dos refinерías en Argentina con diferentes esquemas de clarificación (sulfitación y fosfoflotación), revelando una relativa alta incidencia de presencia de potencial floc, sin ninguna relación con su contenido de proteína; el azúcar proveniente del proceso de sulfitación contenía un promedio de 2,4 partes por millón de proteínas y nunca ha dado resultados de floc positivos, y el azúcar proveniente del proceso de fosfoflotación contenía un promedio de 1,0 partes por millón de proteínas

y frecuentemente ha dado resultados de floc positivos, a pesar de cumplir con todas las demás especificaciones de calidad del azúcar.

En orden de obtener información de los factores que tienen un importante rol en la formación del potencial floc, el método oficial para azúcar blanco fue modificado y aplicado a muestras de jugo de caña de azúcar clarificado preparado bajo diferentes condiciones. Sorpresivamente, a pesar del relativamente alto contenido de no azúcares en una mezcla de jugo clarificado y azúcar refinado sin potencial floc, cerca de las dos terceras partes de las muestras de jugo clarificado preparado en laboratorio dieron resultados negativos para potencial floc.

- En noviembre del 2012 se presentó la investigación titulada: Determinación de las condiciones apropiadas de preparación de un floculante como componente fundamental en el proceso de clarificación de jugo en Riopaila Castilla S. A., planta Riopaila. Elaborado por Laura Viviana Marín Ocampo. En la investigación se analizó la relación entre los métodos de preparación de floculante y los resultados obtenidos en la clarificación de jugo, basado en metodologías establecidas por el proveedor, el operario y modificando variables fisicoquímicas; y así se determinaron las condiciones apropiadas de preparación de floculante LIPESA 1521M. El estudio concluyó que al ingenio Riopaila le conviene modificar su dosis de floculante a 8 partes por millón para obtener menores turbiedades en el jugo claro y lodos más compactos; así como el mejor pH para preparar la solución de floculante fue 9,5; la temperatura adecuada obtenida fue 55 grados Celsius. También concluyó que el agua de preparación debe ser de baja dureza para garantizar la total acción del floculante y activación completa y libre de todos sus radicales aniónicos; además de las condiciones de preparación

de floculante, establecieron que es importante el tiempo de maduración (entre tres y cuatro horas) para que las cadenas de polímero se encuentren totalmente estables y activas. Finalmente, concluyó que las variables que se deben controlar para la preparación de floculante son iguales para todos los floculantes aniónicos utilizados en la clarificación de jugo de las industrias azucareras, pero los parámetros fisicoquímicos deben ser establecidos por cada industria tras hacer pruebas de laboratorio, para llegar a conclusiones numéricas a nivel industrial según sea la capacidad del proceso característico de la fábrica.

- En 2012 (Lenis Matute et al.) se realizó una investigación titulada: *Determinación de la concentración óptima de floculante a usar en la clarificación de jugos de caña en un central azucarero*, en la cual se evaluó el uso de diferentes concentraciones de floculante (1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 gramos por litro) sobre la calidad del jugo de caña clarificado, se realizaron análisis de pH, sólidos solubles, sacarosa aparente, turbidez, color, pureza y actividad floculante. El estudio concluye que la concentración de 2,0 gramos por litro de floculante permitió obtener los menores valores de color y turbidez de jugos clarificados; además, esta concentración presentó la mayor actividad floculante, lo que favoreció la remoción de materiales diferentes a la sacarosa. El uso de esa concentración reduciría el desperdicio de floculante y el 20 por ciento de los costos por uso del mismo.
- En 1977 se presentó la investigación titulada: *Beverage floc in cane sugar*, por Margaret Clarke et al., en la que sostiene lo dicho en 1970 por Cohen, Dionisio y Drescher sobre la interacción proteína-ión y lo dicho en 1974 por Roberts y Carpenter, sobre el polisacárido ISP, al cual le atribuye la carga negativa de la interacción. Además, establece que

existe una concentración crítica de ISP y proteínas en relación para formar el floc, ocurriendo una máxima floculación cuando el número de cargas positivas y negativas son cercanamente iguales. También analizó el contenido de polisacáridos totales en cada etapa del proceso de fosfatación, lo indicó que existe un riesgo en la utilización de agua dulce para la disolución de azúcar crudo (práctica que se realiza en Ingenio La Unión), debido a que los componentes removidos por medio de otros procesos son agregados nuevamente en el agua dulce, reciclando impurezas.

El estudio también describe métodos que se han evaluado a nivel laboratorio para la remoción completa de los factores causantes del floc, debido a que la etapa de clarificación en el proceso de refinación no es eficiente para la remoción de proteínas e ISP.

- En 1974 Roberts y Carpenter realizaron un estudio sobre el floc ácido de bebidas y lograron aislar el floc de azúcar refinado, determinaron que contenía almidón, lípidos, proteínas, compuestos de silicón, dextranas y un polisacárido proveniente de la pared celular de la caña, una arabinogalactosa, que se ha denominado ISP por sus siglas en inglés (*Indigenous Sugar Cane*).
- Cohen, Dionisio y Drescher en 1970 encontraron que el floc ácido de bebidas se generaba a partir de azúcares que contenían proteínas, y concluyeron que el floc se formaba por una interacción proteína-ión.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Descripción del proceso de producción de azúcar refinado**

En Ingenio La Unión, el proceso de producción de azúcar refinado se divide en tres etapas denominadas estaciones, siendo estas tratamiento de licor, recuperación de sacarosa y envasado.

#### **2.1.1. Estación de tratamiento de licor**

Es la etapa inicial de la refinación de azúcar, en la cual ingresa la materia prima de azúcar y agua al proceso, y se forma la primera mezcla que se denomina licor inicial; en esta estación se realizan operaciones para purificar la solución azucarada y se divide en las subestaciones de disolución, clarificación, decoloración y filtración.

##### **2.1.1.1. Disolución**

El objetivo en esta etapa es diluir el azúcar que ingresa de fábrica a la refinería en una solución de temperatura y Brix controlado. El primer procedimiento es el pesado del azúcar que ingresa por medio de una báscula romana, la cual descarga directamente a una tolva de alimentación. La tolva dosifica el azúcar por medio de un tornillo sin fin hacia el tanque disolutor 1, en el cual se realiza el proceso de disolución con agua procedente de cuatro efluentes: agua dulce, agua de condensados de tachos, agua de condensados de calentadores de coraza y tubos y agua de disolución de terrones.

Ingenio La Unión cuenta con un tanque de almacenamiento de licor mezclado conocido como: tanque pulmón, cuyo fin es amortiguar los cambios que se presentan en la cantidad de licor que entra al clarificador causado tanto por los retornos que llegan al tanque de mezcla como por oscilaciones en la tasa de entrada de azúcar crudo proveniente de fábrica; a partir de este tanque se alimentan las siguientes estaciones para asegurar un proceso continuo.

### **2.1.1.2. Clarificación**

La clarificación corresponde a la segunda etapa del tratamiento de licor, y en ella se pretende principalmente eliminar las impurezas que ocasionan turbidez en el licor del proceso, además, es agregado un decolorante especial para eliminar ciertos precursores de color en el licor, sin ser este el fin primordial.

En Ingenio La Unión se utiliza un proceso de clarificación denominado Fosflotación, de acuerdo con Smith (2000) en esta estación se generan flóculos de fosfatos de calcio a partir de la adición de ácido fosfórico y sacarato de cal que atrapan la materia suspendida, logrando la mayor precipitación y coagulación posible. Después, son separadas del licor por medio de una etapa de aireación, donde se adicionan microburbujas de aire que se van a unir a las partículas a ser separadas de medio, tornándolas menos densas que el líquido, y por tanto, propensas a flotación. El tamaño y la cantidad de burbujas de aire generadas son factores fundamentales para el buen desempeño del proceso. Burbujas muy grandes causan turbulencia en el medio que impiden su contacto con las partículas.

Rein (2012) menciona que la separación de la espuma generada a partir de la adición de burbujas se realiza en un equipo denominado flotador, en el

cual por diferencias de densidades la espuma que se encuentra en la superficie es arrastrada hacia afuera del equipo y enviada a un proceso de desendulzado para su final disposición.

#### **2.1.1.3. Decoloración**

En esta etapa del proceso se aprovecha la condición adsorbente del carbón activado para la remoción de color. Se utiliza carbón vegetal en polvo, dosificando en relación proporcional al flujo de licor.

#### **2.1.1.4. Filtración**

La filtración que se utiliza es a presión, con el objetivo de remover los sólidos suspendidos; además en esta etapa se elimina el carbón activado agregado en la etapa anterior, por lo que es necesario utilizar una ayuda filtrante, utilizando tierra diatomácea o carbón hueso, para lograr una tasa de filtración y duración de filtros requerida. Zapata (2008) indica que esta etapa es la encargada principalmente de la remoción de color del licor.

#### **2.1.2. Estación de recuperación de sacarosa**

Esta etapa del proceso es la encargada de manejar el licor proveniente de la etapa anterior y transformarlo en cristales de azúcar, controlando sus características fisicoquímicas durante las reacciones y manipulando correctamente las variables de operación y transporte que permitan mantener la calidad deseada del azúcar.

### **2.1.2.1. Cristalización**

Es en los tachos de vacío (equipos de gran superficie de transferencia calórica operados a presiones inferiores a la atmosférica) donde se efectúa la formación y desarrollo del cristal de sacarosa. El producto de esta etapa de proceso se denomina templa o masa cocida y consiste en un material de alto contenido de cristales envueltos en una gruesa capa de miel.

### **2.1.2.2. Centrifugación**

Por medio de máquinas que utilizan la fuerza centrífuga se separan por medio de una malla las mieles que envuelven el cristal. Las mieles separadas en esta operación son ricas en sacarosa y se retornan a cristalización.

### **2.1.2.3. Secado y enfriado**

Los cristales separados en las centrífugas se secan por contacto con aire caliente en tambores giratorios horizontales de gran tamaño denominados secadores de azúcar. En el tramo final del tambor el contacto del azúcar se realiza con aire frío para lograr que el azúcar tenga a la descarga de la secadora una temperatura similar a la temperatura ambiente, evitando así la formación de aglomerados o terrones.

### **2.1.3. Estación de envasado**

Finalmente el azúcar se almacena en un silo en forma de domo, para lograr la maduración precisa que requiere este tipo de azúcar; el cual también sirve de almacenamiento en lo que se requiere el tiempo de empaclado final. El

empacado final se realiza por medio de tolvas dosificadoras a presentaciones de 50 kilogramos y sacos jumbos.

## **2.2. Características generales del equipo**

Con el objeto de disminuir la turbidez en el licor de azúcar, en la estación de tratamiento de licor se dispone de un clarificador por fosflotación tipo Talofloc, que utiliza la combinación cal-calor y además un agente decolorante para incrementar el secuestro de partículas no azúcares.

### **2.2.1. Clarificadores**

Se llama clarificador al decantador continuo. Hugot (1986) refiere que un decantador continuo es un tanque al que se hace llegar de manera regular y continua el jugo por decantar y que es lo suficientemente grande para que la velocidad de escurrimiento y de circulación del licor sea de un valor tan bajo que no impida que la decantación se realice. El licor claro obtenido sale por la parte superior del clarificador de manera regular y continua tal como lo hacen las cachazas por la parte inferior.

Con este aparato se tienen todas las grandes ventajas del trabajo continuo: se eliminan las pérdidas de tiempo y capacidad que se originan en el llenado y el vaciado de los tanques; se elimina la mano de obra necesaria para la vigilancia y la ejecución de las operaciones de llenado, vaciado, separación y limpieza de los tanques.

### **2.2.2. Clarificador tipo Talofloc**

Existen diferentes tipos de clarificadores, variando según sus flujos y disposiciones; sin embargo, el de interés es el clarificador tipo Talofloc o denominado también fosflotación. Rein (2012) refiere que este tipo de clarificador el lodo se forma en la parte superior del equipo, por medio de la adición de micro burbujas que le dan la propiedad de disminuir su densidad y flotar; separando en la parte de arriba la espuma, y por la parte inferior el licor clarificado.

Tate & Lyle (2010) establece que el proceso general de este tipo de clarificador es el siguiente; el licor proveniente del tanque pulmón entra a un intercambiador de calor para aumentar su temperatura hasta 85 grados Celsius; posteriormente entra a una cámara de reacción en donde se adiciona sacarato de cal, ácido fosfórico y decolorante; controlando el pH del mismo para un objetivo de 6,8. Después pasa por una segunda cámara de reacción en donde se continúa la agitación y posteriormente ingresan a cámaras de aireación en donde se adicionan las micro burbujas; al salir de este punto se adiciona floculante especial para dirigirse finalmente a los flotadores y lograr la separación de los productos no deseados. El licor clarificado se extrae por la parte inferior.

