



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

**DETERMINACIÓN DE LA CAUSA DE TURBIDEZ EN EL AZÚCAR REFINO Y SU RELACIÓN
CON OTRAS VARIABLES DE PROCESO QUE INFLUYEN EN SU VALOR Y VARIABILIDAD**

Boanerges Elías Bámaca Saquic

Asesorado por el Ing. Marco Tulio Romero Cortez

Guatemala, febrero de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE LA CAUSA DE TURBIDEZ EN EL AZÚCAR REFINO Y SU RELACIÓN
CON OTRAS VARIABLES DE PROCESO QUE INFLUYEN EN SU VALOR Y VARIABILIDAD**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

BOANERGES ELÍAS BÁMACA SAQUIC

ASESORADO POR EL ING. MARCO TULIO ROMERO CORTEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, FEBRERO DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo 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. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Erwin Manuel Ortiz Castillo
EXAMINADORA	Inga. Dinna Lissette Estrada Moreira
EXAMINADOR	Ing. Federico Guillermo Salazar Rodríguez
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:

DETERMINACIÓN DE LA CAUSA DE TURBIDEZ EN EL AZÚCAR REFINO Y SU RELACIÓN CON OTRAS VARIABLES DE PROCESO QUE INFLUYEN EN SU VALOR Y VARIABILIDAD

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


Boanerges Elías Bámaca Saquic

Guatemala, 25 de octubre de 2013

Ing. Víctor Monzón
Director
Escuela de Ingeniería Química
USAC

Respetable Ing. Víctor Monzón,

Hago de su conocimiento que apruebo y doy mi visto bueno al informe final de trabajo de graduación titulado: Determinación de la causa de turbidez en el azúcar refinado y su relación con otras variables de proceso que influyen en su valor y variabilidad, el cual fue desarrollado por el estudiante Boanerges Elías Bámaca Saquic, carnet 200418320 para optar al título de Ingeniero Químico.

Atentamente,



Ing. Marco Tulio Romero Cortez

Colegiado activo 850

Teléfono: 5218-9018



Guatemala, 15 de noviembre de 2013
Ref. EIQ.TG.379.2013

Señores
Área de Lingüística
Facultad de Ingeniería
Presente,

Estimados Señores

Como consta en el Acta TG-112-2013-IF 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 el estudiante universitario: **Boanerges Elías Bámaca Saquic.**

Identificado con número de carné: **2004-18320.**

Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO.**

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:

DETERMINACIÓN DE LA CAUSA DE TURBIDEZ EN EL AZÚCAR REFINO Y SU RELACIÓN CON OTRAS VARIABLES DE PROCESO QUE INFLUYEN EN SU VALOR Y VARIABILIDAD

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Marco Tulio Romero Cortez.**

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 ENSEÑAD A TODOS"

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



C.c.: archivo





Ref.EIQ.TG.014.2014

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 del estudiante, **BOANERGES ELÍAS BÁMACA SAQUIC** titulado: "**DETERMINACIÓN DE LA CAUSA DE TURBIDEZ EN EL AZÚCAR REFINO Y SU RELACIÓN CON OTRAS VARIABLES DE PROCESO QUE INFLUYEN EN SU VALOR Y VARIABILIDAD**". 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, febrero 2014

Cc: Archivo
VMMV/ale

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 058 .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: **DETERMINACIÓN DE LA CAUSA DE TURBIDEZ EN EL AZÚCAR REFINO Y SU RELACIÓN CON OTRAS VARIABLES DE PROCESO QUE INFLUYEN EN SU VALOR Y VARIABILIDAD**, presentado por el estudiante universitario: **Boanerges Elías Bámaca Saquic**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 18 de febrero de 2014

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Creador del universo, dador de vida y mi mejor amigo.
Mis padres	Boanerges Bámaca y María de Bámaca, por su amor incondicional en todas las etapas de mi vida.
Mis hermanos	Jocabed Tezaguic, Melanie y Jesua Bámaca por todos estos años de amistad y crecimiento personal.
Mis amigos	Por su influencia positiva en mi vida, sabios consejos y buenos momentos en armonía.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por su amor y fidelidad a pesar de mis imperfecciones.
Mi familia	Por su amor, paciencia y provisión.
Mis amigos	Quienes con su sincera amistad me han hecho una mejor persona.
Ing. Marco Tulio Romero	Por compartir sus conocimientos, el apoyo profesional y el asesoramiento del trabajo de graduación.
Ing. Vinicio Maltez Roberti	Por el apoyo profesional, consejos y su gran ayuda en el inicio de mi carrera profesional.
Facultad de Ingeniería	Por ser el lugar donde tuve la oportunidad de adquirir la base de mi conocimiento profesional.
Universidad San Carlos de Guatemala	Por ser la mejor universidad de Guatemala y generadora de profesionales altamente capacitados.
Ingenio Santa Ana	Por darme la oportunidad de comenzar mi desarrollo profesional en una de las industrias insignia de la ingeniería en Guatemala.

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. Proceso de fabricación del azúcar.....	5
2.1.1. Corte de la caña	5
2.1.2. Patio de caña.....	6
2.1.3. Picadoras de caña	6
2.1.4. Molinos	6
2.1.5. Clarificación de jugo	7
2.1.5.1. Sulfitación	8
2.1.5.2. Alcalización.....	8
2.1.5.3. Calentamiento de jugo	9
2.1.5.4. Decantación.....	9
2.1.5.5. Filtros de cachaza.....	9
2.1.6. Evaporación.....	10
2.1.7. Clarificación de meladura	11
2.1.8. Cristalización y centrífugas.....	11

2.1.9.	Secado, enfriado y manejo de azúcar	13
2.2.	Refinería de azúcar	14
2.3.	Color y turbidez	15
2.3.1.	Color ICUMSA.....	16
2.3.1.1.	Reacciones tipo Maillard	16
2.3.2.	Turbidez	17
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	19
3.1.	Variables	19
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	20
3.3.	Recursos humanos disponibles	21
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	21
3.4.1.	Cristalería	21
3.4.2.	Equipo	21
3.4.3.	Reactivos.....	22
3.5.	Técnica cuantitativa.....	22
3.5.1.	Análisis de turbidez de material seleccionado.....	22
3.5.2.	Toma de muestras	24
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información.....	25
3.6.1.	Muestreo	25
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de información	27
3.8.	Análisis estadístico.....	30
3.9.	Plan de análisis de los resultados	32
3.9.1.	Métodos y modelos de los datos según tipo de variables.....	32
3.9.2.	Programas a utilizar para análisis de datos.....	34
4.	RESULTADOS.....	35

4.1.	Resultados del jugo clarificado comparados con el azúcar refinado.....	35
4.2.	Resultados de la meladura clarificada comparados con el azúcar refinado.....	36
4.3.	Resultados del azúcar estándar para disolver comparados con el azúcar refinado	37
4.4.	Resultados del licor en disolución comparados con el azúcar refinado.....	38
4.5.	Resultados del licor filtrado de refinería comparados con el azúcar refinado.....	39
4.6.	Resultados de la masa A de refinería comparados con el azúcar refinado.....	40
4.7.	Resultados de la masa B de refinería comparados con el azúcar refinado.....	41
4.8.	Resultados de la masa C de refinería comparados con el azúcar refinado.....	42
4.9.	Resultados de la masa D de refinería comparados con el azúcar refinado.....	43
4.10.	Resultados totales de coeficientes de variación para todos los materiales analizados	45
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	47
5.1.	Interpretación práctica del coeficiente de relación.....	47
5.2.	Análisis comparativos por materiales	48
5.2.1.	Materiales con bajo coeficiente de correlación con respecto al azúcar refinado.....	48
5.3.	Materiales con coeficiente de correlación medio con respecto al azúcar refinado	49

5.4. Material seleccionado para buscar una mejora en la turbidez del azúcar refino	50
CONCLUSIONES.....	51
RECOMENDACIONES	53
BIBLIOGRAFÍA.....	55
ANEXOS.....	57
APÉNDICES.....	61

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Comparación de la turbidez del jugo clarificado y del azúcar refino.....	35
2.	Comparación de la turbidez de la meladura clarificada y del azúcar refino.....	36
3.	Comparación de la turbidez del azúcar estándar para disolver y del azúcar refino	38
4.	Comparación de la turbidez del licor en disolución y del azúcar refino	39
5.	Comparación de la turbidez del licor filtrado y del azúcar refino.....	40
6.	Comparación de la turbidez de las masas A y del azúcar refino.....	41
7.	Comparación de la turbidez de las masas B y del azúcar refino.....	42
8.	Comparación de la turbidez de las masas C y del azúcar refino.....	43
9.	Comparación de la turbidez de las masas D y del azúcar refino.....	44
10.	Resumen gráfico de las tendencias de turbidez para todos los materiales analizados.....	45

TABLAS

I.	Variable de análisis y materiales en los que se analiza	19
II.	Descripción de la delimitación y campo de estudio.....	20
III.	Análisis de error por material, total de datos, error promedio.....	27

IV.	Primera tabla de toma de datos de la turbidez en refinería y fábrica, materiales que se muestrean hasta seis veces por día	28
V.	Segunda tabla de toma de datos de la turbidez en refinería y fábrica, azúcar estándar que se analiza hasta 12 veces por día	29
VI.	Tercera tabla de toma de datos de la turbidez en refinería y fábrica, azúcar estándar que se analiza 3 o 4 veces por día.....	29
VII.	Descripción de métodos analíticos de datos de turbidez	33
VIII.	Resumen de coeficientes de variación para todos los materiales analizados.....	46

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
°Bx	Grados Brix
°C	Grados Celsius
°F	Grados Fahrenheit
g	Gramo
μm	Micrómetro
nm	Nanómetro
pH	Potencial hidrógeno
psig	Presión manométrica en libras
UI	Unidades ICUMSA

GLOSARIO

Absorbancia	Relación logarítmica entre la radiación que cae sobre un material y la radiación transmitida a través del material.
Agua desmineralizada	Agua de la cual han sido removidos iones y cationes inorgánicos a través del intercambio iónico.
Bagacillo	Fracciones finas del bagazo de caña.
Cachaza	Material semisólido obtenido de la filtración de los lodos provenientes de la clarificación.
Carbón activado	Carbón procesado. Posee una amplia área superficial y es ideal para la adsorción y la remoción de color.
Chiller	Es una máquina que remueve el calor de un líquido utilizando un ciclo de refrigeración.
Clarificador tipo Dorr	Equipo multi bandejas para separar por sedimentación los sólidos suspendidos del jugo no clarificado.
Espectrofotómetro	Equipo que mide la radiación absorbida o reflejada de un material como función de la longitud de onda.

Floculación	Acción del floculante sobre las impurezas del jugo o la meladura para separarlas de la fase líquida.
Floculante	Polímero de peso molecular alto con carga positiva o negativa que asiste en la clarificación.
ICUMSA	Comisión Internacional de Métodos Uniformes para el Análisis del Azúcar, por sus siglas en inglés.
Licor	Solución de azúcar y agua, término generalmente empleado en las refinerías de azúcar.
Magma	Mezcla de cristales de azúcar y líquido (agua, jugo clarificado, meladura o masas) producida en las centrifugas.
Meladura	Jugo concentrado producto de la evaporación.
Miel	Término general para la fase líquida menos densa producto de la centrifugación de las masas de tachos (miel A, B, miel final).
Polifenoles	Compuestos orgánicos, naturales o sintéticos, caracterizados por un número alto de fenoles en su estructura.
Polisacáridos	Carbohidratos de cadena molecular larga.

Sacarosa	Nombre del compuesto orgánico conocido como azúcar común, es un sólido cristalino incoloro, inodoro y de sabor dulce.
Semilla	Suspensión de cristales en una solución saturada de alcohol, o el grano resultante de insertar semilla en un tacho.
Tacho	Cristalizador evaporativo al vacío, cristaliza a partir de meladura, jarabe, licor o miel.
Talo	Tanque utilizado para la clarificación de meladura.
Tierras diatomeas	Polvo fino natural, suave, con alta porosidad y rico en sílice extraído de rocas sedimentarias utilizado como auxiliar en el proceso de filtración.
Zafra	Período de cosecha de la caña de azúcar. En Guatemala también se refiere al período de funcionamiento de los ingenios y de producción de azúcar.

RESUMEN

Durante la zafra 2012 – 2013, en el ingenio guatemalteco donde se llevó a cabo la investigación, se observaron valores de turbidez por arriba de su parámetro máximo aceptable, debido a esto se analizaron las etapas que tienen capacidad de reducirla durante el proceso total de fabricación de azúcar refinado.

Se tomaron 24 series de datos de valores de turbidez en diferentes materiales del proceso de producción de azúcar refinado, de los días 144 hasta el día 167 de zafra, que es cuando se dejó de refinar azúcar. Se analizó en el laboratorio la turbidez de los siguientes materiales: jugo claro, meladura clarificada, azúcar blanco estándar para disolver, azúcar en disolución, licor filtrado, masas A, B, C y D de los tachos de refinación que se compararon con la turbidez del azúcar refinado. En total se recopilaron 1 268 datos de turbidez con los cuales se concluyó que la etapa que conviene modificar es la clarificación de meladura.

Los datos de turbidez de todos los materiales mencionados previamente se analizaron estadísticamente, comparándolos con la turbidez del azúcar refinado y obteniendo coeficientes de correlación de Pearson de cada una de las series de datos. De esta manera se determinó que la clarificación de meladura es la etapa con mayor relación con el valor final de la turbidez del azúcar refinado.

OBJETIVOS

General

Identificar la etapa que causa mayor variabilidad y altos valores de turbidez en la producción del azúcar refinado, mediante la determinación de la turbidez del jugo claro, meladura clarificada, azúcar para disolver, licor en disolución, licor filtrado y masas de los tachos de refinación.

Específicos

1. Determinación de la turbidez del jugo claro, meladura clarificada, azúcar para disolver, licor en disolución, licor filtrado y las masas A, B, C y D de refinación según el método ICUMSA-GS 2/3-18.
2. Determinar las variables que se pueden modificar para implementar una mejora en el material que se determine tiene mayor influencia en la turbidez final del azúcar refinado.
3. Proponer una solución a corto plazo para mejorar los valores de turbidez alto en el azúcar refinado.

Hipótesis

Hipótesis nula

La determinación de la turbidez en cada material utilizado en el proceso de fabricación del azúcar identificará la causa de la variabilidad y altos valores de turbidez en el azúcar refinado.

Hipótesis alterna

La determinación de la turbidez en cada material utilizado en el proceso de fabricación del azúcar no identificará la causa de la variabilidad y altos valores de turbidez en el azúcar refinado.