### **2.3. Clarificación de licor**

De forma general, la clarificación de licor pretende proporcionar condiciones de temperatura, pH y concentración iónica adecuadas para maximizar la precipitación de las impurezas solubles, insolubles o coloidales, además de producir un jugo claro de alta calidad (valores mínimos turbiedad).

### **2.3.1. Efectos prácticos de la clarificación**

La clarificación en general es utilizada por los beneficios que representa para todo el proceso de tratamiento de soluciones azucaradas. Varios autores refieren sus efectos prácticos, Rein (2012) indica que desde un punto de vista práctico, con la clarificación de jugo se pretende principalmente:

- Obtener un pH de jugo claro adecuado para evitar inversión de la sacarosa o descomposición de las sustancias que puedan producir color.
- Formar flóculos que atrapen la materia suspendida, para que pueda ser precipitada en un rango satisfactorio.
- Lograr precipitaciones y coagulaciones tan completas como sean posibles.
- Que la velocidad de asentamiento sea rápida para minimizar tiempos de residencia en los clarificadores o pérdidas de sacarosa por inversión u otros mecanismos y obtener lodos lo más compactos posibles.

A pesar de que la clarificación de jugo es una operación unitaria, sus resultados afectarán el resto del proceso de producción de azúcar y finalmente su calidad como producto comercial. Las principales características del producto que tiene que entregar el clarificador es un jugo reducido en turbidez, para no afectar el correcto funcionamiento de los evaporadores y de los cristalizadores.

Por tal motivo, se debe tener especial cuidado en la estación de clarificación, Chen (1985) indica que con un buen desempeño tienen lugar las siguientes actividades de las etapas posteriores de la fábrica:

- Rendimiento del azúcar
- Facilita la cristalización de la sacarosa en la refinería
- Reduce pérdidas de azúcar en los procesos subsecuentes
- Reduce incrustaciones en los evaporadores y tachos
- Reduce alto contenido de cenizas
- Reduce costos adicionales en insumos químicos para la extracción del azúcar

### **2.3.2. Fisicoquímica de la clarificación**

El proceso principal de la clarificación se logra por medio de reacciones químicas correctas, las que involucran variables fisicoquímicas adaptadas a las condiciones de operación del jugo o licor que se esté tratando. Las etapas de la clarificación química o purificación química son:

- Calentamiento
- Adición de cal
- Adición de floculante

Brevemente, se adiciona cal o lechada de cal para neutralizar los ácidos orgánicos del licor, lo que induce a la formación de sales insolubles (mayoritariamente fosfato de calcio), y reduce las pérdidas por inversión de la sacarosa con el aumento del pH. Entre las funciones más relevantes del aumento de la temperatura durante la clarificación, se encuentran la destrucción enzimática y microbiológica de las sustancias del licor, la coagulación de ciertas macromoléculas orgánicas y logra incrementar no solo la velocidad sino también el rendimiento de la reacción entre la cal y los componentes del licor, haciendo las veces de catalizador.

Matute et al. (2012) indica que con la adición del floculante se aumenta notablemente la velocidad de la clarificación del licor, debido a que las partículas coaguladas forman masas o flóculos de mayor tamaño y peso molecular que son separados por sedimentación debido al efecto de la gravedad. Fisicoquímicamente, la clarificación de licor comprende dos procesos elementales: coagulación y floculación de las impurezas.

Como se ha mencionado en numerales anteriores, la coagulación de las impurezas comprende dos procesos en la industria azucarera: calentamiento y encalado. La floculación es alcanzada tras la adición de una sustancia polimérica llamada floculante, cuya función más práctica es envolver los coágulos de impurezas formados para que estos obtengan mayor peso molecular y como consecuencia precipiten al fondo de los clarificadores en un tiempo considerablemente corto que sea benéfico para la fábrica. Estos dos procesos fisicoquímicos son más complejos de lo que parecen. Por tal motivo se estudiarán en numerales diferentes, mencionando los aspectos más relevantes de cada uno.

### **2.3.3. Relación entre los coloides y la carga iónica del licor mezclado**

El término coloide se emplea para describir las partículas que tienen un tamaño inferior a 1 micrómetro y cuya dispersión en un fluido es relativamente extensa. La separación de este tipo de partículas presenta más dificultades que las partículas de mayor tamaño; por este motivo, se han desarrollado diferentes técnicas que son relativamente sencillas y en las que se involucra la aglomeración de las mismas.

Matute et al. (2012) establece que las dispersiones coloidales se pueden desestabilizar mediante la alteración de la superficie de los coloides en el sistema sólido-líquido. Esto es posible lograrlo al ajustar condiciones físicas que permitan aumentar el tamaño y el área superficial de las partículas o mediante la adición de electrolitos y agentes activadores en el sistema. Tal es el caso de los procesos de coagulación y floculación.

En el caso del licor de azúcar, la presencia de los coloides provocará efectos desfavorables en la clarificación de jugo, debido a que los coloides pueden evitar la unión de las partículas y por ende interferir en su precipitación.

## **2.4. Agentes químicos utilizados durante clarificación**

Para llevar a cabo las reacciones de clarificación es necesario agregar una serie de productos químicos, con características especiales que propicien la interacción de las moléculas generadas con las partículas no azúcares que se desean eliminar. En un proceso de fosflotación de licor se añade sacarato de cal, ácido fosfórico y floculante.

### **2.4.1. Sacarato de cal**

Chou (2000) indica que la cal se adiciona al licor disuelto para cumplir dos objetivos fundamentales: alcalinizar el licor y coagular las impurezas del mismo mediante reacciones químicas con las sustancias contenidas en él. El jugo que se extrae de la caña contiene un pH ácido aproximado al valor de 4. Se ha mencionado que en las industrias azucareras conviene elevar el pH de las soluciones que contienen azúcar debido a que la sacarosa se hidroliza en sus monómeros glucosa y fructosa cuando se encuentra en medios ácidos, produciéndose la denominada inversión ácida.

Rein (2012) refiere que la cal se puede adicionar al jugo de varias formas, pero generalmente las industrias prefieren adicionarla en una suspensión acuosa debido a que por este método es posible conocer la densidad de la misma y permite cuantificar la cantidad de calcio que sea necesaria adicionar según un volumen determinado de jugo. Otra forma de adicionar la cal es por medio de sacarato de cal, que es una solución de agua, licor y lechada de cal.

Honig (1982) refiere que el pH al que se debe llevar el jugo para evitar la inversión de la sacarosa y para coagular de forma eficiente las impurezas depende de muchos factores, como la variedad y madurez de la caña que se emplee, la cantidad de materia extraña que traiga consigo y la cantidad de fosfatos que tenga, entre otras condiciones propias de la fábrica. Generalmente, conviene adicionar cal de tal forma que la reacción final tenga un pH cercano a 7, es decir que se produzca un jugo claro con valores de pH aproximados al valor de 7.

#### **2.4.2. Ácido fosfórico**

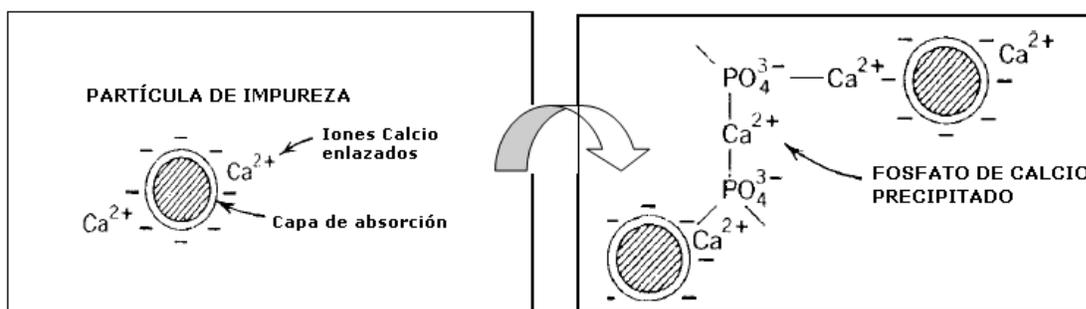
Van Der Poel (1999) establece que su importancia se atribuye a que son los fosfatos (presentes en la forma  $P_2O_5$ ) los que reaccionan en primera medida con los iones Calcio que se adicionan en el proceso de encalado y es el fosfato de calcio precipitado el que se obtiene en mayor proporción, por lo tanto, constituye casi toda la eliminación de las impurezas. De hecho, Honig (1982) propone que son las reacciones de los fosfatos las que constituyen el eje central alrededor del cual giran todas las teorías sobre el mecanismo de la clarificación de jugo y licor.

De acuerdo a Honig (1982) el mecanismo físico-químico de la clarificación de licor depende de la precipitación del fosfato de calcio que se obtiene de

forma primaria en el proceso de coagulación y que finaliza completamente con el proceso de floculación, debido a que este precipitado contiene características únicas que permiten clarificar el licor.

Según varios autores, la cantidad de fosfatos adecuada que debe tener un licor para que sea clarificado de manera eficiente, es aproximadamente entre 300 y 600 partes por millón.

Figura 1. **Formación del precipitado de fosfato de calcio**



Fuente: CHEN. *Manual de azúcar de caña*. p. 850.

### 2.4.3. Floculante

Los floculantes, también llamados ayudantes de coagulación, de floculación o de filtración son sustancias poliméricas de elevado peso molecular ( $1 \times 10^7$  gramo por mol), solubles en agua, que se clasifican por su naturaleza (mineral u orgánica), su origen (natural o sintético) o según su carga iónica (no iónico, catiónico, aniónico) y se encuentran en presentaciones líquidas o sólidas.

De acuerdo con Honig (1982) para la clarificación de jugo las industrias azucareras utilizan floculantes sintéticos aniónicos sólidos, los cuales poseen

una gran afinidad con las superficies sólidas. A partir de 1960, los estudios están encaminados a la resolución de problemas tecnológicos relacionados con la aceleración y aumento de eficacia del polímero en procesos de separación de sistemas sólido-líquido.

#### **2.4.3.1. Características de los floculantes aniónicos**

Van Der Poel refiere que los componentes principales de este grupo de polímeros son las poliacrilamidas (PAM), las cuales desde los últimos cincuenta años se han convertido en la unidad base sobre la que se fundamenta toda la química de los floculantes sintéticos aniónicos, produciendo de esta forma más del 95 por ciento de los floculantes existentes a nivel mundial y su principal uso es la depuración de aguas (tratamientos físico-químicos).

Para la síntesis de los floculantes aniónicos se emplean monómeros de la acrilamida los cuales forman una cadena larga de gran peso molecular al repetir su estructura (polimerización). Sin embargo, para que obtengan cargas negativas, varios radicales amida son sustituidos parcialmente por radicales aniónicos, generalmente por enlaces COOH o COONa de forma repetitiva hasta constituir el polímero deseado.

#### **2.4.3.2. Fisicoquímica de la formación de los flóculos**

Es importante recordar que durante la floculación existen una serie de compuestos con carga iónica. Se encuentra, por ejemplo el fosfato tricálcico precipitado anteriormente en el proceso de coagulación, el cual posee una carga positiva por la presencia del ion calcio; y se encuentra ahora una solución que contiene enlaces negativos en su estructura: el floculante.

Varios investigadores han atribuido la formación del flóculo al contacto electrostático entre estas dos sustancias. Se dice que el ion  $Ca_{2+}$  es el encargado de realizar la unión entre la impureza coagulada y el floculante. Matic (1969) establece que en solución, y en una sola molécula de floculante, los grupos acrilato se disocian y sus cargas negativas se activan en la cadena del polímero, esto quiere decir que varios coágulos se pueden unir a una molécula de polímero hasta constituir una extensa red denominada flóculo.

Doherty (1999) establece que dicho de otra forma, el poli electrolito (floculante) con cargas negativas a lo largo de su cadena, se disocia y por un fenómeno electrostático de adsorción se adhiere a la superficie sólida (positiva) de la impureza, generando un cambio físico diferente al inicial. Dependiendo de esta carga, el sistema coloidal se mantendrá disperso en el medio acuoso o se verá favorecido el acercamiento entre partículas para producir moléculas de mayor tamaño.

Aunque los polímeros tienen cadenas extensas y estables, el flóculo formado es susceptible a perturbaciones externas como una agitación turbulenta, por lo tanto durante este procedimiento de floculación conviene que la agitación sea moderada para evitar que las partículas colapsen y como consecuencia se obtenga impurezas con el jugo (turbiedad alta) que supuestamente es claro.

## **2.5. Floc ácido de bebidas**

Según Clarke et al. (1977) el floc ácido de bebidas, ABF por sus siglas en inglés, se forma en soluciones de azúcar de aproximadamente 15 grados Brix, a un pH entre 3 y 4 (menor a 5), generalmente de 1 a 10 días de ser almacenado.