INTRODUCCIÓN

La industria azucarera guatemalteca es una de las principales exportadoras a nivel regional, además de ser una de las agroindustrias más innovadoras, activas e importantes para la economía del país.

Se estima que a nivel mundial dos tercios del azúcar total producida es utilizada para fines industriales y el resto para consumo directo. Debido a esto los ingenios azucareros en Guatemala han buscado la mejora continua de sus productos básicos; los cuales son: azúcar crudo, azúcar blanco estándar y en algunos ingenios también se produce azúcar refino.

Cuando se analiza la calidad del azúcar refino, el primer parámetro que resalta es el color ICUMSA, que según especificaciones ICUMSA debe estar por debajo de cuarenta y cinco unidades para competir en mercados más especializados con mejores beneficios, pero existen otros dos parámetros que son de gran importancia, los cuales son la turbidez y los azúcares reductores, y la presente investigación se centró en el análisis en la turbidez ICUMSA del azúcar refino, dicho parámetro es provocado por la materia suspendida que no se puede eliminar del producto final, además, la turbidez en una solución dificulta el paso de la luz en el espectrofotómetro lo que puede provocar lecturas altas de color. El parámetro de azúcares reductores no se toma en cuenta para la presente investigación.

El propósito de la investigación fue determinar la etapa que influyó más en la turbidez del azúcar refino para la zafra 2012 – 2013, y proponer mejoras que se puedan realizar para mantener un azúcar de alta calidad.

1. ANTECEDENTES

La turbidez en el proceso del azúcar siempre ha sido un parámetro utilizado para medir la cantidad de impurezas que permanecen en los diferentes materiales del proceso de fabricación de azúcar, tales como el jugo mezclado, jugo clarificado, meladura, meladura clarificada, templeas en los tachos y el azúcar como producto final.

Con anterioridad se han realizado análisis de la eficiencia de remoción de turbidez para procesos específicos, enfocándose en la remoción de turbidez del jugo clarificado y de la meladura clarificada, a continuación se mencionan dos investigaciones realizadas a nivel nacional.

En 2005 Carlos Morales C. presenta los resultados de su investigación de trabajo de graduación *Análisis del porcentaje de remoción de turbidez como indicador de la eficiencia de los clarificadores de jugo tipo Dorr de ingenio San Diego* donde además de concluir que dos clarificadores tipo Dorr tienen eficiencia similar, también llegó a la conclusión de que la turbidez en el color del azúcar estándar final puede verse afectado por procesos posteriores a la clarificación de jugo.

En el 2011 Vinicio Maltez R. dio a conocer su trabajo de graduación, *Análisis de remoción de turbidez como un indicador de eficiencia en la clarificación de meladura y su influencia en el color del azúcar blanco estándar en un ingenio azucarero guatemalteco*; el cual se enfoca en el proceso de clarificación en un talo para remover las impurezas que aún están presentes luego del proceso de evaporación.

En el trabajo de graduación previamente descrito, se llega a la conclusión de que con las modificaciones realizadas al proceso, se mejoró la remoción de turbidez en un 17 %, pero más importante aún, para la presente investigación, es que se menciona que el proceso de clarificación de meladura es el de mayor importancia para remover la turbidez y el color del azúcar final, sin entrar en un análisis comparativo con el resto de los procesos, que es lo que se pretende realizar en el presente trabajo de graduación.

Hasta el momento se han mencionado dos etapas dentro del proceso general de fábrica, pero se hace necesario fijar el antecedente que hace tan importante el requerimiento de un bajo color de azúcar refino. Dicho requerimiento es consecuencia de parámetros internos y externos al proceso de fábrica, como ejemplo se tiene a un cliente mayorista nacional de azúcar, que especifica que el color del azúcar refino sin vitaminar no puede ser mayor que 20 UI y su turbidez debe ser menor a 45 UI. Se mencionará un tercer antecedente que se da paralelo a la industria alimenticia, y que provee información general de la línea de eventos que ha llevado a los ingenios azucareros a buscar una eficiencia constante en los valores de turbidez de su azúcar refinado.

En 1997, la ingeniera María García M. presentó la tesis de ingeniería química *Análisis comparativo de cinco métodos de tratamiento de azúcar para su uso en la industria de refrescos* donde analiza distintos métodos que las empresas embotelladoras y de refrescos utilizaban y en algunos casos aún utilizan para agregar el azúcar a sus bebidas. Como conclusiones presenta la dificultad y los beneficios que tienen el carbón activado y distintos filtros para el jarabe para la producción de refrescos.

El documento anteriormente mencionado provee un panorama de lo que las grandes industrias alimenticias y de alimentos buscarían en el azúcar que compran como materia prima los siguientes años, los parámetros de color y turbidez de estos clientes industriales son bastante exigentes y permiten poca holgura en los valores de turbidez que el ingenio produce, esto les permite evitarse problemas en la producción de los distintos refrescos y alimentos que busquen producir.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Proceso de fabricación del azúcar

En realidad, el azúcar se produce en el campo y la calidad de ésta depende en gran manera del tipo de caña, cuidados, período de crecimiento y el tipo de corte que se le da a la caña. Al momento de la zafra se corta la caña y se da inicio a un proceso que finaliza con la obtención de azúcar cruda, estándar y refino, además de la melaza resultante del proceso, a continuación se describe brevemente el proceso de producción de azúcar.

2.1.1. Corte de la caña

El corte de la caña es el inicio al proceso de extracción de sacarosa en época de zafra, el proceso se pueda llevar a cabo de forma mecanizada y manual o una mezcla de ambos, el corte manual permite un mejor corte de los tallos de caña pero se debe quemar la caña para eliminar las hojas y requiere de mano de obra numerosa; el corte mecanizado tiene la ventaja de poder manejar altos tonelajes de caña por un número reducido de personas, pero está reducido a terrenos planos y sin rocas, además tiene la desventaja de que la mayoría de veces arrastra cogollos, raíces y tierra, lo cual aumenta el color y la turbidez del jugo de caña primario.

2.1.2. Patio de caña

La caña es recibida y llevada a básculas electrónicas que pesan la cantidad de caña que ingresa por camión, ya que ésta varía dependiendo del y tipo de remolque que se esté utilizando, además se muestrean los camiones para determinar el contenido de sacarosa, fibra y las impurezas del lote.

Es de suma importancia que el ingenio se mantenga abastecido de caña en cualquier momento durante su operación, por lo que parte de la caña que entra en los camiones permanecerá almacenada a granel dentro de los camiones, mientras el resto será conducido directamente a las mesas donde será lavada de las impurezas externas con agua para luego ser colocada en el conductor de caña que alimenta las picadoras.

2.1.3. Picadoras de caña

Son cuchillas de tamaño adecuado colocadas en un eje rotatorio accionado por un motor eléctrico sobre un conductor donde se transporta el colchón de caña. El propósito de dichas cuchillas es abrir las células de la caña que contienen sacarosa para facilitar la extracción de jugo en el área de molinos o difusores.

2.1.4. Molinos

El objetivo de la molienda de caña es extraer al jugo que contiene sacarosa del resto de la caña¹; se logra dicha extracción en molinos donde la caña es exprimida a elevadas presiones entre pares de mazas consecutivos.

¹REIN, Peter. "Molienda de caña". En: *Ingeniería de la caña de Azúcar*. Berlín: Verlag Dr. Albert Bartens KG, 2012. p. 117.

Puesto que la extracción mecánica en molinos por sí misma no es suficiente para extraer todo el contenido de sacarosa de la caña, se realiza un proceso de imbibición en el molino que se considere conveniente, generalmente no al primero, que consiste en agregar agua al bagazo que aún lleva sacarosa y de esta manera elevar la eficiencia de extracción de sacarosa en los molinos.

Luego de separar la mayor cantidad de sacarosa permitida por el proceso, queda un residuo fibroso conocido como bagazo que se aprovecha como combustible de las calderas que proveen vapor a los turbinas de los turbogeneradores u otros equipos y generan energía eléctrica o mecánica para los distintos procesos del ingenio azucarero, de haber excedentes de producción de energía eléctrica, estos se pueden vender a empresas productoras o comercializadoras de energía eléctrica.

2.1.5. Clarificación de jugo

El jugo mezclado proveniente de molinos, que es jugo primario con jugo extraído por imbibición y/o maceración con jugo, presenta una cantidad alta de impurezas solubles e insolubles que son las responsables del color y la turbidez alto del jugo que entra a fabrica y dependen del tipo y calidad de caña que se esté procesando, por lo tanto el fin primordial de la clarificación o defecación es remover a través de medios físicos y químicos, la mayor cantidad de impurezas suspendidas sedimentables a través de la formación de *flocs* a velocidades satisfactorias, para el proceso global tomando en cuenta las condiciones de temperatura, pH y concentración de iones que maximizan la precipitación de impurezas sólidas del jugo.

Del proceso general de clarificación se debe obtener jugo clarificado de buena calidad, con la mínima turbidez posible, así como bajos colores y el

menor contenido de calcio posible; además se da una separación de las impurezas en una fase acuosa semisólida, o lodo, conocido como cachaza para la industria azucarera que aún contiene sacarosa y en la mayoría de los casos es filtrado a través de diferentes medios para una máxima extracción de sacarosa de la cachaza.

El proceso de clarificación se lleva a cabo bajo estrictos monitoreo de pH, temperaturas e inspecciones visuales para evitar inversiones de sacarosa y formación de dextranas que reducen la eficiencia de extracción y aumentan el color y turbidez del jugo y la meladura posterior, hay varios subprocesos dentro del proceso global de clarificación de jugo, de los cuales se mencionan los generalmente usados a nivel nacional.

2.1.5.1. Sulfitación

Es el proceso de hacer que una fase de dióxido de azufre gaseoso entre en contacto con el jugo mezclado proveniente de los molinos para disminuir el color y eliminar microorganismos. El dióxido de azufre se obtiene quemando azufre de alta pureza en hornos a temperatura controlada.

2.1.5.2. Alcalización

Luego de la sulfitación el jugo queda acidificado, lo cual promueve la pérdida de sacarosa por inversión de azúcares. En los ingenios nacionales generalmente se utiliza una lechada de cal preparada en el ingenio para neutralizar el pH del jugo, llevándolo en condiciones normales hasta valores de 7,0 – 7,6. La alcalización también es necesaria para tener buenos resultados en la defecación del jugo en los tanques de clarificación.

2.1.5.3. Calentamiento de jugo

Para esto se utilizan calentadores de carcasa y tubos; más recientemente se han comenzado a utilizar calentadores de placas que tienen la ventaja de contar con amplias áreas de calentamiento en volúmenes menores que los de carcasa y tubos pero su limpieza debe ser química, para la clarificación se tiene que llevar el jugo a un rango de temperaturas de 218 – 222 °F.

2.1.5.4. Decantación

Luego de que se da la floculación, con floculantes sintéticos poliméricos, los *flocs* que se forman en el jugo caliente se sedimentan, separando una pequeña cantidad de las impurezas totales en forma de cachaza del jugo, pero aun con la baja cantidad de impurezas removidas la turbiedad del jugo mejora significativamente². Esta sedimentación controlada se lleva a cabo en tanques de gran volumen conocidos como clarificadores o tanques de menor tamaño pero que permiten un proceso continuo conocidos como clarificadores rápidos.

El proceso de decantación debe ser monitoreado constantemente, generalmente las inspecciones visuales son el tipo de monitoreo que permite tomar decisiones rápidas sobre la cantidad de floculante agregado, calidad del jugo y turbidez aparente.

2.1.5.5. Filtros de cachaza

La cachaza que se forma en los clarificadores debe ser bombeada tan delicadamente como sea posible para evitar el rompimiento de los *flocs* y no

² REIN, Peter. “Clarificación”. En: *Ingeniería de la caña de Azúcar*. Berlín: Verlag Dr. Albert Bartens KG, 2012. p. 260.

elevant el valor de la turbidez; posteriormente este lodo tiene que ser filtrado para recuperar el jugo y separar los sólidos del lodo, el proceso es ayudado con la adición de finas partículas de bagazo, conocidas como bagacillo, floculante y cal que sirven como ayuda filtrante.

En muchos lugares del mundo el proceso sigue realizándose en filtros rotativos al vacío parcialmente sumergidos en la cachaza líquida, a dichos filtros se les agrega agua caliente para hacer más eficiente la extracción de jugo rico en sacarosa; el jugo extraído generalmente se retorna al tanque de alcalizado y en los filtros se separa una torta de cachaza semisólida que puede ser utilizada como abono o materia prima para otros procesos. Otro tipo de filtros de cachaza es el filtro de prensa, que son de tipo *batch* y permiten una automatización completa, los diseños modernos son de alta eficiencia pero no son de uso común en el país.

2.1.6. Evaporación

El propósito de la evaporación es concentrar el jugo clarificado de la manera más eficiente posible, valiéndose de sistemas de evaporadores de múltiples efectos que están diseñados para evaporar grandes cantidades de agua, con una sola entrada de vapor de escape al primer efecto de los evaporadores y vapor vegetal a los efectos subsecuentes que trabajan a presiones menores que la atmosférica. El jugo claro entra a concentraciones de 15 a 20 °Bx y del último efecto sale un jugo concentrado denominado meladura en concentraciones de 65 a 70 °Bx.

Se busca evitar la ebullición a presiones mayores que la atmosférica porque “el contenido de azúcares invertidos en los jugos de caña de azúcar es

mucho mayor, por lo cual la formación de color que resulta de la reacción de estos a altas temperaturas representa un problema mayor”³.

2.1.7. Clarificación de meladura

Cuando se va a producir azúcar blanca estándar o azúcar refino se clarifica la meladura por flotación con aire micronizado, que arrastra los flóculos hacia la parte superior del tanque de clarificación, o talo, formando una espuma que se remueve constantemente del talo.

La clarificación de meladura remueve principalmente los sólidos en suspensión que son los mayores responsables de la turbidez, aunque también sirve para remover cierta cantidad de los sólidos disueltos que causan el color. La meladura clarificada puede ser enviada directo a los tachos o a tanques para su almacenamiento.

2.1.8. Cristalización y centrífugas

La cristalización es un proceso del cual se extrae sacarosa del estado líquido y se deposita a un estado puro cristalino, en un ingenio la producción de cristales se da bajo condiciones de vacío para mantener controlada la temperatura en valores bajos y evitar la formación de color. A continuación se describe el sistema de tres templas con doble magma, donde se requieren tres tipos de tachos, uno de producción directa y dos de agotamiento, cada tacho es alimentado por un fluido rico en azúcar en solución acuosa (mieles y meladura) y un fluido en estado semisólido que promueve el crecimiento de cristales (magma B, C y semilla):

³ REIN, Peter. “Evaporación”. En: *Ingeniería de la caña de Azúcar*. Berlín: Verlag Dr. Albert Bartens KG, 2012. p. 315.