Es visible incluso un día en almacenamiento o, en unas muestras el efecto surge hasta incluso transcurridos 30 días.

Este fenómeno también se presenta en la mayoría de soluciones de azúcar altamente concentradas, pero a veces no es visible a la vista, probablemente, y fue postulado por McGinnis (1944), que el índice refractario del floc es similar al que presenta una solución concentrada de azúcar. Algunos autores refieren que este floc desaparece al aumentar la concentración de la solución.

Si la bebida o la solución de prueba que presenta ABF es agitada, el floc desaparecerá para convertirse en turbiedad en suspensión, únicamente para reformarse de nuevo al estar en almacenamiento días después.

### **2.5.1. Antecedentes**

No ha habido consistencia en los análisis hechos a muestras de ABF, la composición de diferentes muestras varían ampliamente. Stansbury y Hoffpauir (1959) estudiaron 5 diferentes tipos de formación de floc en azúcar refinado, encontraron que el floc aislado contenía carbón decolorante, sílica, almidón, lípidos (ceras) y proteínas. Ellos relacionaron la apariencia de floc con la presencia de carbón decolorante.

Cohen, Dionisio y Drescher (1970) estudiaron el ABF de azúcares que contenían proteínas y concluyeron que el floc se formaba por una interacción proteína-ión. Determinaron que la adición de proteína albúmina causaba la formación de floc en azúcares de floc-negativo. Ellos observaron que todos los azúcares ABF-positivo dieron positivo a floc alcohólico, pero no viceversa.

Liuzzo y Hsu (1973) estudiaron el floc alcohólico de caña de azúcar y decidieron que la causa era un polisacárido relacionado con amilosa, que forman complejos con otros compuestos para producir agregados de floc.

Roberts y Carpenter (1974), iniciaron el estudio del ABF y encontraron que el floc aislado de azúcar de caña refinada contenía almidón, lípidos o ceras, proteínas, compuestos de silicón, dextranas y polisacáridos que probablemente venían de la planta de caña de azúcar. Ese polisacárido fue aislado del floc ácido que se había formado en la solución de azúcar; fue limpiado de azúcares y sujeto a una hidrólisis ácido. Los productos de la hidrólisis fueron analizados por una cromatografía líquido-gas. El polisacárido pareciera ser una arabinogalactosa; un polímero de arabinosa y galactosa; el cual es probablemente un polisacárido de la pared celular estructural de la planta de caña; el cual ha sido nombrado como ISP por sus siglas en inglés (*Indigenous Sugar cane Polysaccharide*).

### **2.5.2. Tipos de floc**

Estos precipitados, usualmente nubosos y blanquecinos, ocasionalmente en trazas, son referidas por el término floc. Existen diversos tipos de floc, que son confundidos unos de otros.

Debido a las causas de generación de floc es necesario realizar una diferenciación y especificar su naturaleza y origen. La tabla I enlista y describe la mayor cantidad de Flocs conocidos, presentador por Clarke (1977).

Tabla I. **Tipos de floc según su origen**

Origen	Características
Microbiológico Mohos Levaduras Bacterias	Nuboso Glóbulos gelatinosos Ninguno de estos desaparecerá al agitarse; ninguno se formará si se agrega bactericida (formaldehído o benzoato)
Almidón	Nubosidad Turbia
Dextrana	Glóbulos gelatinosos o trazas. Nuboso si se seca tiene la capacidad de re disolverse.
Floc de alcohol	Aparece en la adición de Etanol.
Silicato (orgánico)	Nubosidad o con precipitado flotante, usualmente llamado "Floc de agua"
Floc de remolacha	Precipitado de floculante algodonoso. Se localiza en la superficie, en el fondo de la solución o flotando. Fomentado por la saponina procedente de la planta de remolacha.
Floc ácido de bebidas	Bolas algodonosas o trazas granulares. Únicamente aparecen en pH ácido. Se desintegran al agitarse y se reforman después de un tiempo de reposo.

Fuente: *Beverage floc and cane sugar* MARGARET A. CLARKE.

Margaret A. Clarke et al. Indica que:

“La turbidez o precipitados en bebidas es mal visto porque está asociada con una descomposición y ésta debe ser descartada. Existen diversos orígenes de los precipitados, aunque varios de estos pueden ser debido a otros ingredientes a parte del azúcar, todos los embotelladores refieren este problema al azúcar. Por ende la ausencia de esos precipitados nubosos son de gran importancia para los embotelladores, productores de azúcar y distribuidores”.

### **2.5.3. Importancia del ABF**

Caldas (2013) refiere que mientras el ABF no es dañino, es un defecto visible y los consumidores rechazan el producto carbonatado por razones estéticas. Dado a que en muchas partes del mundo los productores de bebidas carbonatadas y refrescos son los principales consumidores de azúcar refinada (producida a partir de caña) y el azúcar está implicada en la formación de ABF, el tema de la calidad de los ingredientes y el ABF es gran preocupación para ambos productores de azúcar y bebidas.

Clarke (1977) indica que a finales de 1970, 25 por ciento de la producción de azúcar en Estados Unidos fue consumida por los productores de bebidas, y consecuentemente, el ABF es de gran importancia para la industria estadounidense. Durante este período de tiempo las investigaciones las condujo el Instituto de Investigación del Procesamiento de Azúcar (SPRI por sus siglas en inglés) acerca de la naturaleza y causas del ABF en bebidas carbonatadas manufacturadas con azúcar de caña. Clarke, Godshall, Roberts y Carpenter son los autores de la mayoría de literatura de este tema.

Ruiz, et al. (2013) menciona que a comienzos de 1980, el consumo de jarabe de maíz con alto contenido de fructosa (HFCS) en Estados Unidos aumentó de 0,8 hasta 3 millones de toneladas, con un decremento del consumo de sacarosa hasta menos de 300 000 toneladas (5 por ciento de la producción). En noviembre de 1984, la gran mayoría de compañías estadounidenses de bebidas anunciaron que usarían el 100 por ciento de productos de HFCS. El ABF ya no fue de importancia en la industria azucarera estadounidense y la investigación en ese tema, previamente considerada esencial, efectivamente cesó.

El azúcar de caña y remolacha reportan formación de ABF. Presentan diversas similitudes y diferencias en su constitución. Donde el azúcar está implicado en la formación de ABF, este es principalmente debido a la precipitación de impurezas en forma de polisacárido en el azúcar que son moderadamente solubles en bebidas acidificadas. Por lo tanto, la naturaleza del polisacárido es de suma importancia.

#### **2.5.4. Formación del floc**

De acuerdo con Drew, et al. (1980) la etapa inicial de formación de floc es el desarrollo de carga positiva en la proteína de la caña a pH ácido. Esta carga positiva en la proteína es luego atraída hacia el polisacárido cargado negativamente (ISP). Estas dos especies coloidales forman agregados, los cuales se unen para formar partículas de floc. Otros coloides o especies solubilizadas presentes son absorbidas en los agregados y se incluyen en el floc. Así, el almidón, compuestos de sílica, dextranas y otros. Pueden incrementar la cantidad de floc y pueden determinar su apariencia. Un azúcar con alto almidón puede formar un floc con apariencia de hebras de algodón y un azúcar con altos compuestos de sílica puede formar un floc granular.

#### **2.5.5. Factores de formación de floc**

Existe una concentración crítica de la proteína y del ISP individualmente y en relación una con otra. La máxima floculación ocurre cuando el número de cargas positivas y negativas son casi iguales. Un exceso de una carga puede formar una capa alrededor de una carga opuesta y así prevenir la formación de agregados. Drew (1980) menciona que muchos azúcares aunque contienen proteína e ISP no forman floc ácido por la anterior razón. En los azúcares de muy alta pureza, es posible tener una concentración muy baja de cualquiera de

los dos, la proteína o el ISP, que no permite un suficiente número de colisiones y formación de agregados.

Se han desarrollado investigaciones (Clarke, 1996, Godshall, 1986), sobre el comportamiento de estos dos compuestos en los procesos de refinación las cuales han demostrado que entre el 80 y 90 por ciento de toda la proteína y los componentes polisacáridos son removidos en la refinación, particularmente en las etapas de cristalización, filtración en carbón de hueso y afinación.

La planta embotelladora en sí, también puede minimizar la formación de floc ácido, usando agua que cumpla con las normas establecidas en las especificaciones de calidad de agua, ya que según estadísticas del SPRI de Nueva Orleans en la década de los 90, en la mayoría de los casos (90 por ciento o más) de formación de floc ácido, el problema fue causado por el agua usada para fabricar las bebidas.

#### **2.5.6. Técnicas de identificación**

Muchos métodos de identificación de potencial floc en el azúcar refinado han sido referidos, pero el más utilizado es el denominado test Coca-Cola de 10 días. Este método fue aceptado por ICUMSA (Comisión Internacional de Métodos Unificados para Análisis de Azúcar, por sus siglas en inglés), forma parte de su libro de métodos bajo el nombre de: Test ICUMSA de 10 días de floculación en bebidas gaseosas para azúcar blanco; con el código GS2/3-40.

La metodología experimental es simple, a su vez brinda resultados confiables. La solución de azúcar es acidificada hasta un pH de 1,5 añadiendo ácido fosfórico (este simula las condiciones de una bebida carbonatada). Se

deja reposar a temperatura ambiente durante 10 días. Se examina visualmente la presencia de cualquier floculo que haya podido formarse.

El efecto floc es una preocupación tanto para los productores de bebidas como los azucareros. Debido a que el apareamiento de estos agentes coloidales afecta la apariencia de la bebida y generan desconfianza a los consumidores. Desde la década de 1970 se han desarrollado distintas metodologías de análisis.

### **2.5.7. La perspectiva de los productores de bebidas**

Moberly (1931) indica que la aparición de floc es un problema de calidad de manejo complicado. No existe análisis rápido, sencillo y confiable para analizar el ABF en el azúcar. Cuando el ABF se manifiesta en los refrescos y bebidas carbonatadas, el producto suele estar en los puntos de venta.

Mientras existe una fuerte conexión entre el ABF y la calidad del azúcar, ABF es un complejo que contiene material del azúcar, agua y muy probablemente ingredientes del jarabe saborizado. Es más el mecanismo de formación del ABF no está aún bien establecido.

En cierto punto la calidad del agua juega un rol en la formación de ABF, sin embargo, garantías de la no formación de floc son establecidas en los contratos por parte de la industria de las bebidas. Cuando el ABF aparece en las bebidas, el productor de azúcar es rápidamente culpado y es obligado a pagar una compensación.

### **2.5.8. Floc en bebidas preparadas con azúcar de caña**

Stansbury y Hoffpauir (1959) aislaron el ABF de una bebida preparada con azúcar de caña. Los análisis al floc revelaron la presencia de almidón, lípidos (ceras), partículas de carbón activado, proteínas y cenizas (principalmente sílice). Ellos concluyeron que la formación de ABF era iniciada por la adsorción de solutos en las partículas de carbón activado, pero luego Cohen, Dionisio y Drescher (1970) comprobó que este no era el caso.

Cohen, Dionisio y Drescher (1970) estudiaron la composición de la impureza de azúcares crudos y refinados e investigó la naturaleza del ABF en el azúcar de caña. Fue encontrado que el ABF contenía proteínas, material inorgánico y polisacáridos. Ninguna correlación fue encontrada entre el floc y la concentración de materia inorgánica o de polisacáridos. Ellos también reportaron que todos los azúcares que presentan formación de ABF también desarrollan una neblina en adición de etanol, pero no todos los azúcares que desarrollan neblina alcohólica se desarrolla el ABF.

### 3. DISEÑO METODOLÓGICO

#### 3.1. Variables

Las variables definidas en la investigación están relacionadas a la operación en la estación de clarificación, siendo estas la preparación y la adición de floculante. Se consideraron y clasificaron las variables de control, independientes y de respuesta.

- Variables de control

Tabla II. Descripción de las variables de control en la etapa de preparación del floculante en la estación de clarificación

No.	Variable	Dimensional	Factor Potencial de diseño		Factores Perturbadores	
			Constante	Variable	Controlable	Ruido
1	Nivel del tanque a preparar	%	X		X	
2	Temperatura del agua	°C	X		X	
3	pH del agua	adimensional	X		X	
4	Conductividad del agua	μS	X			X
5	Masa de floculante	kg	X		X	
6	Tiempo de aireación	min	X		X	
7	Tiempo de maduración	min	X		X	
8	Temperatura de floculante	°C	X		X	

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Descripción de las variables de control en la etapa de adición de floculante en la estación de clarificación**

No.	Variable	Dimensional	Factor Potencial de diseño		Factores Perturbadores	
			Constante	Variable	Controlable	Ruido
1	Flujo de licor	TSSH	X			
2	Temperatura de licor	°C	X		X	
5	Dosificación de floculante	ppm		X	X	

Fuente: elaboración propia.