- Tachos de primera: son alimentados directamente por meladura, clarificada o no clarificada, de alta pureza y magma B proveniente de las centrífugas de los tachos de segunda. Los tachos de primera producen una temple denominada masa A que luego es centrifugada y se separa en cristales de azúcar y miel A.
- Tachos de segunda: son alimentados por miel A provenientes de las centrífugas de los tachos de primera, la miel A hace el papel de fluido de alta pureza, aunque es menor que la pureza de la meladura; el fluido que promueve el crecimiento de cristales es el magma C que proviene de las centrífugas de los tachos de tercera. Los tachos de segunda producen una temple denominada masa B que se centrifuga y se separa en magma B y miel B.
- Tachos de tercera: son alimentados por miel B proveniente de las centrífugas de los tachos de segunda, este fluido tiene una pureza relativamente baja pero aún permite la extracción de sacarosa; para los tachos de tercera se requiere un promovedor diferente de crecimiento de cristales, conocido comúnmente como semilla y que consiste en una solución rica en azúcar estándar diluida en alcohol isopropílico o etílico. Los tachos de tercera producen una temple denominada masa C que se centrifuga y se separa en magma C y miel C o miel final también denominada melaza a la cual, por lo general, ya no se puede extraer sacarosa por procesos puramente físicos.

Se debe mencionar que la masa C no pasa directamente a las centrífugas, sino que pasa a un proceso en un equipo de cristalización en frío conocido como cristizador, en donde se lleva un agotamiento de la masa C, ya que disminuye la solubilidad ante una caída de temperatura.

- Centrifugas: pueden ser continuas o tipo *batch*, y son las que llevan a cabo el proceso físico de la separación de la miel final de los cristales de azúcar, como fue descrito para cada tacho. El centrifugado ayuda a disminuir el color en el lavado, pero éste debe ser corto para evitar la pérdida de azúcar por dilución.

2.1.9. Secado, enfriado y manejo de azúcar

Luego de que el azúcar sale de las centrifugas aún tiene cierto grado de humedad residual, son comunes los valores de 0,5 – 0,2 %, y se reduce a valores de 0,03 – 0,05 % con secadores rotatorios con inclinaciones de 5 a 7° en un proceso adiabático⁴, es importante controlar la temperatura en rangos preferiblemente de 35 a 40 °C.

Después de ser secada, el azúcar se enfría en un tambor rotatorio de construcción similar a los secadores rotatorios, para bajar la temperatura del azúcar se utiliza aire a temperatura ambiente o aire enfriado en *chillers* dependiendo de las necesidades del ingenio.

El transporte del azúcar al salir de las centrifugas en un estado húmedo, generalmente, se lleva a cabo a través de conductores de banda de diferentes anchos, si el azúcar debe ser trasegada verticalmente lo más común es utilizar elevadores de tipo cangilones. En algunos puntos del proceso se pueden utilizar conductores de tornillos sin fin, cuando se considera que la humedad del azúcar aun es alta y las distancias son relativamente cortas.

⁴ Larrondo, Jesús E., Ramos R. Aulio A. En: *Curso – taller “Calidad de la caña y procesos de fábrica para obtención del azúcar; Día 4: Cristalización de la sacarosa”*. Diapositiva 87.

2.2. Refinería de azúcar

En una refinería de azúcar se busca producir azúcar refino a partir de azúcar blanco estándar o cruda, para elevar su calidad removiendo las impurezas que aún permanezcan atrapadas en la superficie de los cristales, y que son los responsables de los valores de color y turbidez en el azúcar crudo y estándar. El azúcar refino es el de mayor calidad con un parámetro de color ICUMSA de 0 – 45 unidades, una turbidez ICUMSA de 0 – 20 unidades, un pol mínimo de 99,85 y un máximo de humedad de 0,04 %.

El proceso de refinación inicia con la captación y pesaje de azúcar blanco, o en algunas refinerías con azúcar cruda, y termina con el envasado de refino que es llevado hacia las bodegas de producto terminado. El azúcar captado se diluye en agua caliente y se mezcla en tanques para obtener una solución homogénea, a una concentración adecuada que se pasa a través de coladores o zarandas para eliminar el remanente de bagacillo en el azúcar.

La solución disuelta y sin bagacillo se denomina licor y es llevada a un tanque de tratamiento con carbón activado, que está diseñado para permitir un tiempo adecuado de retención para eliminar color disuelto.

Se busca eliminar la mayor cantidad de impurezas del licor antes de concentrarlo, por lo cual luego de ser filtrado con carbón activado se requieren varios filtros; se utilizan tierras diatomeas que funcionan como adsorbentes y son auxiliares de la filtración en la eliminación del color, al utilizarse tierras diatomeas y carbón activado se requiere un filtro vertical que atrape los residuos de tierras o carbón que vayan en el licor. Durante el proceso se forman sedimentos que posteriormente son removidos en un filtro aparte. Para asegurar que el licor ya no lleva impurezas que puedan afectar el color, se pasa

por un último filtro de cartuchos que asegura la mayor cantidad de remoción de impurezas en el licor de refinería. El proceso de filtración general en la refinería también remueve sólidos insolubles del licor, los cuales son causante de la turbidez.

Posterior a las filtraciones en refinería, el licor es alimentado a tachos de uso exclusivo de la refinería para producir cristales de azúcar refino, este proceso es similar a la descripción dada previamente de los tachos. Las masas producidas en refinería son centrifugadas para producir azúcar refino de distintas calidades que son luego secadas y enfriadas para ser llevadas al centro de envase.

Al contrario de las fábricas de azúcar crudo y blanco estándar que generalmente funcionan sólo la temporada de zafra, las refinerías pueden trabajar durante todo el año, y esto soluciona en parte la rápida degradación de color que tiene el azúcar refino al ser almacenado.

2.3. Color y turbidez

El color y la turbidez son dos variables que guardan una relación directa y se busca mantener un control de ambas a lo largo del proceso de producción de azúcar, desde que inicia la clarificación de jugo hasta que se obtienen los cristales de azúcar.

2.3.1. Color ICUMSA

Para el azúcar, se refiere al índice de atenuación, determinado por absorción de luz bajo condiciones definidas. Generalmente se mide empleando el método ICUMSA-GS2/3-10 a 420 nm, y se expresa en unidades ICUMSA o UI⁵.

El origen del color en el azúcar puede ser vegetal, refiriéndose a los componentes de la caña, o por los procesos fabriles, sobretodo la degradación térmica en evaporadores y tachos, esto es la caramelización, además se puede dar una serie de reacciones conocidas como reacciones tipo Maillard.

2.3.1.1. Reacciones tipo Maillard

Estas reacciones normalmente ocurren en materiales de baja pureza y alto brix, y tienen como precursor las altas temperaturas, en un ingenio azucarero esto se puede observar en tanques de almacenamiento de mieles, tanques cristalizadores, tanques de magma y otros tipos de tanques.

Las reacciones tipo Maillard se dan entre la glucosa y compuestos amino nitrogenados, y se las busca evitar en el proceso del azúcar ya que son reacciones exotérmicas que liberan gases y los compuestos que forman son coloreados y están asociadas con derrames, elevación de la temperatura, descenso en el rendimiento de los tachos y dificultades en la centrifugación.

⁵ REIN, Peter. "Terminología". En: *Ingeniería de la caña de Azúcar*. Berlín: Verlag Dr. Albert Bartens KG, 2012. p. 33.

2.3.2. Turbidez

La turbidez, según se mide en la industria azucarera utilizando el método ICUMSA-GS 2/3-18, es la diferencia de la desviación de un haz de luz que pasa a través de una solución de azúcar en una celda de 1 cm, antes y después de filtrar, utilizando un filtro de 45 μm .

La turbidez es resultado de las impurezas no solubles, y al igual que el color tiene un origen tanto vegetal, refiriéndose a compuestos en la caña que no son solubles o que pueden formar coloides no solubles, tales como polisacáridos, polifenoles de alto peso molecular y minerales suspendidos (cenizas); como de fábrica, refiriéndose a partículas de bagacillo que queda en suspensión, una mala aplicación de la cal, jugo que arrastre flocs no disueltos, formación de compuestos no solubles en los tachos o los evaporadores, y otros.

Se busca evitar los valores altos de turbidez, no sólo afectan los procesos del ingenio, el azúcar que se produce y el azúcar usada por los clientes; en el ingenio donde se realiza la presente investigación, se ha determinado previamente que la turbidez afecta de una manera directa la calidad del azúcar blanco estándar, si la turbidez de la meladura clarificada está arriba de 2 000 UI, entonces el azúcar estándar final será de mala calidad y deberá de ser reclasificada como azúcar crudo, lo cual es una pérdida en el costo del proceso.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

El propósito de la presente investigación fue mostrar la relación de la turbidez del azúcar refino con la turbidez de las demás etapas del proceso y determinar cuál guarda una mayor relación con la misma. A continuación se resumen los materiales de los cuales se determinó la turbidez.

Tabla I. **Variable de análisis y materiales en los que se analiza**

Materiales de análisis	Variable a analizar
Turbidez de jugo claro	Turbidez
Turbidez meladura clarificada	
Azúcar para disolver	
Licor en disolución	
Licor filtrado	
Masa A	
Masa B	
Masa C	
Masa D	
Refino exportación	

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

La siguiente tabla resume la descripción y delimitación del campo de estudio de la presente investigación.

Tabla II. **Descripción de la delimitación y campo de estudio**

Pregrado	Ingeniería Química
Área o industria de aplicación de conocimientos	Industria azucarera
Ubicación	Escuintla, Guatemala
Orientación	Análisis técnico-científico de datos de turbidez de la zafra 2012 - 2013, del azúcar refino y los procesos de la fábrica involucrados en su producción, para un posterior análisis estadístico que permita realizar una toma de decisiones enfocada en la mejora del producto final.
Selección de muestra	Muestreo y análisis de los siguientes valores: turbidez de jugo clarificado, meladura clarificada, azúcar estándar para disolver, azúcar refino final, turbidez de licor en disolución, licor filtrado y masas A, B, C y D de los tachos de refinería. Para la selección de los materiales que fueron analizados se tomaron en cuenta, según la experiencia del jefe de fábrica y refinería, los procesos más significativos para la remoción de turbidez y color.

Fuente: elaboración propia.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador: Boanerges Elías Bámaca Saquic
- Asesor: Ing. Marco Tulio Romero Cortez
- Analista de laboratorio: analista de turno encargado de los análisis de clarificación y análisis de refinería.
- Ayudante de laboratorio: encargado de tomar las muestras en fábrica y refinería según su turno.

3.4. Recursos materiales disponibles

Los datos de turbidez se obtuvieron en el laboratorio de fábrica, tanto los insumos como los equipos son propiedad y de uso diario del ingenio.

3.4.1. Cristalería

- Beacker Kimax Kimble de 50 ml
- Matraz Pyrex de 50 ml
- Matraz de Erlenmeyer VWR tipo Kitasato de 500 ml

3.4.2. Equipo

- Balanza analítica Mettler PM4600, Delta Range. Con 0,01 g de incerteza, 110 V.
- Bomba Gast de vacío para laboratorio, con presión máxima de 4,08 bar/60 psi.
- Regulador de presión Gelman Sciences conectado a bomba Gast y matraz erlenmeyer tipo Kitasato con filtro

- Celda de espectrofotómetro de 1 y 2 cm para color y turbidez alta, 5 cm para color y turbidez media y 10 cm para color y turbidez baja.
- Espectrofotómetro Varain serie Cary 50 conc.
- Membrana con 47 mm de diámetro de área de filtración con poros de 0,45 μm , Millipore.
- Refractómetro Schmidt+haensch.

3.4.3. Reactivos

- Agua desmineralizada.

3.5. Técnica cuantitativa

El método de análisis de la turbidez es el mismo para todos los materiales que se analizan en esta investigación, la única variación es para la meladura clarificada que debe ser diluida en una proporción de 5 g de meladura con 95 g debido a que el color de la meladura es demasiado alto para que pase la onda de luz en el espectrofotómetro. Los materiales utilizados en esta investigación son: jugo claro, meladura clarificada, azúcar estándar para disolver, licor disuelto, licor filtrado, masas de refinera A, B, C y D; y como producto final de análisis, azúcar refino.

3.5.1. Análisis de turbidez de material seleccionado

El análisis descrito a continuación es tomado del procedimiento ICUMSA-GS 2/3 18 para la determinación de la turbidez en grados ICUMSA.

- Se toman 25 g de la muestra y se mezclan con 25 g de agua desmineralizada para así obtener una solución 1:1 con respecto al peso de la meladura y el agua.
- Se filtra al vacío la solución preparada en el inciso uno, utilizando la membrana de 0,45 μm .
- Se deben remover las burbujas de aire atrapadas, para esto se introduce un matraz de Erlenmeyer con la solución filtrada en un baño ultrasónico por un tiempo de tres minutos.
- Se mide el brix de la solución filtrada utilizando un refractómetro.
- Se llena de solución filtrada una celda de sección frontal cuadrada de 1 cm de paso, previamente asegurándose de que la celda no tenga manchas ni rajaduras. La celda debe ser lavada con la solución filtrada antes de tomar la muestra definitiva.
- Se ajusta el espectrofotómetro a 420 nm de longitud de onda.
- Se debe calibrar el espectrofotómetro con agua desmineralizada que sirve como blanco.
- Se coloca en el espectrofotómetro la celda con la solución filtrada y se determina la absorbancia de la solución.
- Se filtra nuevamente la solución con una membrana de 0,45 μm .
- Se vuelve a medir la absorbancia de la nueva solución.