- Variables independientes

Tabla IV. **Variables independientes en la etapa de adición de floculante de la estación de clarificación**

No.	Variable	Dimensional	Descripción
1	Flujo de licor	TSSH	Es la cantidad de toneladas de sólidos solubles que ingresan a clarificación cada hora, según capacidad.
2	Dosificación de floculante	ppm	Es la cantidad de floculante que se agrega al licor. Esta variable está automatizada y relacionada con el flujo y concentración del floculante.

Fuente: elaboración propia.

- Variables respuesta (dependientes)

Tabla V. **Variables respuesta del trabajo de investigación**

No.	Variable	Dimensionales
1	Turbidez (licor)	UI
2	Color (licor)	UI
3	Potencial floc (azúcar refinado)	adimensional
4	Porcentaje de remoción de turbidez	%

Fuente: elaboración propia.

- Delimitación de campo de estudio
  - Campo: ingeniería química.
  - Área: ingeniería del azúcar.
  - Línea: refinación de azúcar.
  - Proceso: evaluación de la dosificación de floculante en la clarificación de licor y su incidencia en la reducción de potencial floc en el azúcar refinado.
  - Ubicación: la evaluación se realizó en Ingenio La Unión, Finca Belén, kilómetro 101,5 de Carretera a Cerro Colorado, Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla. Las muestras se obtuvieron de la refinería de azúcar del ingenio y los análisis fisicoquímicos se realizaron en el laboratorio de calidad del mismo.
  - Clima: de 25 a 30 grados Celsius aproximadamente en Santa Lucía Cotzumalguapa y una presión atmosférica de 760 milímetros de mercurio.

- Recursos humanos disponibles
  - Investigadora: Br. Emilce Concepción López Aldana
  - Asesor: Ing. Qco. Carlos Roberto Morales Cuellar
  - Co-asesor: Ing. Juan Pedro Quiñónez Fernández
  
- Recursos materiales disponibles
  - Equipo
    - Potenciómetro
    - Refractómetro
    - Espectrofotómetro
    - Balanza analítica de resolución 0,1 gramo
    - Bomba de vacío
    - Plancha con agitador magnético
    - Baño ultrasónico
    - Clarificador tipo Talofloc
    - Tanque de preparación de floculante
  
  - Cristalería y material
    - Beacker de 50 y 250 mL
    - Celda espectrofotométricas de 10 y 5 centímetros
    - Recipiente de vidrio de 1 litro
    - Papel filtro de 0.45 micrones
    - Embudo
    - Kitasato de 250 mililitros
    - Earlenmeyer de 250 mililitros

- Termómetro
- Reactivos y productos
  - Floculante aniónico
  - Licor clarificado
  - Azúcar refinado
  - Agua destilada
  - Ácido fosfórico grado analítico

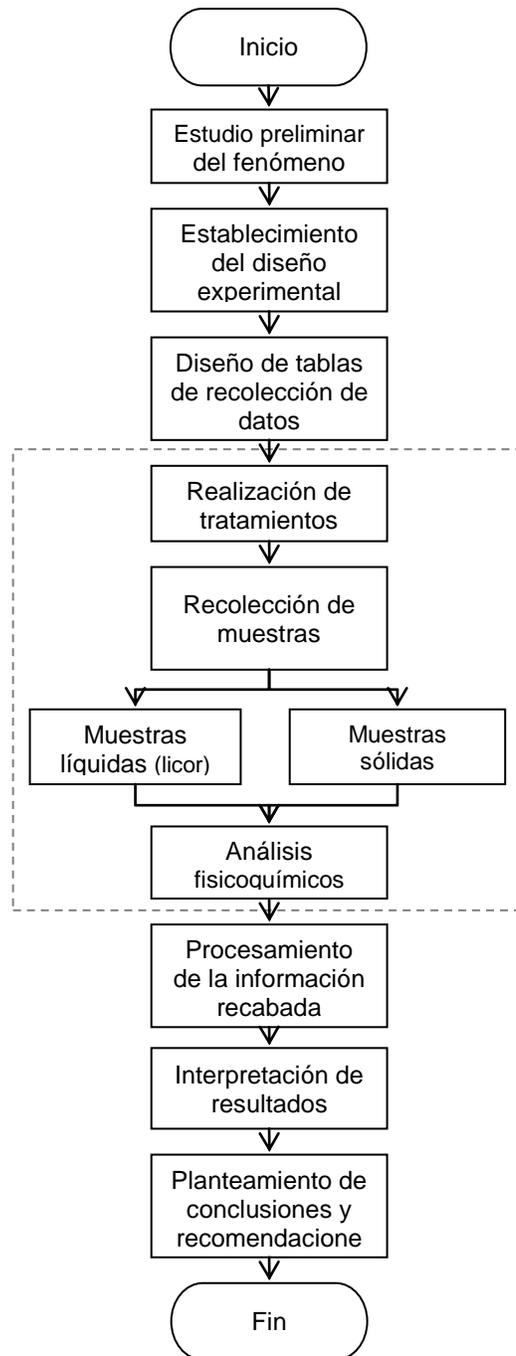
### **3.2. Técnica cuantitativa**

La investigación se desarrolló utilizando técnicas cuantitativas debido a la naturaleza del fenómeno de interés, dado que los parámetros de interés son el porcentaje de remoción de turbidez, remoción de color y potencial foc. Estos parámetros son medibles por las metodologías ICUMSA.

#### **3.2.1. Diseño preliminar**

Para cumplir con los objetivos de la presente investigación, se utilizó la técnica cuantitativa, con la cual se determinó el nivel de potencial foc en azúcar refinado al variar la dosificación de floculante, además se determinó el porcentaje de remoción de color y turbidez del clarificador a cada variación de condición para asegurar que el proceso cumpla su objetivo de reducción.

Figura 2. Diagrama de flujo de la técnica cuantitativa



Fuente: elaboración propia.

- Técnicas cuantitativas de análisis

Para el análisis de control de calidad del licor clarificado y el azúcar refinado final se utilizaron los métodos establecidos por ICUMSA.

Tabla VI. **Técnicas cuantitativas de análisis de licor clarificado y azúcar refinado, a partir de metodologías ICUMSA**

Parámetro	Método	Descripción
Turbidez del licor	GS7-21 (2007)	Determina la turbidez presente en el licor, debido a todos los no azúcares que se desean eliminar con el proceso. La técnica se emplea para el licor previo y posterior a clarificación.
Color del licor	GS7-21 (2007)	Determina el color presente en el licor. La técnica se emplea para el licor previo y posterior a clarificación
Potencial Floc en azúcar	GS2/3-40 (2007)	Determina visualmente la presencia de cualquier flóculo que pueda formarse tras la acidificación de una solución de azúcar.

Fuente: elaboración propia.

### 3.2.2. Análisis de medición de color

Para analizar la calidad del licor producido y el efecto hecho por la variación de las condiciones de adición de floculante, se midió el color como se indica a continuación.

- Pesar  $50,0 \pm 0,1$  gramos de licor y agregarles  $50,0 \pm 0,1$  gramos de agua en un *beacker*.
- Colocar la solución en una plancha de agitación magnética hasta homogeneizar la solución.

- Filtrar entre 60 a 80 mililitros de la solución con un filtro de 0,45 micrones; usando la bomba de vacío.
- Colocar la solución en un baño ultrasónico por aproximadamente 3 minutos.
- Medir el brix de la solución filtrada en un refractómetro y anotar.
- Encender el espectrofotómetro y seleccionar el modo de absorbancia, cambiar la longitud de onda a 420 nanómetros. Y poner a cero el espectrofotómetro con agua filtrada desaireada.
- Lavar la celda con la solución y descartar, llenar la celda, leer en el espectrofotómetro y anotar. Anotar el ancho de la celda (centímetro).
- Con el brix de la solución, buscar en la tabla de relación de densidad y concentración de azúcar de anexos, el valor de densidad de la solución en dimensionales gramos por centímetro cúbico.
- El resultado del análisis se determina así:

$$\text{Color ICUMSA} = (\text{absorbancia}) * (100\ 000) / ((\text{brix}) * (\text{ancho de celda}) * (\text{densidad}))$$

### **3.2.2.1. Remoción de color**

La remoción de color del licor es uno de los parámetros de control en la estación de clarificación. Se obtiene a partir de los valores de color del licor previo (alcalizado) y posterior (clarificado) a clarificación.

$$\% \text{Remoción Color} = (\text{Color}_{\text{licor alcalizado}} - \text{Color}_{\text{licor clarificado}}) / (\text{Color}_{\text{licor alcalizado}}) * 100$$

### 3.2.3. Análisis de medición de turbidez

Para analizar la calidad del licor producido y el efecto hecho por la variación de las condiciones de adición de floculante, se midió la turbidez como se indica a continuación.

- Pesar  $50,0 \pm 0,1$  gramos de licor y agregarles  $50,0 \pm 0,1$  gramos de agua en un *beacker*.
- Colocar la solución en una plancha de agitación magnética hasta homogeneizar la solución.
- Colocar el *beacker* con la solución en el baño ultrasónico por aproximadamente 3 minutos.
- Medir el brix de la solución en un refractómetro y anotar como brix 1.
- Encender el espectrofotómetro y seleccionar el modo de absorbancia, cambiar la longitud de onda a 420 nanómetros. Y poner a cero el espectrofotómetro con agua filtrada desaireada.
- Lavar la celda con la solución y descartar, llenar la celda, leer en el espectrofotómetro y anotar como absorbancia 1.
- Filtrar entre 60 a 80 mililitros de la solución con un filtro de 0,45 micrones; usando la bomba de vacío.
- Colocar la solución en un baño ultrasónico por aproximadamente 3 minutos.
- Medir el brix de la solución filtrada en un refractómetro y anotar como brix 2.
- Lavar la celda con la solución y descartar, llenar nuevamente la celda, leer en el espectrofotómetro y anotar como absorbancia 2.

El resultado del análisis se determina así:

$$\text{Color 1 ICUMSA}_{\text{muestra sin filtrar}} = (\text{absorbancia1}) * (100\ 000) / ((\text{brix1}) * (\text{ancho de celda}) * (\text{densidad}))$$

$$\text{Color ICUMSA}_{\text{muestra filtrada}} = (\text{absorbancia2}) * (100\ 000) / ((\text{brix2}) * (\text{ancho de celda}) * (\text{densidad}))$$

$$\text{Turbidez} = \text{Color 1 ICUMSA}_{\text{muestra sin filtrar}} - \text{Color ICUMSA}_{\text{muestra filtrada}}$$

### **3.2.3.1. Remoción de turbidez**

La remoción de turbidez del licor es uno de los parámetros más importantes de control en la estación de clarificación, porque es el indicador de eficiencia del proceso. Se obtiene a partir de los valores de turbidez del licor alcalizado y el licor clarificado.

$$\% \text{Remoción Turbidez} = (\text{Turbidez}_{\text{licor alcalizado}} - \text{Turbidez}_{\text{licor clarificado}}) / (\text{Turbidez}_{\text{licor alcalizado}}) * 100$$

### **3.2.4. Análisis de potencial floc**

Se realizó el análisis de potencial floc al azúcar refinado producido a partir de las variaciones del proceso establecidas, por medio de la siguiente metodología:

- Disolver 600 gramos de azúcar en 500 mililitros de agua, usando un potenciómetro, agregar ácido fosfórico hasta alcanzar un pH de 1,5 (esto se logra con aproximadamente 2,7 mililitros de ácido.).
- Colocar la solución de azúcar en un recipiente de vidrio, con capacidad de 1 litro y guardar a temperatura ambiente.

- Examinar la apariencia de la solución con una fuente de luz a los 3, 7 y 10 días. Tener cuidado de no agitar el recipiente debido a que los flóculos formados son muy frágiles.
- Colocar el recipiente en frente de una fuente de luz, preferiblemente en un cuarto oscuro. Examinar la parte del fondo, medio y alto del recipiente. El floculo puede estar flotando, suspendido o precipitado, las tres condiciones se pueden observar en una muestra simple.

El resultado se obtendrá de la siguiente forma, a partir de la observación realizada al décimo día.

Tabla VII. **Resultados obtenidos en análisis de potencial floc**

<b>Resultado (Nivel de floc)</b>	<b>Observación de la muestra</b>
0 negativo	Completa ausencia de partículas visibles.
0 turbio	Nublado pero no contiene partículas visibles.
1	Punto de alfiler: partículas muy pequeñas que se vuelven visibles con el uso de una fuente de luz.
2	Claro: varias partículas reunidas en formas pequeñas, aproximadamente 0.8 mm.
3	Medio: partículas como plumas, aproximadamente 1.5 mm.
4	Fuerte: aglomerados de partículas coloidales formando una gran partícula, visibles sin la fuente de luz.

Fuente: ICUMSA, Libro de métodos 2007.

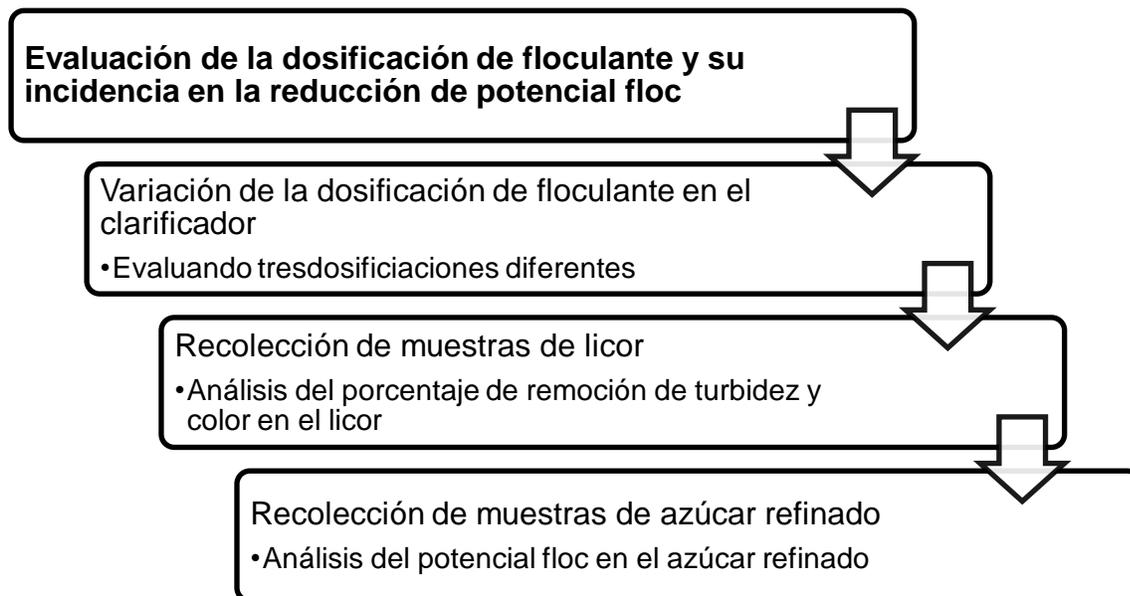
Una muestra con 0 = negativo 0 / 0 = Turbio: puede ser considerada como que pasa la prueba y está libre de flóculos.

### 3.3. Recolección y ordenamiento de la información

Para cumplir con los objetivos del presente trabajo de graduación, se utilizó un clarificador tipo Talofloc para realizar el proceso de clarificación del licor y se determinó el porcentaje de remoción de turbidez y color en el licor clarificado y el parámetro de calidad de potencial floc del azúcar refinado final; utilizando tres variaciones de dosificación de floculante.

La evaluación de las condiciones de adición del floculante se realizó individualmente, de tal forma de obtener resultados independientes de cada una; pero bajo el mismo procedimiento de análisis, como se establece en la siguiente figura.

Figura 3. **Proceso escalonado para la evaluación de la dosificación de floculante y su incidencia en la reducción de potencial floc**

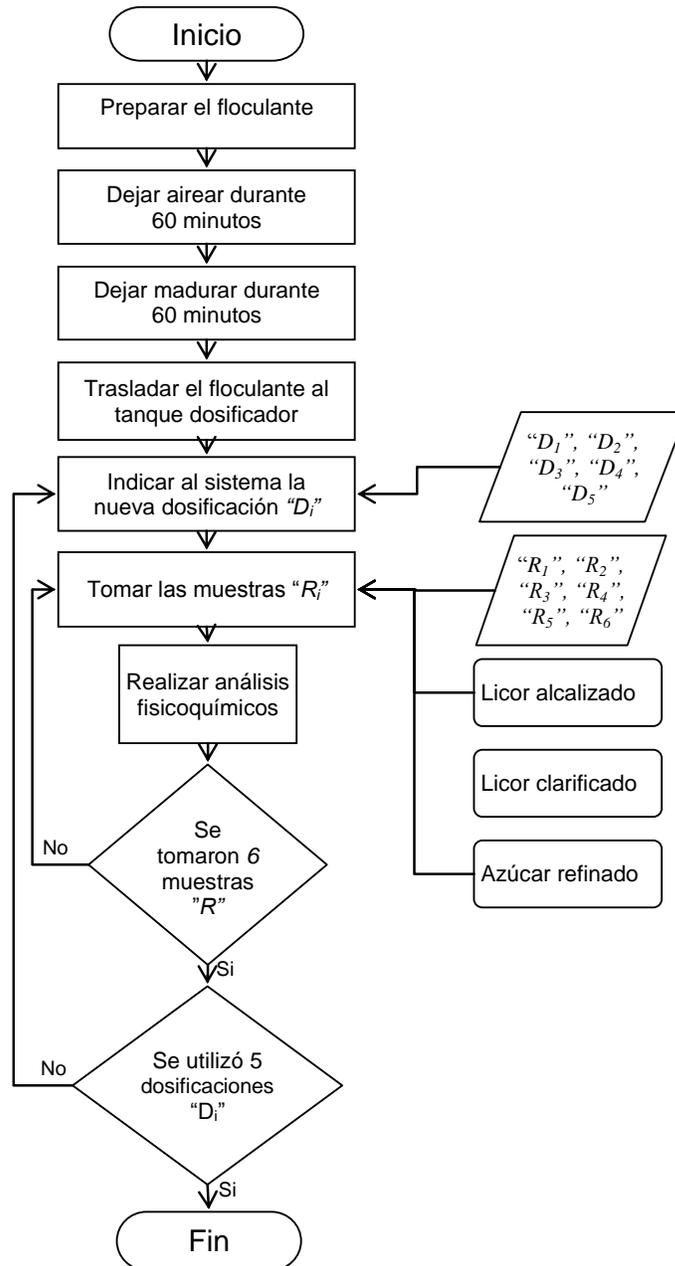


Fuente: elaboración propia.

Se establecieron los procedimientos de realización de los análisis fisicoquímicos según las metodologías dictadas por ICUMSA, siendo estos resultados las variables de respuesta de la investigación.

El diseño experimental de la evaluación de dosificación de floculante y su incidencia en la reducción de potencial floc se realizó según lo indicado en la siguiente figura, la cual indica la metodología experimental de recolección de información.

Figura 4. **Diseño experimental de la evaluación de dosificación de floculante y su incidencia en la reducción de potencial floc**



Fuente: elaboración propia.

### 3.3.1. Diseño de tratamientos

Los tratamientos que se utilizaron para cumplir con los objetivos planteados están relacionados directamente con la variable independiente de dosificación de floculante. El valor base de dosificación de floculante corresponde al recomendado por el manual de operación del fabricante del equipo, por lo que se procedió a realizar los tratamientos a partir de este y en menores cantidades.

Los tratamientos establecidos se basaron en los límites de dosificación de floculante en la clarificación de licor establecidos por la FDA, el cual establece un máximo de 15 partes por millón de floculante en toda el proceso de refinación.

El diseño experimental establecido por la dosificación de floculante es:

$$D_1 = 9 \text{ ppm}$$

$$D_2 = 10 \text{ ppm}$$

$$D_3 = 12 \text{ ppm (Indicado por el manual)}$$

Entonces, habiendo variado estas condiciones, el modelo del diseño experimental se puede representar como:

$$3 \text{ variaciones} \times 1 \text{ variables} = 3 \times 1! = 3$$

Tabla VIII. **Diseño factorial de tratamientos para evaluación de las condiciones de adición del floculante**

Condición	Variación	Repeticiones		
		1	2	3
Dosificación de Floculante	A	$Y_{A,1}$	$Y_{A,2}$	$Y_{A,3}$
	B	$Y_{B,1}$	$Y_{B,2}$	$Y_{B,3}$
	C	$Y_{C,1}$	$Y_{C,2}$	$Y_{C,3}$

Fuente: elaboración propia.

Cada repetición que se realizó de 72 horas de prueba con las condiciones de operación dadas, durante este tiempo de obtuvieron muestras de licor para analizar los porcentajes de remoción de color y turbidez cada 3 horas. Las muestras de azúcar se obtuvieron cada 24 horas, para un total de 3 por repetición, y a las mismas se analizó potencial floc.

Entre cada repetición se esperó un tiempo mínimo de 24 horas, las cuales se determinaron para estabilizar el sistema a las nuevas condiciones de operación.

### 3.4. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

La información recolectada se tabuló, ordenó y proceso con una técnica cuantitativa de análisis, la cual permitió controlar adecuadamente las variables de control y relacionarlas directamente en la obtención de las variables independientes y dependientes.

Los datos obtenidos en la experimentación se tabularon en los formatos establecidos en las siguientes tablas.

Tabla IX. **Formulario de tabulación y ordenamiento de los análisis de color y turbidez del licor de azúcar**

Código	Sólidos solubles 1 (°Bx)	Absorbancia 1 (Abs)	Densidad 1 (g/mL)	Sólidos solubles 2 (°Bx)	Absorbancia 2 (Abs)	Densidad 2 (g/mL)

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Formulario de tabulación y ordenamiento de los análisis fisicoquímicos**

Análisis químico								
Variación de condición	Resultados obtenidos							
	01:00	04:00	07:00	10:00	13:00	16:00	19:00	22:00
Suma diaria								
Promedio								
Desviación estándar								

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Formulario de tabulación y ordenamiento del análisis de potencial floc**

Código	Masa de azúcar (g)	Volumen agua (mL)	pH	Evaluación visual 3er. día	Evaluación visual 7mo. Día	Evaluación visual 10mo. Día

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Tratamiento experimental de los análisis químicos**

Análisis químico	Color/Turbidez							
Variación de condición	Hora de muestreo							
	01:00	04:00	07:00	10:00	13:00	16:00	19:00	22:00
A/B/C	$Y_{1,1}$	$Y_{1,1}$	$Y_{1,2}$	$Y_{1,3}$	$Y_{1,4}$	$Y_{1,5}$	$Y_{1,6}$	$Y_{1,7}$
Suma diaria	$T_{A/B/C}$							
Promedio	$\bar{Y}_{A/B/C}$							
Desviación estándar	$\pm\mu_{A/B/C}$							

Fuente: elaboración propia.

### **3.5. Análisis estadístico**

En el trabajo de investigación se desarrolló un análisis estadístico, basado en la premisa de que se utilizó una técnica de análisis de datos cuantitativa. Las herramientas estadísticas utilizadas fueron promedio, errores de muestreo y análisis de varianza.

#### **3.5.1. Promedio de una muestra**

La media aritmética, conocida también como promedio es equivalente a la sumatoria de todos y cada uno de sus valores y dividida entre el número total de muestras. Se representa como la cantidad total de la variable, distribuida en partes iguales entre cada observación.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} = \frac{a_1 + \dots + a_n}{n}$$

#### **3.5.2. Errores de muestreo**

Los resultados obtenidos se analizaron por dispersión de datos, para retractor la distancia de los valores de cada variable respecto a su media aritmética, de esta manera se identificó la concentración de las variables en el rango de respuesta.

Se consideró en el análisis de datos la precisión de cada uno de los valores obtenidos. La precisión es la característica que indica la reproducibilidad de las mediciones, es decir, la cercanía de cada uno de los datos al repetir los experimentos bajo las mismas condiciones. Se describió la precisión del conjunto de datos recolectados por medio de la desviación estándar y el coeficiente de variación.

### **3.5.2.1. Desviación estándar**

Es una medida estadística que determina la fluctuación de los datos con referencia de la media aritmética. La desviación aritmética representa un valor numérico promedio de diferencia entre los datos y la media.

$$S = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

### **3.5.2.2. Coeficiente de variación**

Es una medida de la relación entre la desviación típica de una muestra y su media, permite comparar las dispersiones de dos distribuciones distintas, siempre que sus medidas sean positivas. A mayor dispersión, mayor es el coeficiente de variación. El coeficiente de variación representa un valor porcentual del efecto de la desviación en la media.

$$cv = \frac{S}{\bar{x}} * 100$$

### **3.5.3. Análisis de varianza**

Para la evaluación de la relación del potencial floc y la dosificación de floculante en la estación de clarificación se utilizó como variable dependiente el nivel de potencial floc, así como los porcentajes de remoción de color y turbidez del licor clarificado.

El análisis estadístico de los datos obtenidos se realizó por medio de un análisis factorial, utilizando un diseño de bloques al completo azar, debido a que

se tratan más de dos niveles. Para el diseño de bloques al completo aza, los datos se arreglaron según lo indicado en la siguiente tabla.