Cálculos:

$$\text{Color}_1 = \frac{\text{Abs} \times 100}{L \times \rho}$$

Donde:

Abs = absorbancia de la solución 1

L = Largo de la celda [cm]

ρ = densidad de la solución de azúcar al vacío [g/ml]

Para la segunda medición de color:

$$\text{Color}_2 = \frac{\text{Abs} \times 100}{L \times \rho}$$

Donde:

Abs = absorbancia de la solución 1

L = Largo de la celda [cm]

ρ = densidad de la solución de azúcar al vacío [g/ml]

Y para calcular la turbidez:

$$\text{turbidez} = \text{Color}_1 - \text{Color}_2$$

3.5.2. Toma de muestras

Las muestras se tomaron cada dos horas por personal del laboratorio. Se toman muestras del jugo clarificado, meladura clarificada, azúcar para disolver, licor en disolución, licor filtrado y del azúcar refino de exportación. La única excepción son las muestras de las masas A, B, C y D de los tachos de refinería

que, son tomadas a las hora en que estos descargan y no son de análisis común en zafra, sino que fueron solicitados para el presente análisis.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Se debió justificar la cantidad de datos que se recolectaron en los días disponibles para la investigación; además los datos fueron presentados en tablas diseñadas de forma específica para cada tipo de muestra.

3.6.1. Muestreo

Se decidió sobre la cantidad de días para muestras los materiales luego de realizar algunas pruebas para mejorar los valores de turbidez y éstas no resultaron exitosas, por lo cual se decidió realizar un análisis en los días operativos que quedaban de operación en la refinera, en este caso 24 días.

Dado que los días de zafra son una limitante para la toma de muestras, se trabaja con los datos obtenidos totales para disminuir el error en el muestreo, a continuación se estima el error para 126 datos, que es un posible valor promedio del número de datos de turbidez de los distintos materiales.

$$E = \sqrt{\frac{Z^2 pq}{N}}$$

Donde:

E = Error estimado

Z = Confiabilidad

p = Probabilidad de éxito

q = Probabilidad de fracaso (1-p)

N = Tamaño de la muestra, número de datos recopilados

Se trabaja con un nivel de confianza del 95 %, 126 datos en promedio por material, y se establece un 95 % de probabilidad de que los datos sean tomados como correctos, los valores para la ecuación son:

Z = 1,96

p = 0,95

q = 0,05

N = 126

Entonces,

$$E = \sqrt{\frac{1,96^2(0,95)(0,05)}{126}} = 3,8$$

El análisis estadístico da un error de 3,8 % que es mucho menor al error del 10 % que se tiene como límite y permite hacer el análisis con los datos experimentales actuales.

Luego de obtener los datos totales de la turbidez de todos los materiales analizados, se realizó un análisis de error por material según el método descrito anteriormente, a continuación se muestra una tabla con el error de análisis por material.

Los resultados obtenidos están debajo del 10 % máximo permitido, por lo cual se procedió a realizar el resto del análisis estadístico.

Tabla III. **Análisis de error por material, total de datos, error promedio**

Material	Cantidad de datos	Error (%)
Azúcar refino	69	5,14
Jugo clarificado	144	3,56
Meladura clarificada	139	3,62
Azúcar para disolver	255	2,68
Licor en disolución	132	3,72
Licor filtrado	133	3,70
Masa A	136	3,66
Masa B	125	3,82
Masa C	93	4,43
Masa D	47	6,23
Total de datos		1273
Error promedio		4,05

Fuente: análisis estadístico por material, elaboración propia.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de información

El laboratorio reporta los datos de turbidez solicitados, por lo cual se tabulan de la siguiente manera, cada dato de turbidez reportado es un promedio de los análisis diarios de la turbidez que se toma cada dos horas diariamente, con excepción de las plantas de los tachos de refinería, que varían según se descargan las plantas respectivas.

Tabla IV. **Primera tabla de toma de datos de la turbidez en refinería y fábrica, materiales que se muestrean hasta seis veces por día**

Día	Corrida	Jugo clarificado	Meladura Clarificada	Licor en disolución	Licor filtrado	Masa A	Masa B
	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
	6						

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Segunda tabla de toma de datos de la turbidez en refinería y fábrica, azúcar estándar que se analiza hasta 12 veces por día**

Día	Corrida	Azúcar para disolver
	1	
	2	
	3	
	4	
	5	
	6	
	7	
	8	
	9	
	10	
	11	
	12	

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Tercera tabla de toma de datos de la turbidez en refinería y fábrica, azúcar estándar que se analiza 3 o 4 veces por día**

Día	Corrida	Masa C	Masa D	Azúcar refino
	1			
	2			
	3			
	4			

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

Cada serie de datos, por material, deberá de ser comparada de forma independiente con los valores de turbidez del azúcar refino, para obtener la correlación estadística de los mismos, siendo la turbidez del azúcar refino la variable dependiente para cada grupo de datos, de esta manera se obtendrá la pareja de datos que guarden mayor relación entre sí, y esto determinará cual es el material, y por lo tanto el proceso, que tiene mayor influencia en la turbidez final del azúcar refino.

Durante la zafra se mantiene un estricto control en las variables del proceso y se generan grandes cantidades de datos, obteniendo en algunos casos, hasta doce datos diarios por material. El propósito de la investigación es práctico y se busca evitar que los datos producidos en el laboratorio, produzcan demasiada varianza que pueda afectar el objetivo primario de la investigación, por lo cual se tomará cada serie de datos, por material, y se analizará su desviación estándar para obviar los datos que estén por encima o por debajo de tres desviaciones estándar.

Para determinar valores promedio se utiliza el concepto clásico que permite agrupar los resultados de eficiencia del sistema a través de las múltiples corridas realizadas por material.

La media (\bar{x}) se calcula de la siguiente manera:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

Donde:

\bar{x} : Es el valor promedio de las mediciones

x_i : Es cada una de las mediciones

n : Es el número de muestras

También se utilizará la medida de dispersión para discriminar los datos que se alejen demasiado del valor medio, ya que sólo se busca las tendencias y de esta manera se reducirá la varianza que pudiera afectar el análisis de correlación estadística.

La desviación estándar (σ) se calcula según la ecuación:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |\bar{x} - x_i|}{n}}$$

Donde:

σ : Es la desviación estándar

\bar{x} : Es el valor promedio de las mediciones

x_i : Es cada una de las mediciones

n : Es el número de muestras

La finalidad del análisis es determinar la influencia o correlación de una variable con otra, por lo cual los datos de la turbidez de cada material serán analizados juntos con los datos de la turbidez del azúcar refino utilizando el coeficiente de correlación de Pearson para un estadístico muestral.

$$r_{xy} = \frac{\sum x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{n s_x s_y}$$

Donde:

r_{xy} : Coeficiente de correlación de Pearson

x_i : Datos de la variable independiente, turbidez de materiales de fábrica

y_i : Datos de la variable dependiente, turbidez de azúcar refino

s_x, s_y : Desviación estándar de las variables x y y

n : Total de datos de la muestra

El coeficiente de correlación se interpreta de la siguiente manera:

- Si $r = 1$, el índice indica una dependencia total entre las dos variables: cuando una de ellas aumenta, la otra también lo hace en proporción constante.
- Si $0 < r < 1$, existe una correlación positiva.
- Si $r = 0$, no existe relación lineal. Pero pueden existir todavía relaciones no lineales entre las dos variables.
- Si $-1 < r < 0$, existe una correlación negativa.
- Si $r = -1$, existe una correlación negativa perfecta: cuando una de ellas aumenta, la otra disminuye en proporción constante.

3.9. Plan de análisis de los resultados

Se presenta la descripción del plan que se siguió para analizar los datos obtenidos y se incluye una tabla que resume los métodos de análisis.

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

Con los datos de turbidez se graficó la tendencia de cada uno de los materiales comparándolos con la tendencia de la turbidez del azúcar refino, con los cuales se visualizó la tendencia general de los datos y se obtuvo una idea

global de sus comportamientos, que luego se confirmó calculando un coeficiente de correlación múltiple donde la variable dependiente será la turbidez del azúcar refino.

Para reducir la dispersión de los datos, se prescindíó de los datos que sobrepasen el valor de tres desviaciones estándar para cada material, a partir de estos datos se obtuvieron las correlaciones de cada material con el azúcar refino, y de esta manera se determinó qué proceso es el más influye en la reducción de la turbidez final del azúcar refino.

Tabla VII. **Descripción de métodos analíticos de datos de turbidez**

Método	Tipo de análisis	Modelo	Justificación
Agrupación de datos	Ninguno	Tablas con los datos agrupados según el número de muestras por material.	Ordenamiento inicial.
Graficas de datos	Gráfico	Gráficas de turbidez contra día de zafra para cada material analizado.	Comparación gráfica de la tendencia de todas las series de datos.
Prueba de rechazo	Estadístico	Se obtiene el valor de la desviación estándar para cada serie de datos, y se rechazan los datos que estén fuera del rango ($\mu \pm 3\sigma$), donde μ es la media y σ la desviación estándar.	Eliminar datos que afecten el propósito del análisis debido a situaciones aisladas.
Correlación múltiple	Estadístico	Coeficiente de correlación donde la turbidez del azúcar refino se compara con la turbidez del resto de los materiales.	Comparación estadística de diferentes variables independientes con respecto a una variable dependiente, la turbidez del azúcar refino, para determinar cual tiene mayor relación con la misma.

Fuente: elaboración propia.

3.9.2. Programas a utilizar para análisis de datos

Debido a la gran cantidad de datos obtenidos para el análisis se crearon bases de datos y se utilizó el siguiente programa para ordenar los datos, realizar los múltiples análisis estadísticos y gráficos.

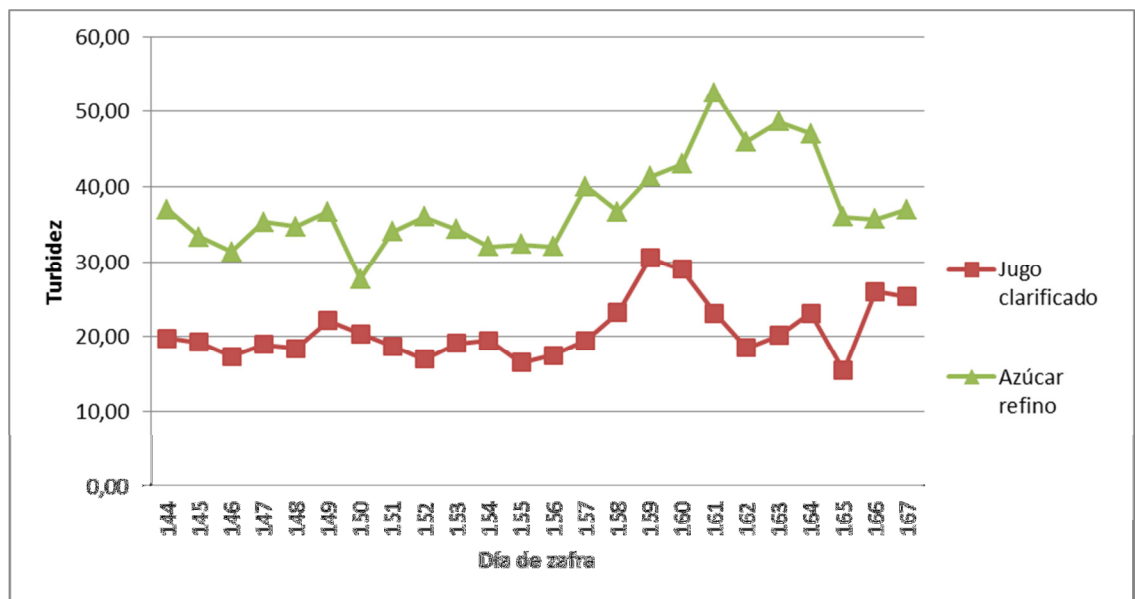
- Microsoft Excel

4. RESULTADOS

4.1. Resultados del jugo clarificado comparados con el azúcar refinado

Se muestran los resultados del jugo clarificado comparados con los del azúcar refinado y su respectivo coeficiente de correlación.

Figura 1. Comparación de la turbidez del jugo clarificado y del azúcar refinado



Fuente: elaboración propia, con datos de zafra 2012 – 2013.

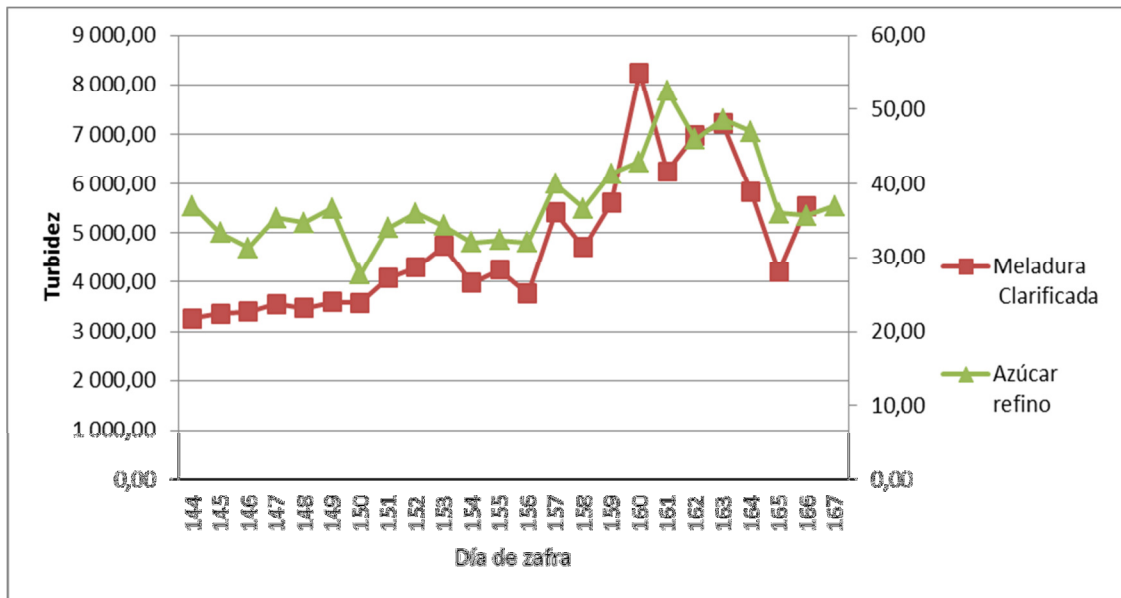
- Coeficiente de correlación: 0,394

La comparación de la turbidez de ambos materiales presenta una correlación lineal positiva relativamente baja.

4.2. Resultados de la meladura clarificada comparados con el azúcar refino

Se muestran los resultados de la meladura clarificada comparados con los del azúcar refino y su respectivo coeficiente de correlación.

Figura 2. **Comparación de la turbidez de la meladura clarificada y del azúcar refino**



Fuente: elaboración propia, con datos de zafra 2012 – 2013.

- Coeficiente de correlación: 0,788

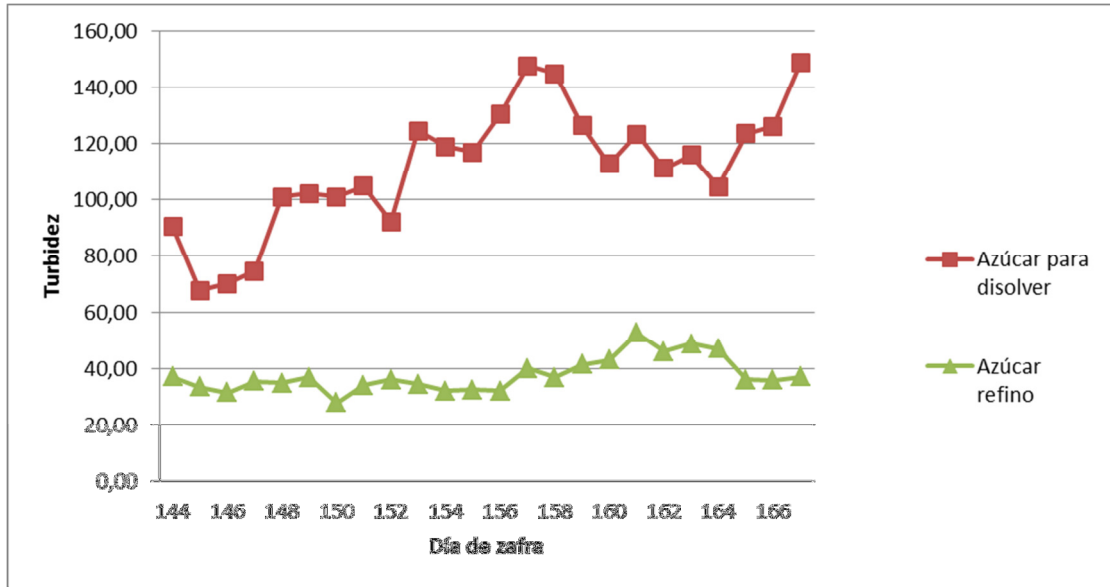
Debido a que la turbidez de meladura presenta valores de dos órdenes de magnitud mayor que la turbidez del azúcar refinado, se utilizan dos ejes verticales, el eje de la derecha para valores de turbidez del azúcar refinado y el eje de la izquierda para valores de turbidez de la meladura clarificada.

La comparación de la turbidez de ambos materiales presenta una correlación lineal positiva alta.

4.3. Resultados del azúcar estándar para disolver comparados con el azúcar refinado

Se muestran los resultados del azúcar estándar para disolver comparados con los del azúcar refinado y su respectivo coeficiente de correlación.

Figura 3. **Comparación de la turbidez del azúcar estándar para disolver y del azúcar refino**



Fuente: elaboración propia, con datos de zafra 2012 – 2013.

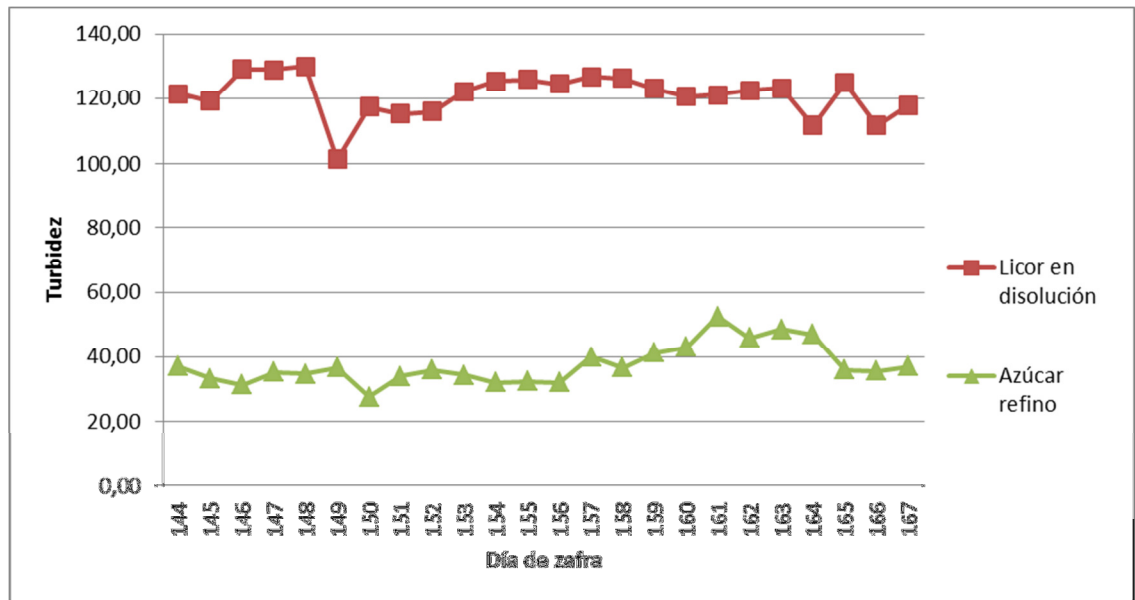
- Coeficiente de correlación: 0,235

La comparación de la turbidez de ambos materiales presenta una correlación lineal positiva baja.

4.4. **Resultados del licor en disolución comparados con el azúcar refino**

Se muestran los resultados del licor en disolución comparados con los del azúcar refino y su respectivo coeficiente de correlación.

Figura 4. **Comparación de la turbidez del licor en disolución y del azúcar refino**



Fuente: elaboración propia, con datos de zafra 2012 – 2013.

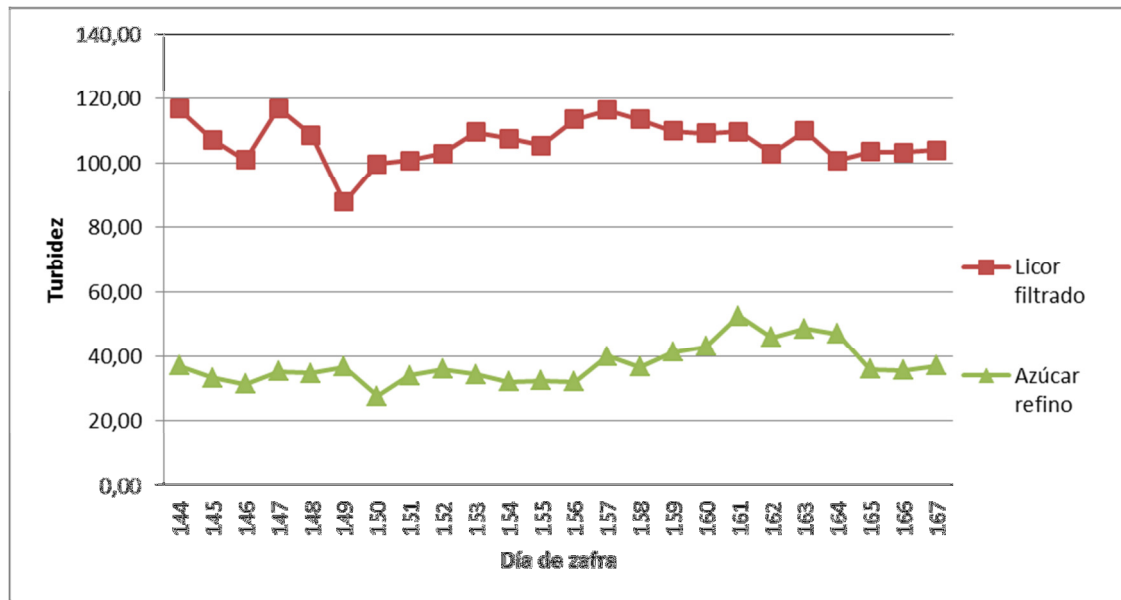
- Coeficiente de correlación: -0,108

La comparación de la turbidez de ambos materiales presenta una correlación lineal inversa muy baja, ya que su valor es negativo y cercano a cero.

4.5. **Resultados del licor filtrado de refinería comparados con el azúcar refino**

Se muestran los resultados del licor filtrado comparados con los del azúcar refino y su respectivo coeficiente de correlación.

Figura 5. **Comparación de la turbidez del licor filtrado y del azúcar refino**



Fuente: elaboración propia, con datos de zafra 2012 – 2013.

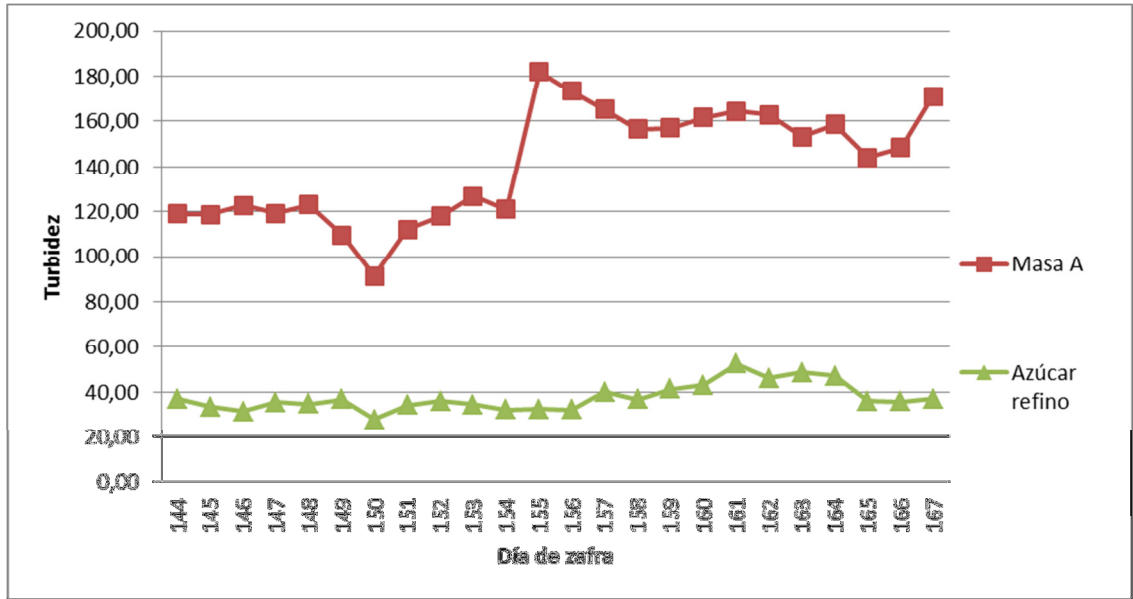
- Coeficiente de correlación: 0,124

La comparación de la turbidez de ambos materiales presenta una correlación lineal muy baja, ya que su valor es cercano a cero.

4.6. **Resultados de la masa A de refinera comparados con el azúcar refino**

Se muestran los resultados de la masa A de refinera comparados con los del azúcar refino y su respectivo coeficiente de correlación.

Figura 6. **Comparación de la turbidez de las masas A y del azúcar refino**



Fuente: elaboración propia, con datos de zafra 2012 – 2013.

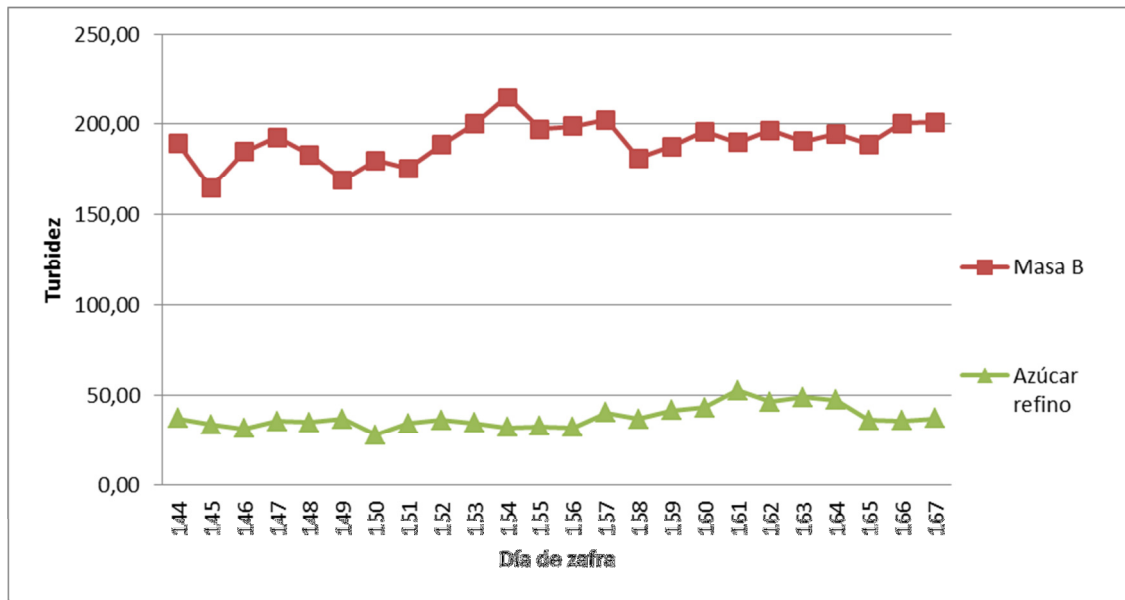
- Coeficiente de correlación: 0,508

La comparación de la turbidez de ambos materiales presenta una correlación lineal positiva media.

4.7. **Resultados de la masa B de refinería comparados con el azúcar refino**

Se muestran los resultados de la masa B de refinería comparados con los del azúcar refino y su respectivo coeficiente de correlación.

Figura 7. **Comparación de la turbidez de las masas B y del azúcar refino**



Fuente: elaboración propia, con datos de zafra 2012 – 2013.