Tabla XIII. **Datos típicos para el diseño de bloques al azar**

Tratamientos	Bloques			Promedio
	1	2	3	
1	Y <sub>1,1</sub>	Y <sub>1,2</sub>	Y <sub>1,3</sub>	Y <sub>1prom</sub>
2	Y <sub>2,1</sub>	Y <sub>2,2</sub>	Y <sub>2,3</sub>	Y <sub>2prom</sub>
3	Y <sub>3,1</sub>	Y <sub>3,2</sub>	Y <sub>3,3</sub>	Y <sub>3prom</sub>
...	...	...	...	...
...	...	...	...	...
10	Y <sub>10,1</sub>	Y <sub>10,2</sub>	Y <sub>10,3</sub>	Y <sub>10prom</sub>
<b>Promedio</b>	<b>Y<sub>1prom</sub></b>	<b>Y<sub>2prom</sub></b>	<b>Y<sub>3prom</sub></b>	<b>Y</b>

Fuente: WALPOLE, Ronald. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. p. 464.

Donde:

Y<sub>i,j</sub> = total de las observaciones bajo el i,j-ésimo tratamiento

y = promedio total de las observaciones bajo el i,j-ésimo tratamiento

Y<sub>a,b</sub> = datos obtenidos para cada observación bajo cada tratamiento

Generalmente el procedimiento para un diseño de bloque aleatorio consiste en seleccionar b bloques y en ejecutar una repetición completa del experimento en cada bloque, con un solo factor con a niveles. Las observaciones pueden representarse por medio de un modelo estadístico lineal.

$$i = 1, 2, \dots, a$$

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \epsilon_{ij}$$

$$j = 1, 2, \dots, b$$

Donde:

$y_{ij}$  = observación

$\mu$  = media general

$\tau_i$  = efecto del tratamiento  $i$ ésimo

$\beta_j$  = efecto del bloque  $j$ ésimo

$\epsilon_{ij}$  = error aleatorio

Los efectos de bloque y tratamiento se definen como desviaciones respecto a la media general. Como el interés es probar la igualdad de los efectos del tratamiento, siendo:

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1: \tau_i \neq 0 \text{ al menos una } i$$

Tabla XIV. **Análisis de varianza para el experimento de bloques al azar**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F calculada
Tratamientos	$\sum_{i=1}^a y_i^2 ./b - y^2 ./ab$	$a - 1$	$\frac{(SS_{\text{Tratamientos}})}{(a-1)}$	$\frac{(MS_{\text{tratamientos}})}{(MS_{\text{Error}})}$
Bloques	$\sum_{j=1}^b y_j^2 ./a - y^2 ./ab$	$b - 1$	$\frac{(SS_{\text{bloques}})}{(b-1)}$	
Error	$SS_E$ (por sustracción)	$(a - 1)(b - 1)$	$\frac{(SS_{\text{Error}})}{[(a-1)(b-1)]}$	
Total	$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij}^2 - y^2 ./ab$	$ab - 1$		

Fuente: WALPOLE, Ronald. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. p. 468.

Cuando  $H_0$  es verdadera, la razón de  $F=(MS_{\text{tratamientos}})/(MS_{\text{Error}})$  es un valor de la variable aleatoria  $F$  que tiene la distribución con  $(a-1)$  y  $a(b-1)$  grados de libertad. Como  $SS_{\text{Tratamientos}}$  sobreestima a  $\sigma^2$  cuando  $H_0$  es falsa, se tiene una prueba de una cola con la región crítica completamente en la cola derecha de la distribución.

La hipótesis nula  $H_0$  se rechaza en el nivel de significancia  $\alpha$ , cuando:

$$F_{\text{calculada}} > F_{\alpha} [k - 1, k (n - 1)]$$

Tabla XV. **Análisis de varianza sobre relación entre dosificación de floculante y remoción de turbidez**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	380,45	2	190,22	0,8118	0,4462	3,0648
Dentro de los grupos	30 931,89	132	234,33			
Total	31 312,33	134	Confianza	95%	Significancia	5%
Regla de decisión		$F < F_{\text{crítica}}$				
Hipótesis aceptada		$H_0$ Nula				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Análisis de varianza sobre relación entre dosificación de floculante y remoción de color**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1 787,49	2	893,75	4,5890	0,0118	3,0640
Dentro de los grupos	25 705,78	132	194,74			
Total	27 493,28	134	Confianza	95%	Significancia	5%
Regla de decisión		$F > F_{crítica}$				
Hipótesis aceptada		$H_a$ Alternativa				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Análisis de varianza sobre relación entre dosificación de floculante y nivel de potencial floc**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	12,963	2	6,482	5,7377	0,0092	3,4028
Dentro de los grupos	27,111	24	1,130			
Total	40,074	26	Confianza	95%	Significancia	5%
Regla de decisión		$F > F_{crítica}$				
Hipótesis aceptada		$H_a$ Alternativa				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Prueba de medias de remoción de color con diferentes dosificaciones de floculante**

<b>ppm floculante</b>	<b>%RC</b>			
10 ppm	24,40	a		
12 ppm	22,28	a	b	
9 ppm	15,84	---	b	c

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Prueba de medias de potencial floc con diferentes dosificaciones de floculante**

<b>ppm floculante</b>	<b>Potencial floc</b>			
10 ppm	1,89	a		
12 ppm	3,00	a	b	
9 ppm	3,56	---	---	c

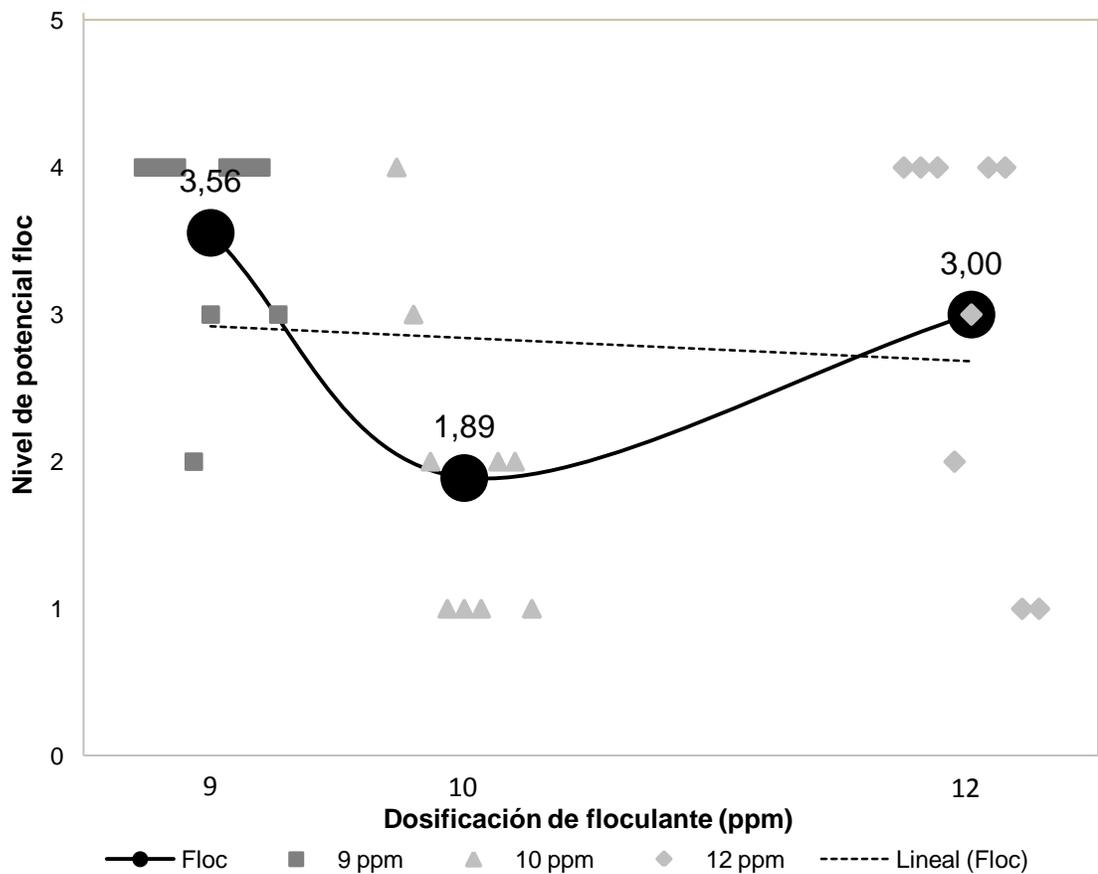
Fuente: elaboración propia.



## 4. RESULTADOS

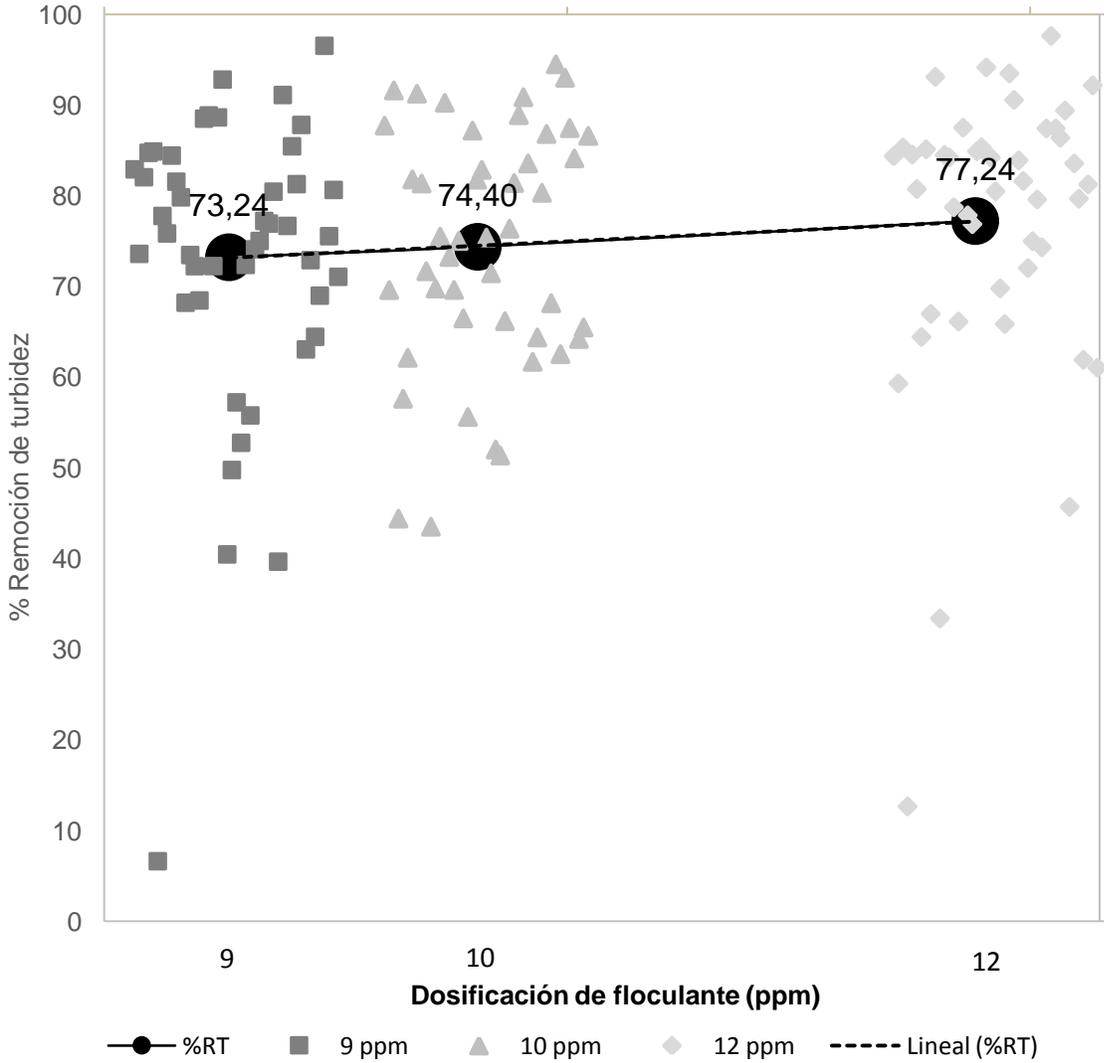
A continuación se encontrará la relación de cada uno de los parámetros del proceso de clarificación de licor evaluado, respecto a la dosificación de floculante, a partir de las cuales se determinó la dosificación óptima.