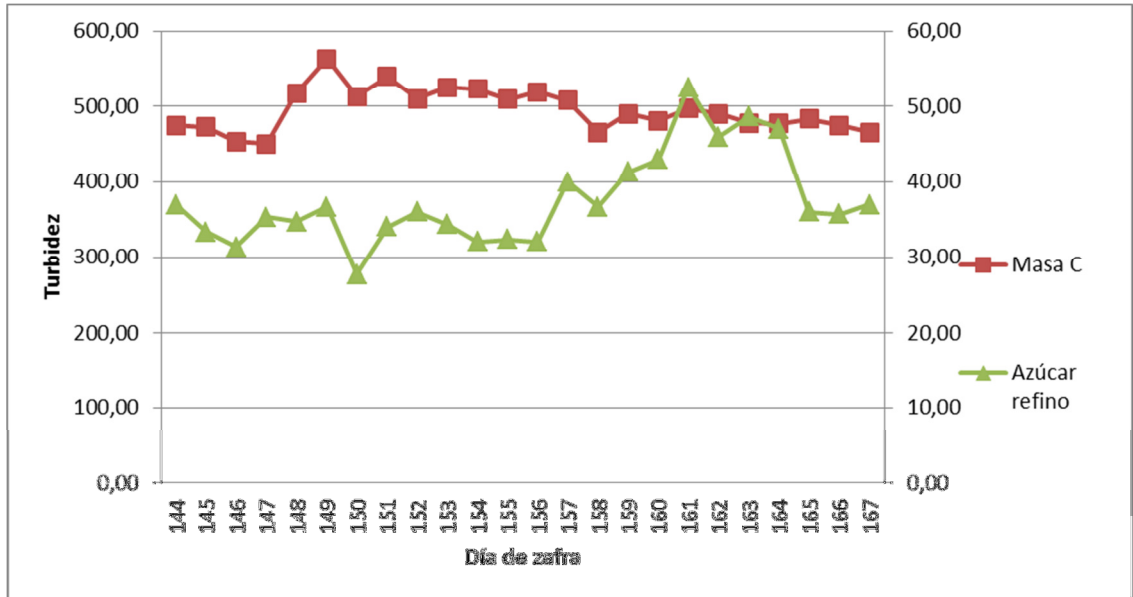
- Coeficiente de correlación: 0,132

La comparación de la turbidez de ambos materiales presenta una correlación lineal muy baja, ya que su valor es cercano a cero.

4.8. **Resultados de la masa C de refinería comparados con el azúcar refino**

Se muestran los resultados de la masa C de refinería comparados con los del azúcar refino y su respectivo coeficiente de correlación.

Figura 8. **Comparación de la turbidez de las masas C y del azúcar refino**



Fuente: elaboración propia, con datos de zafra 2012 – 2013.

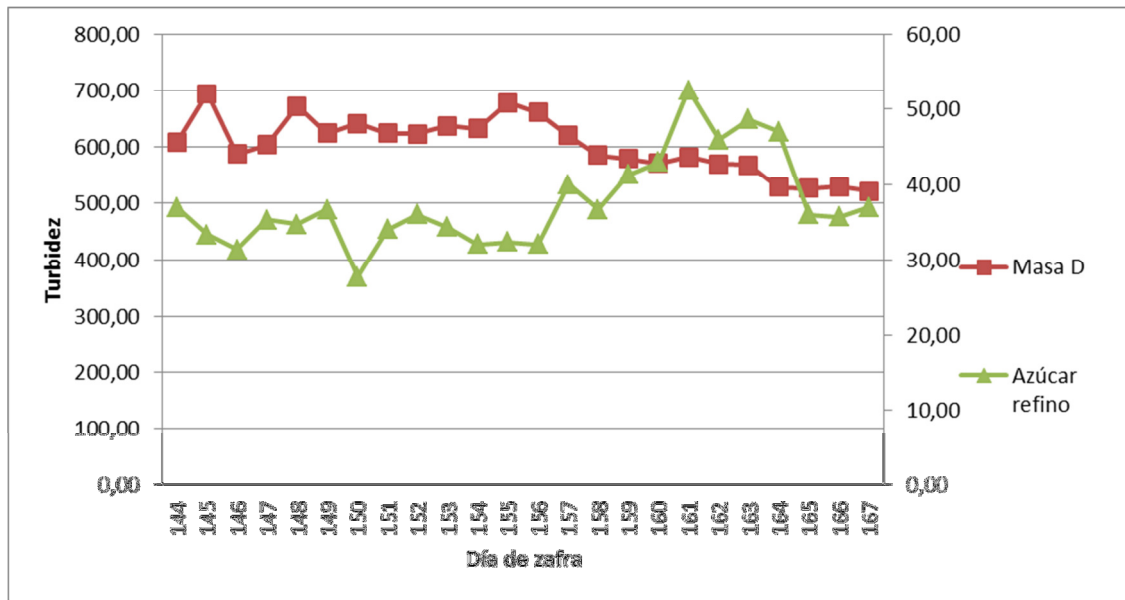
- Coeficiente de correlación: -0,206

La comparación de la turbidez de ambos materiales presenta una correlación lineal inversa baja.

4.9. **Resultados de la masa D de refinería comparados con el azúcar refino**

Se muestran los resultados de la masa D de refinería comparados con los del azúcar refino y su respectivo coeficiente de correlación.

Figura 9. **Comparación de la turbidez de las masas D y del azúcar refino**



Fuente: elaboración propia, con datos de zafra 2012 – 2013.

- Coeficiente de correlación: -0,519

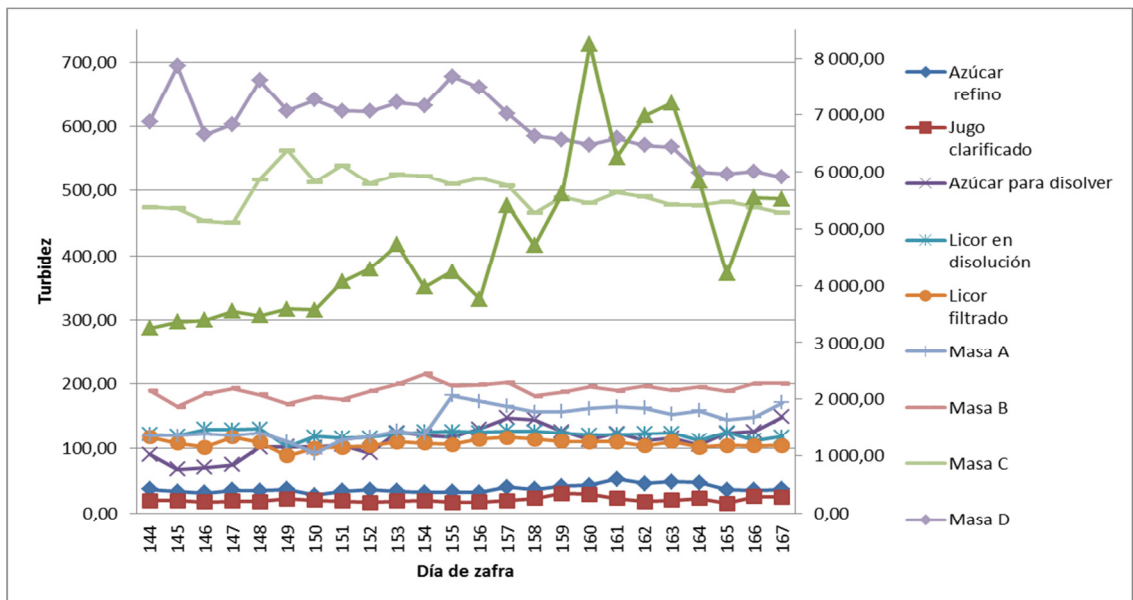
Debido a que la turbidez de las masas D presenta valores de un orden de magnitud mayor que la turbidez del azúcar refino, se utilizan dos ejes verticales, el eje de la derecha para valores de turbidez del azúcar refino y el eje de la izquierda para valores de turbidez de las masas D de refinería.

La comparación de la turbidez de ambos materiales presenta una correlación lineal inversa media.

4.10. Resultados totales de coeficientes de variación para todos los materiales analizados

La siguiente figura presenta un resumen gráfico de todos los resultados obtenidos para los distintos materiales utilizados.

Figura 10. Resumen gráfico de las tendencias de turbidez para todos los materiales analizados



Fuente: elaboración propia, con datos de zafra 2012 – 2013.

Tabla VIII. **Resumen de coeficientes de variación para todos los materiales analizados**

Material de fábrica o refinera	Coefficiente de correlación comparándolo con el azúcar refino
Azúcar refino	1,000
Jugo clarificado	0,394
<u>Meladura clarificada</u>	<u>0,788</u>
Azúcar para disolver	0,235
Licor en disolución	-0,108
Licor filtrado	0,124
Masa A	0,508
Masa B	0,131
Masa C	-0,206
Masa D	-0,519

Fuente: elaboración propia, con datos de zafra 2012 – 2013.

Como referencia se ha colocado el coeficiente de correlación del azúcar refino comparado con sí mismo, el cual lógicamente tiene una correlación lineal perfecta, luego de esto se ha subrayado en la tabla a la meladura clarificada, por ser el material que presenta el valor más alto de correlación con respecto al azúcar refino.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

5.1. Interpretación práctica del coeficiente de relación

El coeficiente de correlación de Pearson provee una medida de que tanto se relacionan dos variables cuantitativas aleatorias de una manera lineal, y al contrario de la covarianza es independiente de la magnitud de los valores de dichas variables.

Entonces, lo que se busca con el cálculo del coeficiente de correlación para la turbidez de cada material comparado con la turbidez del azúcar refinado, es determinar la turbidez de que material es directamente proporcional a la turbidez del azúcar refinado y se debe buscar reducir de manera inmediata, para mejorar los valores de turbidez final en el azúcar refinado.

Cada uno de los materiales analizados representa una etapa dentro del proceso de fabricación del azúcar refinado, por lo cual cada uno cumple un propósito para alcanzar los parámetros finales de calidad del azúcar refinado. Se espera que una de las etapas muestre una correlación mayor para poder realizar las modificaciones convenientes a la misma, con lo cual se podrán ver los resultados directos de dicha modificación, además se debe tener en cuenta que cualquier tipo de alteración a los equipos o al proceso en sí, incurre en un costo de fabricación y mano de obra.

5.2. Análisis comparativos por materiales

Con base en los resultados obtenidos, se pudieron clasificar los materiales de fabricación en tres categorías, según los coeficientes de correlación obtenidos.

5.2.1. Materiales con bajo coeficiente de correlación con respecto al azúcar refinado

Los materiales que tienen bajos coeficientes de correlación con respecto al azúcar refinado son:

- Jugo clarificado, con coeficiente de 0,394
- Azúcar blanco estándar para disolver, con coeficiente de 0,235
- Licor en disolución, con coeficiente de -0,108
- Licor filtrado, con coeficiente de 0,124
- Masa B, con coeficiente de 0,131
- Masa C, con coeficiente de -0,206

De estos materiales el que posee la correlación más alta es el jugo clarificado. La etapa de clarificación de jugo está asociada con la reducción de color en el azúcar blanco estándar y de manera secundaria, con la reducción de color en el azúcar refinado si se está refinando a partir de azúcar blanco estándar, el cual es el caso para el ingenio donde se realizó el estudio.

El azúcar blanco estándar, el licor en disolución y el licor filtrado presentan coeficientes bajos. De estos materiales, el licor filtrado ya ha pasado por un filtro con carbón activado, que sirve para eliminar impurezas disueltas causantes del color.

Tanto las masas B y C también poseen coeficientes de correlación bajos. Se sabe que existe una relación entre el color y la turbidez del azúcar y el proceso de tachos, pero según lo analizado no es una relación lineal y realizar cambios requeriría investigaciones específicas.

5.3. Materiales con coeficiente de correlación medio con respecto al azúcar refino

Los materiales que tienen coeficientes de correlación de valor medio con respecto al azúcar refino son:

- Masa A, con coeficiente de 0,508
- Masa D, con coeficiente de -0,519

Los valores del coeficiente de correlación para estas dos masas son considerablemente altos, y en un futuro se puede buscar realizar estudios para determinar si es factible económicamente agregar algún producto químico que reaccione con las impurezas que causan la turbidez en el tacho que lleve dichas masas.

Se debe mencionar que el proceso de tachos depende en gran manera de la habilidad del tachero a cargo del mismo, ya que no es un proceso que se haya logrado automatizar por completo y la descarga de las templas depende de la consistencia y granulometría observada por el tachero de turno, por lo cual para implementar una mejora, primero habría que trabajar en conjunto con el departamento de automatización, en un método que permita uniformidad de parámetros en la descarga.

5.4. Material seleccionado para buscar una mejora en la turbidez del azúcar refino

El material con el coeficiente de correlación más alto con respecto al azúcar refino es la:

- Meladura clarificada, con coeficiente de 0,788

Basado en el valor alto del coeficiente de correlación con respecto a la turbidez del azúcar refino, la clarificación de meladura es el proceso que más está influyendo en los valores altos de la turbidez final del refino. No se debe interpretar que la clarificación de meladura está generando turbidez alta, sino más bien que no está eliminando las impurezas insolubles de manera óptima.

Para que la floculación ocurra de manera adecuada en los talos, se debe de llegar a una temperatura de 185 °F; luego de investigar en las distintas áreas de fábrica y refinería, se observó que ha existido la problemática en la última zafra para alcanzar esta temperatura, debido a una búsqueda constante de ahorro de vapor.

El análisis realizado deja la puerta abierta a muchas otras opciones de cambio, pero a la vez permite seleccionar a la clarificación de meladura como la etapa que al modificarse debería producir resultados de manera directa, otra ventaja de esta selección es que el proceso de clarificación de meladura es relativamente versátil al contar con equipos de aireación micronizada variable, alimentación de floculante variable, calentadores de coraza y tubo propios y tanques de clarificación de fácil acceso.

CONCLUSIONES

1. La relación entre la turbidez de la meladura clarificada y la turbidez del azúcar refino es directa y cuantificable, y se puede medir un coeficiente de correlación lineal entre ambas variables de 0,788.
2. Prácticamente no existe una correlación lineal entre la turbidez del azúcar refino y las turbideces del jugo clarificado, azúcar estándar para disolver, el licor en disolución, el licor filtrado y las masas B y C de tachos de refinería.
3. Las masas A de refinería presentan un coeficiente de correlación de 0,508 con respecto al azúcar refino, lo que se concluye es indicativo de la manera en que el proceso de tachos de primera, puede afectar en reducir o aumentar la turbidez y el color del azúcar refino.
4. Según las tendencias gráficas y el coeficiente de clarificación entre la turbidez de la meladura clarificada y la turbidez del azúcar refino, el proceso que es más conveniente modificar para producir mejoras es la clarificación de meladura.

RECOMENDACIONES

1. Modificar la línea de vapor de los calentadores de meladura clarificada de la actual que funciona con vapor vegetal, del segundo efecto de evaporación, a 5 psig (227,10 °F según tablas de vapor) a una línea de vapor vegetal de primer efecto a 10 psig (239,36 °F según tablas de vapor), para mantener la temperatura de 185 °F recomendada como óptima para la aplicación del floculante.
2. Instalar una tubería auxiliar con válvula automática reguladora conectada al vapor de escape de calderas que entra a los evaporadores, de 20 a 25 psig (258,74 a 266,76 °F, según tablas de vapor), para mantener en caso de que no se logre la temperatura de 185 °F por pérdidas de calor en la tubería.
3. Invertir en filtros pulidores adicionales a los filtros de carbón activado y tierras diatomeas, con cartuchos capaces de detener toda partícula generadora de turbidez que aún permanezca en el licor de refinería.
4. Buscar un cambio de todo elemento filtrante, filtros de carbón, tierras diatomeas, pulidores, hacia materiales resistentes a la corrosión, como el acero inoxidable en elementos que todavía no lo sean como pernos, tornillos, marcos de filtros y otros materiales.

BIBLIOGRAFÍA

1. CHEN, James C.P. *Manual del azúcar de caña*. México: Noriega, 1991. 200 p.
2. HUGOT, E. *Handbook of cane sugar engineering*. 2a ed. Holanda: Elsevier, 1979. 1079 p.
3. LARRAHONDO, Jesús E.; RAMOS R., Aulio A. *Calidad de la caña y procesos de fábrica para obtención del azúcar*. Guatemala: Cengicaña, 2012. Curso – taller.
4. MALTEZ ROBERTI, Vinicio. *Análisis de remoción de turbidez como un indicador de eficiencia de la clarificación de meladura y su influencia en el color del azúcar, blanco estándar en un ingenio azucarero guatemalteco*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2011. 113 p.
5. REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. Alemania: Bartens, 2012. 880 p.
6. WALPOLE, Ronald E. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. 6a ed. México: Prentice-Hall Hispanoamérica, 1999. 739 p.

ANEXOS

Anexo 1. **Fotografías de equipo utilizado en el laboratorio para medir la turbidez de los distintos materiales**

Figura A1. **Baño ultrasónico para remover burbujas**



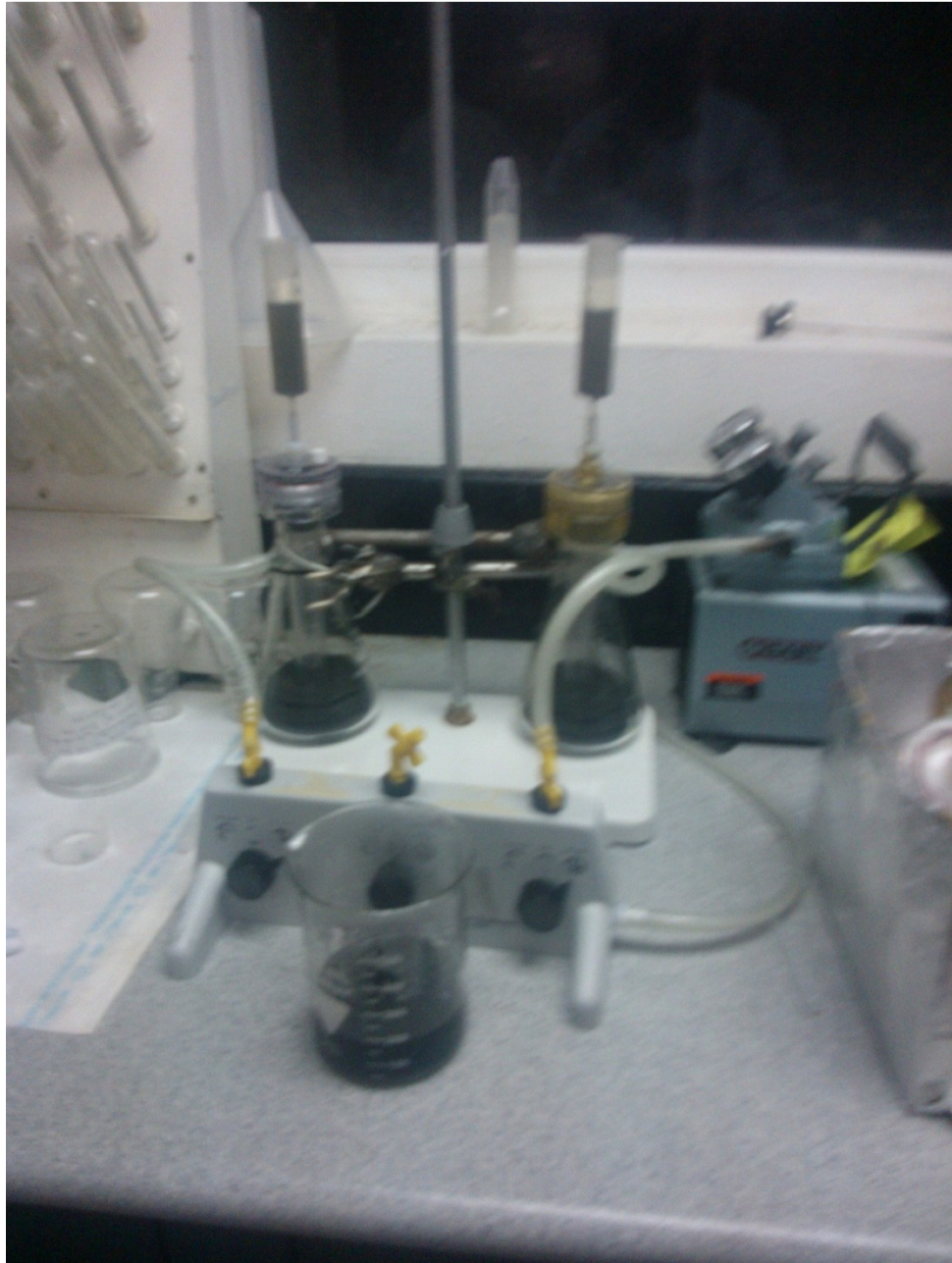
Fuente: laboratorio de fábrica del ingenio.

Figura A2. **Refractómetro del laboratorio industrial**



Fuente: laboratorio de fábrica del ingenio.

Figura A3. Sistema de filtración al vacío para análisis de turbidez



Fuente: laboratorio de fábrica del ingenio.

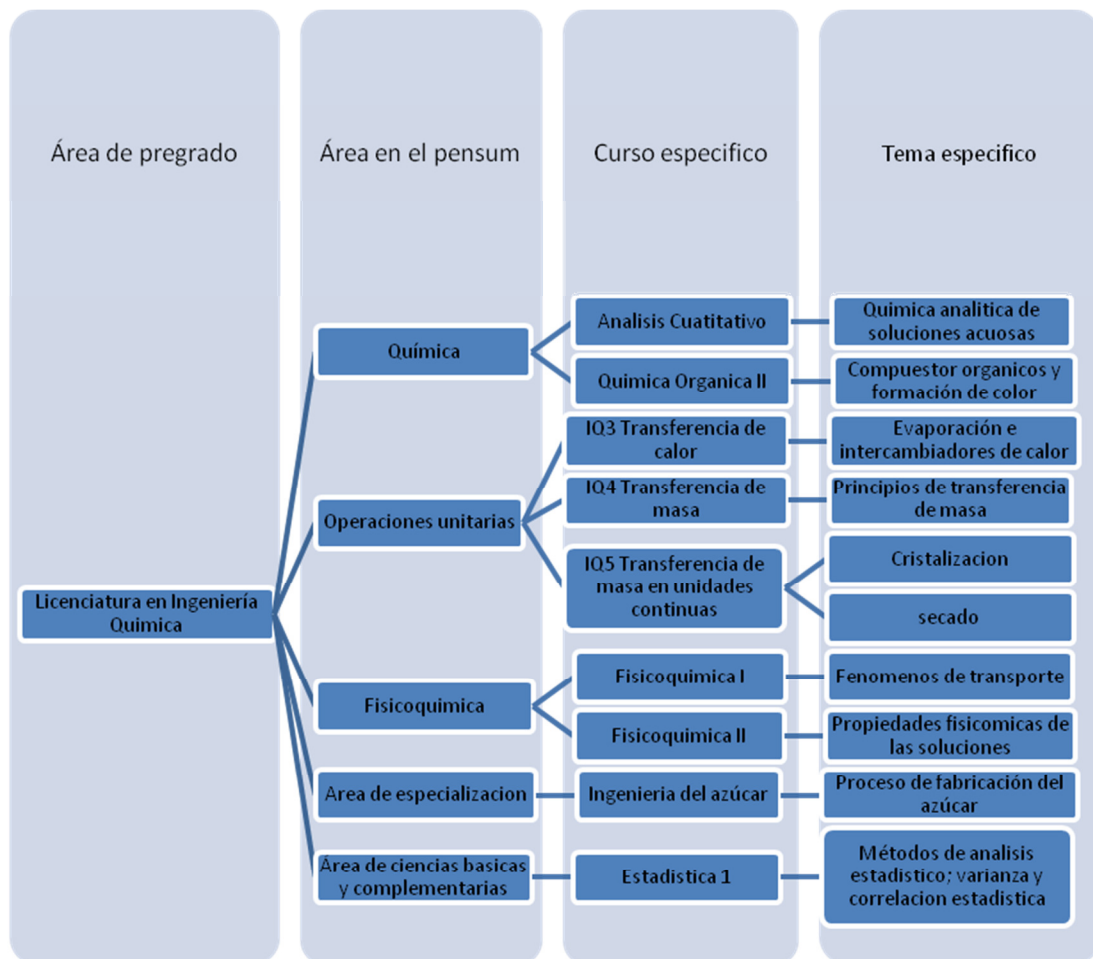
Figura A4. Filtro de 45 μm



Fuente: laboratorio de fábrica del ingenio.

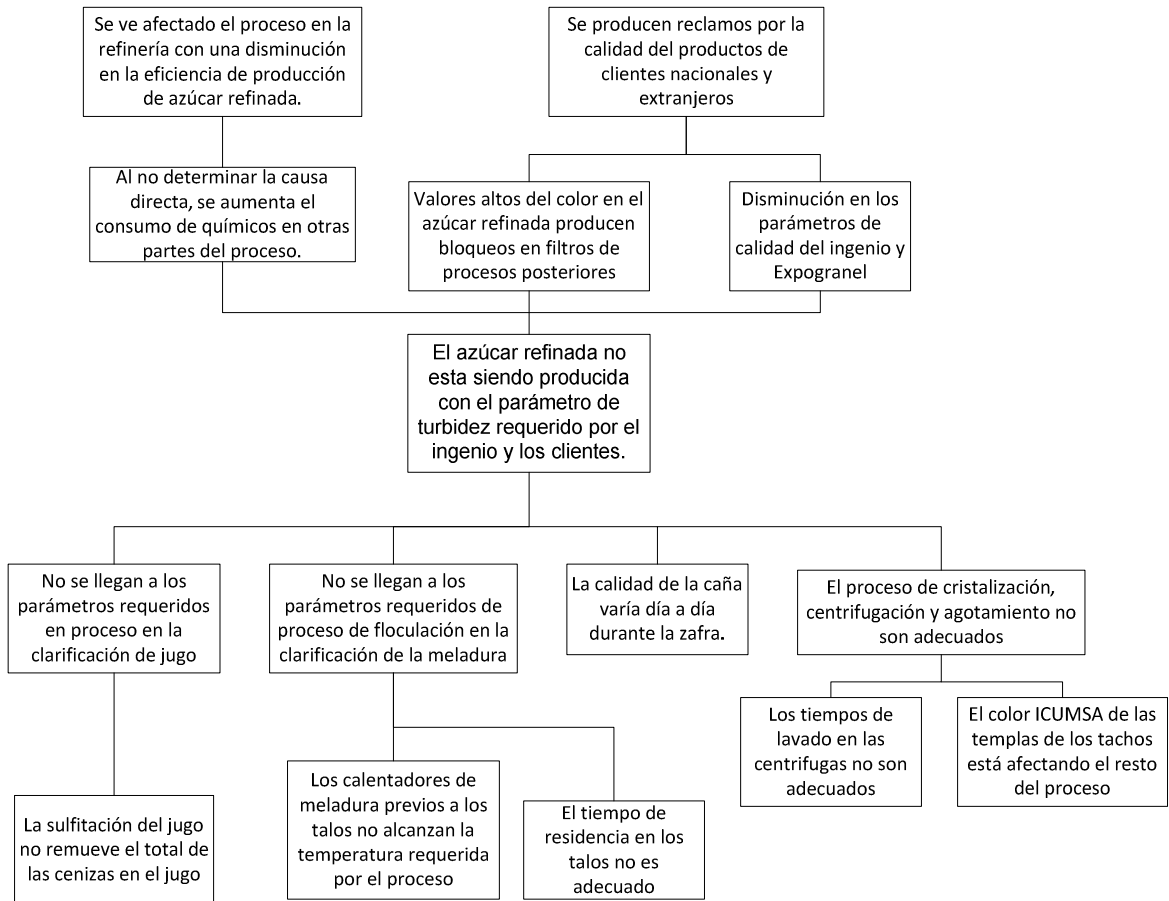
APÉNDICES

Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos**



Fuente: elaboración propia, a partir de pensum de Ingeniería Química.

Apéndice 2. Árbol de problemas



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Tablas de datos originales**

Tabla B1. **Datos de materiales que se muestrean 6 veces al día durante la zafra**

Día	Corrida	Turbidez					
		Jugo clarificado	Meladura Clarificada	Licor en disolución	Licor filtrado	Masa A	Masa B
144	1	15,47	2 174,00	100	106	112	181
	2	16,43	3 022,00	118	110	115	184
	3	17,9	3 244,00	120	112	118	188
	4	22,53	3 428,00	126	122	120	192
	5	22,65	3 667,00	131	125	122	193
	6	23,59	4 012,00	134	125	126	200
145	1	16,27	3 164,00	107	100	109	143
	2	17,97	3 204,00	107	103	117	151
	3	19,18	3 284,00	119	103	118	166
	4	19,69	3 342,00	124	111	124	169
	5	20,6	3 566,00	127	112	126	175
	6	21,64	3 620,00	131	114		186
146	1	15,64	3 111,00	121	87	118	181
	2	16,23	3 164,00	127	98	122	183
	3	16,97	3 288,00	128	102	124	187
	4	17,84	3 417,00	130	103	127	188
	5	18,64	3 576,00	130	106		
	6	18,8	3 814,00	139	110		
147	1	16,7	3 263,00	124	108	111	186
	2	17,67	3 406,00	127	115	115	188
	3	18,4	3 429,00	129	116	117	192
	4	18,86	3 570,00	129	119	122	193
	5	19,24	3 704,00	131	120	123	196
	6	22,8	3 964,00	134	123	127	202

Continuación de la tabla B1.