Figura 5. **Relación entre el nivel de potencial floc y la dosificación de floculante**



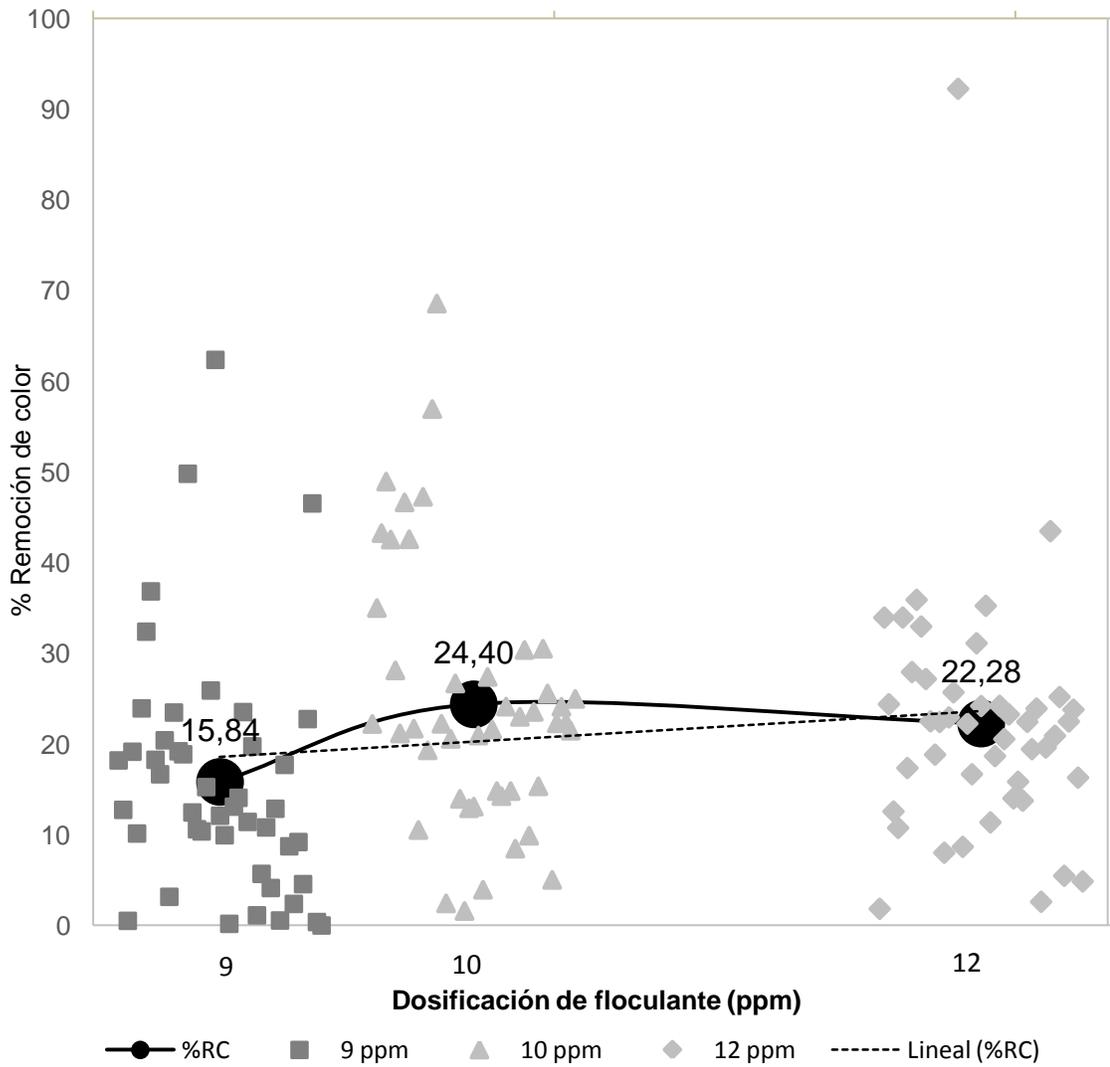
Fuente: elaboración propia.

Figura 6. Relación entre la remoción de turbidez y la dosificación de floculante



Fuente: elaboración propia.

Figura 7. **Relación entre la remoción de color y la dosificación de floculante**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Relación matemática de la dosificación de floculante con los parámetros evaluados**

<b>Parámetro</b>	<b>Relación matemática</b>	<b>Coefficiente <math>r^2</math></b>
Potencial floc	$Pf = -0,079 d + 3,635$	0,020
%Remoción de turbidez	$\%RT = 1,344 d + 61,069$	0,998
%Remoción de color	$\%RC = 1,688 d + 3,398$	0,335

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Análisis de varianza de las relaciones de dosificación de floculante con los parámetros evaluados**

<b>Parámetro</b>	<b>F calculada</b>	<b>F crítica</b>	<b>Decisión</b>
Potencial floc	5,7377	3,4028	Ho rechazada
%Remoción de turbidez	0,8118	3,0648	Ho aceptada
%Remoción de color	4,5894	3,0648	Ho rechazada

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Dosificación óptima de floculante**

	<b>Dosis anterior</b>	<b>Dosis óptima</b>
Floculante	12 ppm	10 ppm
Potencial floc	3,00	1,89
%Remoción de turbidez	77,24 %	74,40 %
%Remoción de color	22,28 %	24,40 %
Consumo diario	19 584 L	16 320 L
Reducción de consumo diario	3 264 L	
%Reducción de consumo	16,67 %	

Fuente: elaboración propia.

## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El objetivo principal del presente trabajo de graduación es evaluar una dosificación óptima de floculante en la clarificación de licor, con la mayor eficiencia en términos de remoción de color y turbidez, que logren reducir el nivel de potencial floc en el azúcar refinado.

El diseño experimental utilizado fue al completo azar, evaluando independientemente las dosificaciones de 9, 10 y 12 partes por millón de floculante; las cuales se estipularon por la dosificación usual en la producción de 12 partes por millón. Se analizó el color y turbidez del licor previo y posterior a la clarificación, con lo cual se calcularon las remociones de los mismos, que son el parámetro de calidad utilizado en el proceso de clarificación. Se realizó el análisis de potencial floc diariamente con muestras recolectadas durante las 24 horas.

En la figura 5 se presenta el gráfico de relación entre el nivel de potencial floc del azúcar refinado con las diferentes dosificaciones de floculante. La escala de la variable dependiente oscila entre 0 y 4, debido a que estos son los posibles resultados de la prueba de ICUMSA para el análisis de potencial floc.

La mejor calidad del azúcar refinado debe indicar una ausencia del floc ácido, con valor cero, por lo que ese es el objetivo del proceso. Cada dosificación constó de nueve valores de potencial floc, identificados todos en la figura; para la dosis de 9 partes por millón de floculante se obtuvo en promedio un valor de floc de 3,56; para la dosis de 10 partes por millón se obtuvo un valor de 1,89 de floc y para la dosis de 12 partes por millón se obtuvo un valor de 3

de floc. También se observa la línea de tendencia de relación entre la dosis de floculante y el nivel de potencial floc, la cual no coincide con lo puntos promedios para cada dosis.

En la figura 6 se presenta el gráfico de relación entre el porcentaje de remoción de turbidez con la dosificaciones de floculante. La escala de la variable dependiente oscila entre 0 y 100 por ciento, siendo el objetivo 75 por ciento de remoción de turbidez, según el fabricante del equipo. En la figura se observan todos los valores obtenidos para cada dosificación y el valor promedio que lo representa; la dosis de 9 partes por millón generó un 73,24 por ciento de remoción de turbidez en el licor de azúcar, la dosis de 10 partes por millón produjo una remoción del 74,40 por ciento y la dosis de 12 partes por millón causó una remoción del 77,24 por ciento. La línea de tendencia entre la dosis de floculante y la remoción de turbidez indica una relación directamente proporcional, es decir, a mayor dosis de floculante se obtiene mayor remoción de turbidez.

La relación entre el porcentaje de remoción de color y la dosis de floculante se presenta en la figura 7. La escala de la variable dependiente oscila entre 0 y 100 por ciento, siendo el objetivo 50 por ciento de remoción de color, según los parámetros del fabricante del equipo. En la figura se observan todos los valores obtenidos para cada dosificación y el valor promedio que representa; la dosis de 9 partes por millón de floculante produjo un 15,84 por ciento de remoción, la dosis de 10 partes por millón generó 24,40 por ciento de remoción promedio y la dosis de 12 partes por millón produjo 22,28 por ciento promedio de remoción de color. Se muestra también en la figura la línea de tendencia de la relación entre la dosis de floculante y la remoción de color, la cual no coincide con lo punto promedio de cada dosis.

La tabla XX representa las relaciones matemáticas entre la dosis de floculante y los parámetros analizados, potencial floc, remoción de turbidez y remoción de color. La relación entre la dosis de floculante y el potencial floc presenta un coeficiente de correlación  $r^2$  de 0,020, el cual determina que no existe una relación lineal significativa entre los datos. La relación entre la dosis de floculante y la remoción de turbidez presenta un coeficiente de correlación  $r^2$  de 0,998; con el cual se determina que si existe una relación lineal entre la dosis de floculante y la remoción de turbidez, directamente proporcional. El valor de  $r^2$  para la relación entre dosificación de floculante y remoción de color es 0,335; que establece que no existe una relación lineal significativa entre los valores.

Se elaboró un análisis de varianza del diseño al completo azar para cada parámetro analizado, y establecer la dosis adecuada de floculante que se debe utilizar, mostrado en la tabla XXI. En el análisis de dosis de floculante respecto al nivel de potencial floc se establecieron los valores de F calculada y F crítica, datos que rechazan la hipótesis nula, y aseveran que al menos una dosis analizada genera un nivel de potencial floc menor; siendo en este caso la dosis de 10 partes por millón según el análisis estadístico de prueba de medias de Tukey.

El análisis de varianza de dosificación de floculante y remoción de turbidez del licor indica por sus valores de F que se acepta la hipótesis nula, indicando que las tres dosis analizadas generan una remoción de turbidez igual. La remoción de color respecto a la dosis de floculante en su análisis de varianza indica un rechazo de la hipótesis nula, al igual que en el potencial floc, al menos una dosificación de floculante genera diferente porcentaje de remoción de color; siendo la dosis de 10 partes por millón la mejor para este parámetro, según el análisis estadístico de prueba de media de Tukey.

Basado en el análisis estadístico y los resultados anteriores, la tabla XXII muestra la dosis óptima de floculante para la clarificación de licor, siendo esta la de 10 partes por millón, que genera menor valor de potencial floc y mayores remociones de turbidez y color en el licor. Además, esta dosificación se traduce en un ahorro para el proceso productivo de 3 264 litros diario, equivalente al 16,67 por ciento de ahorro utilizado actualmente.

## CONCLUSIONES

1. No existe una relación lineal significativa entre la dosificación de floculante en la clarificación de licor y el nivel de potencial floc del azúcar refinado.
2. La remoción de turbidez en la clarificación de licor es directamente proporcional a la dosificación de floculante empleada.
3. No existe una relación lineal significativa entre la dosificación de floculante en la clarificación de licor y la remoción de color en esa etapa del proceso.
4. La dosis óptima de floculante para la clarificación de licor en la refinación de azúcar de Ingenio La Unión es 10 partes por millón.



## RECOMENDACIONES

1. Monitorear el proceso de elaboración de floculante en la estación de clarificación de la refinería, para asegurar la preparación adecuada con la concentración exacta del mismo y no perjudicar la eficiencia del equipo.
2. Analizar la dosificación óptima de decolorante, ácido fosfórico y sacarato de cal en la clarificación de licor.
3. Estudiar los procesos posteriores a la clarificación de licor y su posible influencia en el potencial floc del azúcar refinado.



## BIBLIOGRAFÍA

1. CALDAS, Celso. *La relación entre la calidad de la caña y los flóculos (ácidos y alcohólicos) para atender las exigencias de clientes preferenciales de azúcar*. [Material gráfico proyectable]. Sao Pablo: Central Analítica, 2013. 34 diapositivas.
2. CHEN, James. *Manual del azúcar de caña: para fabricantes de azúcar de caña y químicos especializados*. México: Noriega Editores, 1985. 1194 p.
3. CHOU, Chung. *Handbook of sugar refining: a manual for desing and operation of sugar refining facilities*. Estados Unidos de América: John Wiley & Sons, Inc., 2000. 744 p.
4. CLARKE, Margaret. *Beverage floc and cane sugar*. Estados Unidos: Cane Sugar Refining Research Project Inc, 1977. 6 p.
5. CLARKE, M. et al. Acid Beverage floc from sugar beets. *Journal of sugar beet research*. USA: 1996, p. 15-27, núm. 3.
6. COGUANOR. *Azúcar refinado*. COGUANOR NGO 34 034. Guatemala: COGUANOR, 1987. 4 p.

7. COHEN, M.; DIONISIO, O.; DRESCHER, S. The isolation and characterization of certain impurities responsible for quality problems in refined cane sugar. *Proceedings of Sugar Industry Technologists Congress*. 1970, p. 123-165, núm. 29.
8. Cooperativa de Produtores de Caña, Azúcar y Alcohol del Estado de Sao Paulo LTDA. *Manual de Controle Químico da Fabricação de Açúcar*. Brasil: COPERSUCAR. Brasil, 2001. 57 p.
9. DOHERTY, W. An overview on the chemistry of clarification of cane sugar juice. Estados Unidos: Sugar Research Institute, 1999. 8 p.
10. DREW, BL, et al. An attempt to relate floc with some components. *Proceedings of the souhtfrican sugar technologist' association 1980*. Sudafrica: 1980, p. 66-71, núm. 18.
11. GODSHALL, M.; ROBERTS, E. The roll of charge particles in floc formation. *Proceedings of the Tech. Cane Sugar Refining Research*. 1986, p. 73-81, núm. 6.
12. HONIG, Pieter. *Principios de tecnología azucarera: Purificación*. México: Compañía Editorial Continental, 1982. 730 p.
13. HUGOT, E. *Handbook of cane sugar engineering*. 3a. ed. Amsterdam, Holanda: Elsevier Science Publishers B.V., 1986. 1184 p.
14. International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis, *Libro de métodos (2007)*. Berlin, Alemania: Verlag Dr. Albert Bartens KG, 2007. 388 p. ISBN 978-3-87040-573-1.

15. LIUZZO, M.; HSU, R. Identification of floc components. *Proceedings of the Society of Soft Drink Technologists*. 1973, p. 93-102, núm. 15.
16. MARIN, L. *Determinación de las condiciones apropiadas de preparación de un floculante como componente fundamental en el proceso de clarificación de jugo en Riopaila Castilla, S. A., Planta Riopaila*. Pereira: Universidad Tecnológica, 2012, 167 p.
17. MCGINNIS, Q. Beet sugar technology. *Beet sugar development foundation*. 1944, p. 53-55, núm. 2.
18. MATIC, M. *Aspects of flotation clarification of mixed juice*. Sudafrica: South African Sugar Refining Institute, 1969. 12 p.
19. MATUTE, L. et al. Determinación de la concentración óptima de floculante a usar en la clarificación de jugos de caña en un central azucarero. *Revista Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela*. 2012, p. 115-122, núm. 38.
20. MOBERLY, G. *On the suitability of natal sugars for the manufacture of sweet drinks*. Sudafrica: South African Sugar Refining Institute, 1931. 9 p.
21. REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. Berlin, Alemania: Verlag Dr. Albert Bartens KG, 2012. 880 p.
22. ROBERTS, E. J.; CARPENTER, F. G. Composition of acid beverage floc. *Proceedings of the Tech. Cane Sugar Refining Research*. 1974, p. 39-50, núm. 4.

23. RUIZ, M.; SASTRE, M.; CORONEL, M. Determination and causes of acid beverage floc in cane sugar. *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists'*. Sao Paulo: 2013, p. 57-69, núm. 27.
24. SMITH, I. Some developments in flotation clarification. *Proceedings of the South African Technologists' Association*. 2000, p. 263-266, núm. 74.
25. STANSBURY, M.; HOFFPAUIR, F. An investigation of the polysaccharides present in sugar mill syrups. *Proceedings of the South African Technologists' Association*. 1959, p. 122-134.
26. TATE & LYLE. *Operating Manual Talofloc Clarification*. Inglaterra: Tate & Lyle, 2010. 120 p.
27. VAN DER POEL, P. W.; SCHIWECK, H.; SCHWARTZ, T. *Sugar Technology, Beet and Cane Sugar Manufacture*. Berlin, Alemania: Verlag Dr. Albert Bartens KG, 1998. 1119 p.
28. WALPOLE, Ronald E. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. 6a. ed. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A., 1999. 752 p.
29. ZAPATA, N. Consideraciones acerca del desempeño operacional de las estaciones clarificación y filtración. *Carta trimestral Cenicaña*. 2008, p. 15-19.

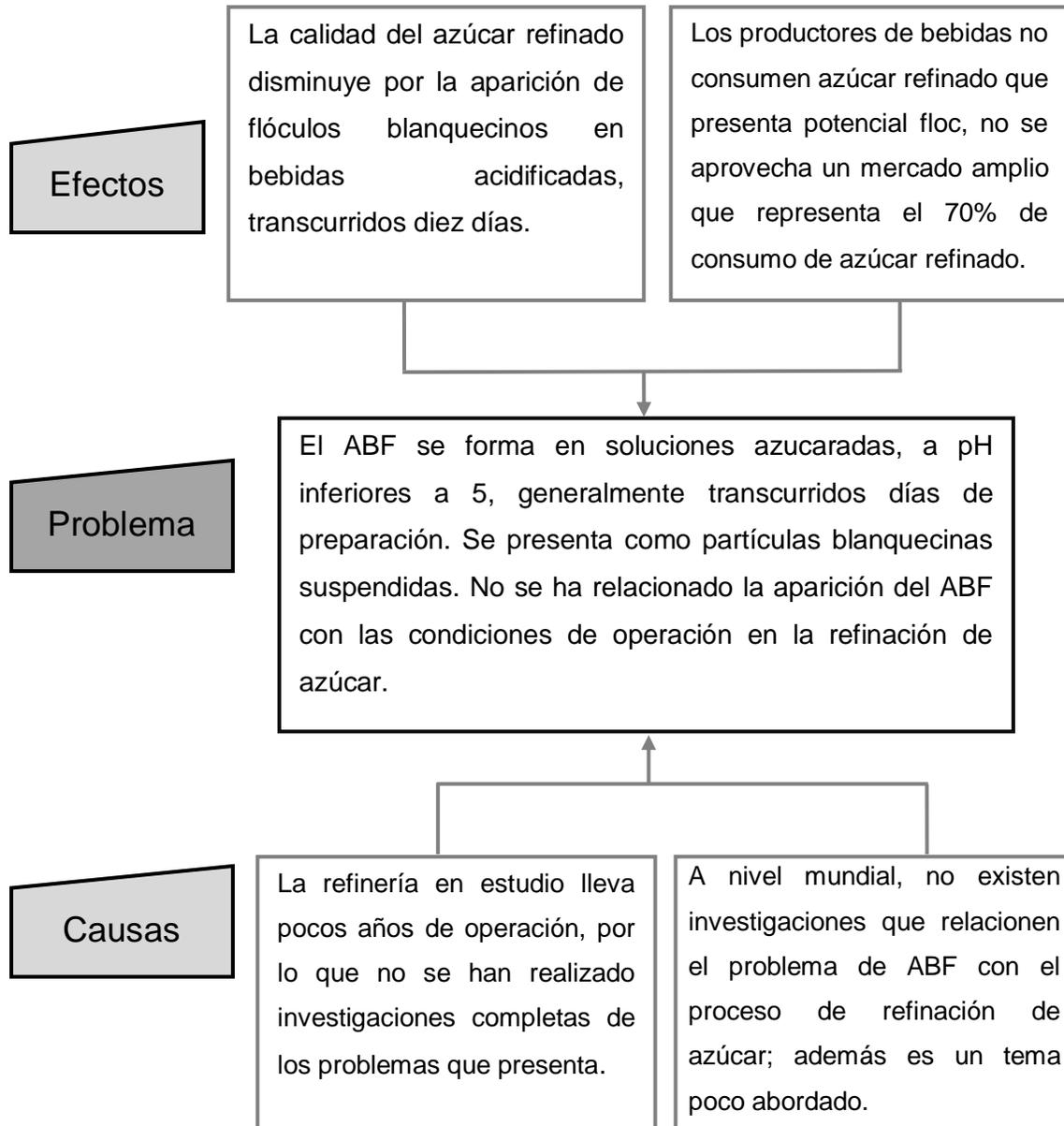
## APÉNDICE

Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos**

1° Paso	2° Paso	3° Paso	4° Paso	5° Paso	6° Paso	7° Paso
Carrera	Área	Tema genérico	Tema específico	Especificación	Problema a resolver	Hipótesis
Licenciatura en Ingeniería Química	Química	Análisis Cualitativo	Equilibrio homogéneo	Equilibrio ácido-base	Evaluación de la dosificación de floculante en la clarificación de refinación de azúcar y su incidencia en la reducción de potencial floc en el azúcar refinado	Es posible reducir los niveles de potencial floc del azúcar refinado por medio del control de la dosificación de floculante en el proceso de clarificación de una refinería.
		Bioquímica	Polisacáridos	Química de la sacarosa		
	Operaciones Unitarias	Flujo de fluidos (IQ-2)	Desplazamiento de fluidos	Medición de fluidos		
		Transferencia de masa (IQ-4)	Separación sólido-liquido	Clarificación		
		Ingeniería del azúcar	Clarificación	Fosflotación		
	Especialización		Azúcar refinado	Potencial floc		
		Procesos Químicos	Control de procesos	Diagrama de control		
Ciencias Básicas		Estadística	Diseño Experimental	Prueba de hipótesis		

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 2. **Árbol de problemas**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Remoción de turbidez con diferentes dosificaciones de floculante**

Tratamiento/ dosis floculante	% Remoción de turbidez		
	12 ppm	10 ppm	9 ppm
1	84,40	87,76	82,94
2	59,33	69,62	73,62
3	85,35	91,64	82,07
4	12,67	44,41	84,76
5	84,56	57,64	84,91
6	80,77	62,15	6,63
7	64,45	81,83	77,80
8	85,15	91,29	75,87
9	67,00	81,38	84,46
10	93,15	71,70	81,58
11	33,41	43,52	79,85
12	84,52	69,80	68,23
13	84,25	75,52	73,49
14	78,76	90,28	72,26
15	66,15	73,27	68,48
16	87,54	69,64	88,53
17	77,87	75,04	88,89
18	76,89	66,50	72,27
19	84,93	55,63	88,67
20	85,37	87,21	92,84
21	94,19	81,80	40,47
22	84,24	82,89	49,78
23	80,52	75,42	57,24
24	69,81	71,48	52,78
25	65,87	52,04	72,40
26	93,52	51,38	55,80
27	90,60	66,20	74,12
28	83,94	76,39	75,04
29	81,65	81,43	77,25
30	72,05	88,92	76,96
31	75,01	90,90	80,48
32	79,62	83,59	39,67
33	74,34	61,71	91,14

Continuación del apéndice 3.

34	87,45	64,40	76,70
35	97,66	80,35	85,48
36	87,45	86,84	81,31
37	86,42	68,17	87,84
38	89,43	94,53	63,08
39	45,71	62,56	72,93
40	83,59	93,04	64,47
41	79,71	87,49	69,01
42	61,93	84,15	96,57
43	81,28	64,23	75,57
44	92,20	65,50	80,67
45	61,05	86,63	71,09

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Remoción de color con diferentes dosificaciones de floculante**

Tratamiento/ dosis floculante	% Remoción de color		
	12 ppm	10 ppm	9 ppm
1	1,85	22,23	18,21
2	33,96	35,02	12,76
3	24,41	43,28	0,52
4	12,58	48,96	19,17
5	10,77	42,57	10,15
6	33,97	28,14	23,95
7	17,37	21,19	32,41
8	27,96	46,67	36,85
9	35,92	42,60	18,28
10	32,98	21,71	16,68
11	27,19	10,54	20,43
12	22,52	47,28	3,17
13	18,85	19,33	23,49
14	22,45	56,96	19,22
15	8,03	68,59	18,89

Continuación del apéndice 4.

16	22,95	22,25	49,82
17	25,72	2,45	12,47
18	92,27	20,59	10,62
19	8,68	26,70	10,38
20	22,27	13,97	15,27
21	16,69	1,61	25,92
22	31,13	12,94	62,38
23	24,21	13,12	12,11
24	35,26	20,96	9,96
25	11,38	3,95	0,19
26	18,69	27,42	13,11
27	24,24	21,62	14,09
28	20,56	14,83	23,54
29	23,28	14,28	11,43
30	14,03	24,15	19,76
31	15,86	14,83	1,13
32	13,77	8,48	5,70
33	22,46	23,02	10,82
34	19,45	30,39	4,14
35	23,93	9,91	12,88
36	2,62	23,56	0,56
37	19,63	15,36	17,72
38	43,49	30,53	8,74
39	20,93	25,59	2,39
40	25,20	5,04	9,21
41	5,49	22,31	4,57
42	22,50	24,13	22,77
43	23,81	22,35	46,55
44	16,31	21,49	0,39
45	4,87	25,00	0,01

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Nivel de potencial floc con diferentes dosificaciones de floculante**

Tratamiento/ dosis floculante	Potencial floc		
	9 ppm	10 ppm	12 ppm
1	4	4	4
2	4	3	4
3	4	2	4
4	2	1	2
5	3	1	3
6	4	1	4
7	4	2	4
8	4	2	1
9	3	1	1
Promedio	3,56	1,89	3,00
Desviación	0,73	1,05	1,32
Cv (%)	20,43	55,80	44,10

Fuente: elaboración propia.