148	1	14,87	3 284,00	117	102	114	177
	2	15,28	3 316,00	128	107	116	177
	3	16,4	3 394,00	130	107	122	184
	4	19,64	3 438,00	132	109	126	187
	5	20,74	3 678,00	136	112	128	192
	6	23,4	3 717,00	137	115	132	
149	1	11,12	3 266,00	96	80	101	160
	2	14,6	3 474,00	98	81	104	167
	3	18,66	3 562,00	101	91	109	169
	4	25,16	3 611,00	102	91	109	171
	5	27,97	3 816,00	110	96	115	172
	6	35,01	3 827,00			119	176
150	1	15	3 262,00	108	94	84	168
	2	15,46	3 306,00	114	98	88	176
	3	16,74	3 342,00	117	100	89	180
	4	20,77	3 453,00	120	103	93	188
	5	24,31	3 513,00	128	104	96	189
	6	29,79	4 591,00			98	
151	1	15,2	3 179,00	109	96	92	166
	2	16,11	3 327,00	112	98	107	169
	3	16,31	3 476,00	114	99	108	174
	4	18,64	4 693,00	116	101	119	177
	5	21,97	4 800,00	120	102	121	179
	6	24,02	4 946,00	121	109	126	189
152	1	11,66	3 978,00	111	99	114	176
	2	13,64	4 086,00	112	99	115	180
	3	14,77	4 169,00	113	103	118	184
	4	16,26	4 316,00	118	104	121	192
	5	19,55	4 336,00	118	106	124	197
	6	25,68	4 910,00	124	107	116	203
153	1	17,2	4 412,00	118	101	120	192
	2	18,22	4 646,00	120	107	124	197
	3	18,78	4 676,00	124	109	124	203
	4	19,79	4 839,00	127	112	129	208
	5	19,88	4 847,00		119	132	
	6	20,66	4 962,00			132	

Continuación de la tabla B1.

154	1	16,76	3 477,00	107	99	109	189
	2	17,9	3 656,00	117	104	114	216
	3	19,73	4 070,00	128	109	118	224
	4	20,19	4 098,00	131	110	124	231
	5	20,85	4 204,00	144	116	127	244
	6	21,14	4 359,00			134	
155	1	14,87	3 476,00	114	99	169	115
	2	15,88	3 677,00	119	101	176	186
	3	16,09	4 147,00	122	104	182	198
	4	17,47	4 510,00	124	108	188	208
	5	18,11	4 658,00	127	109	194	
	6	50,88	5 011,00	149	112		
156	1	14,86	3 426,00	114	103	162	184
	2	15,88	3 610,00	118	108	164	192
	3	16,27	3 674,00	121	112	166	197
	4	17,11	3 816,00	124	113	178	209
	5	18,66	3 868,00	132	120	183	212
	6	22,09	4 176,00	138	125	186	
157	1	16,73	3 426,00	114	109	150	187
	2	18,06	3 864,00	120	109	159	194
	3	18,76	4 281,00	124	114	162	196
	4	19,76	5 793,00	131	117	166	200
	5	21,59	6 810,00	133	122	173	217
	6	21,66	8 280,00	139	127	181	220
158	1	16,32	3 595,00	118	103	143	165
	2	19,27	3 704,00	121	108	152	173
	3	22,7	3 798,00	128	116	156	180
	4	22,95	4 314,00	130	116	158	188
	5	23,4	6 029,00	134	124	161	200
	6	34,6	6 835,00			169	
159	1	22,68	3 962,00	108	98	141	173
	2	30,17	4 263,00	112	102	150	178
	3	30,32	5 170,00	114	107	153	187
	4	30,67	5 418,00	129	110	159	192
	5	34,33	7 214,00	132	119	167	196
	6	34,78	7 591,00	143	124	172	201

Continuación de la tabla B1.

160	1	20,03	7 966,00	114	102	147	177
	2	22,06	8 079,00	117	108	158	186
	3	27,11	8 164,00	118	108	162	189
	4	32,8	8 427,00	120	111	163	196
	5	42,98	8 553,00	126	112	166	208
	6	49,66	9 964,00	129	114	174	220
161	1	17,06	4 940,00	114	102	152	184
	2	18,64	5 644,00	118	108	160	186
	3	18,9	6 138,00	120	109	164	188
	4	20,89	6 426,00	122	110	167	194
	5	22,13	6 978,00	122	110	171	197
	6	41,18	7 411,00	131	119	173	
162	1	15,62	6 596,00	114	96	142	186
	2	15,77	6 697,00	120	98	158	189
	3	17	6 896,00	121	101	161	193
	4	18,66	7 040,00	121	102	167	195
	5	20,66	7 253,00	126	107	171	201
	6	22,95	7 418,00	133	114	178	216
163	1	18,17	6 042,00	113	99	146	182
	2	18,94	7 104,00	118	105	146	188
	3	19,22	7 315,00	121	108	149	191
	4	20,06	7 686,00	123	113	151	194
	5	21,02	7 933,00	130	116	159	198
	6	23,59	9 842,00	134	118	168	
164	1	16,1	4 002,00	103	90	168	187
	2	17,61	4 190,00	107	98	149	190
	3	22,41	6 386,00	108	101	153	193
	4	24,77	6 537,00	112	102	158	197
	5	27,41	6 701,00	114	106	160	199
	6	30,17	7 165,00	126	108	164	203
165	1	10,29	4 011,00	114	94	168	174
	2	15,06	4 158,00	119	99	121	187
	3	15,26	4 165,00	122	107	138	189
	4	16,37	4 166,00	126	108	144	196
	5	16,82	4 324,00	143	110	145	199
	6	18,74	4 440,00			149	

Continuación de la tabla B1.

166	1	21,68	4 875,00	108	100	139	192
	2	23,75	5 249,00	110	101	142	198
	3	24,1	5 562,00	110	102	148	204
	4	26,97	5 724,00	112	104	150	206
	5	29,66	5 896,00	114	106	154	210
	6	29,72	5 976,00	116	107	157	193
167	1	20,33	5 516,00	118	104	161	201
	2	26,36				181	
	3	29,19					
	4	46,69					
	5	48,1					
	6	58,6					

Fuente: elaboración propia, a partir de datos obtenidos por el laboratorio industrial del ingenio.

Tabla B2. **Datos del azúcar blanco estándar para disolver**

Día	Corrida	Turbidez azúcar para disolver
144	1	85
	2	85
	3	86
	4	88
	5	89
	6	90
	7	91
	8	91
	9	92
	10	93
	11	94
	12	97
145	1	58
	2	59
	3	63
	4	64
	5	66
	6	67
	7	67
	8	69
	9	71
	10	72
	11	87
	12	

Continuación de la tabla B2.

146	1	62
	2	64
	3	68
	4	69
	5	70
	6	71
	7	72
	8	76
	9	77
	10	
	11	
	12	
147	1	63
	2	69
	3	70
	4	71
	5	73
	6	74
	7	75
	8	77
	9	78
	10	80
	11	81
	12	82

Continuación de la tabla B2.

148	1	86
	2	86
	3	92
	4	93
	5	96
	6	98
	7	101
	8	106
	9	110
	10	110
	11	110
	12	122
149	1	88
	2	94
	3	98
	4	99
	5	100
	6	102
	7	102
	8	104
	9	109
	10	123
	11	
	12	

Continuación de la tabla B2.

150	1	91
	2	92
	3	97
	4	99
	5	100
	6	100
	7	101
	8	101
	9	108
	10	119
	11	
	12	
151	1	77
	2	86
	3	93
	4	99
	5	104
	6	106
	7	108
	8	109
	9	116
	10	120
	11	132
	12	

Continuación de la tabla B2.

152	1	0,98
	2	87
	3	90
	4	93
	5	97
	6	97
	7	99
	8	102
	9	103
	10	106
	11	107
	12	121
153	1	104
	2	108
	3	109
	4	112
	5	117
	6	121
	7	131
	8	137
	9	180
	10	
	11	
	12	

Continuación de la tabla B2.

154	1	104
	2	110
	3	113
	4	114
	5	118
	6	121
	7	128
	8	130
	9	131
	10	
	11	
	12	
155	1	148
	2	101
	3	104
	4	109
	5	110
	6	112
	7	114
	8	116
	9	119
	10	119
	11	124
	12	124

Continuación de la tabla B2.

156	1	136
	2	97
	3	108
	4	110
	5	119
	6	130
	7	134
	8	138
	9	139
	10	142
	11	151
	12	158
157	1	180
	2	109
	3	112
	4	118
	5	120
	6	126
	7	128
	8	128
	9	146
	10	194
	11	201
	12	208

Continuación de la tabla B2.

158	1	231
	2	118
	3	123
	4	131
	5	133
	6	134
	7	139
	8	141
	9	153
	10	
	11	
	12	
159	1	177
	2	87
	3	92
	4	106
	5	112
	6	118
	7	119
	8	123
	9	124
	10	132
	11	156
	12	168

Continuación de la tabla B2.

160	1	
	2	98
	3	108
	4	109
	5	114
	6	114
	7	116
	8	118
	9	123
	10	
	11	
	12	
161	1	127
	2	137
	3	151
	4	103
	5	109
	6	112
	7	116
	8	118
	9	124
	10	128
	11	130
	12	

Continuación de la tabla B2.

162	1	131
	2	142
	3	142
	4	96
	5	97
	6	97
	7	99
	8	100
	9	102
	10	106
	11	108
	12	
163	1	112
	2	114
	3	124
	4	90
	5	100
	6	112
	7	114
	8	119
	9	124
	10	124
	11	126
	12	131

Continuación de la tabla B2.

164	1	132
	2	133
	3	144
	4	80
	5	83
	6	86
	7	90
	8	96
	9	97
	10	100
	11	100
	12	112
165	1	121
	2	143
	3	162
	4	93
	5	108
	6	113
	7	118
	8	125
	9	128
	10	
	11	
	12	

Continuación de la tabla B2.

166	1	130
	2	132
	3	147
	4	101
	5	110
	6	112
	7	120
	8	126
	9	128
	10	130
	11	136
	12	139
167	1	142
	2	152
	3	168
	4	138
	5	143
	6	
	7	
	8	
	9	
	10	
	11	
	12	

Fuente: elaboración propia, a partir de datos obtenidos por el laboratorio industrial del ingenio.

Tabla B3. **Datos de materiales que se muestrean hasta 4 veces al día durante la zafra**

Día	Turbidez			Azúcar refino
	Corrida	Masa C	Masa D	
144	1	461	583	36
	2	473	632	36
	3	476		39
	4	488		
145	1	504	680	31
	2	442	696	33
	3	461	706	36
	4	484		
146	1	496	578	28
	2	404	597	31
	3	442		35
	4	471		
147	1	475	588	33
	2	430	619	35
	3	446		38
	4	451		
148	1	474	662	33
	2	512	682	35
	3	538		36
	4	547		
149	1	569	624	36
	2	530		36
	3	571		38
	4	583		
150	1	502	631	27
	2	538	652	27
	3	499		29
	4			

Continuación de la tabla B3.

151	1	523	616	31
	2	530	632	31
	3	539		40
	4	566		
152	1	500	610	34
	2	508	637	36
	3	512		38
	4	521		
153	1	500	603	33
	2	531	671	35
	3	544		35
	4			
154	1	501	621	30
	2	516	644	31
	3	526		35
	4	548		
155	1	497	670	17
	2	507	686	37
	3	516		43
	4	518		
156	1	478	641	30
	2	510	680	32
	3	528		34
	4	559		
157	1	500	614	38
	2	502	626	40
	3	512		42
	4	518		
158	1	450	570	34
	2	460	601	35
	3	468		41
	4	485		

Continuación de la tabla B3.

159	1	477	561	39
	2	480	598	41
	3	492		44
	4	510		
160	1	472	564	37
	2	473	579	43
	3	481		49
	4	498		
161	1	490	570	51
	2	493	594	54
	3	498		
	4	508		
162	1	526	564	44
	2	469	577	46
	3	478		48
	4	488		
163	1	498	562	41
	2	466	574	50
	3	470		55
	4	478		
164	1	489	526	46
	2	462	531	46
	3	476		49
	4	483		
165	1	492	503	35
	2	497	549	37
	3	466		36
	4	477		
166	1	488	512	35
	2	457	548	35
	3	473		37
	4	481		

Continuación de la tabla B3.

167	1	486	521	37
	2	449		
	3	462		
	4			

Fuente: elaboración propia, a partir de datos obtenidos por el laboratorio industrial del ingenio.

Apéndice 4. Gráficas de la prueba de rechazo

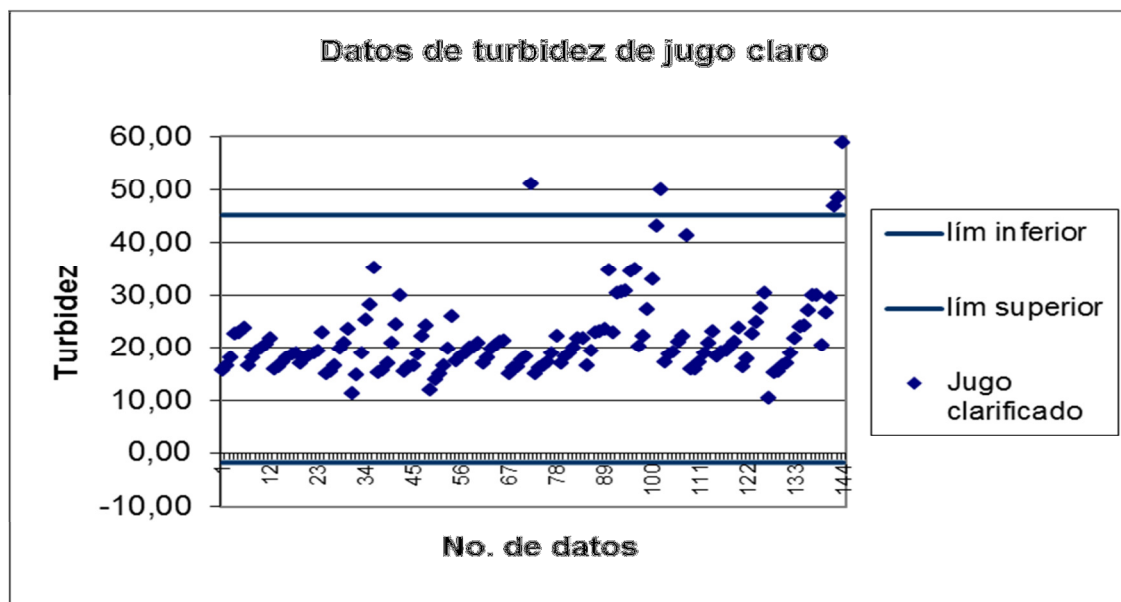
Se eliminaron algunos datos del muestreo original al salirse de un rango con límites de $\bar{x} \pm 3\sigma$

Donde:

\bar{x} : Media aritmética por material

σ : Desviación estándar

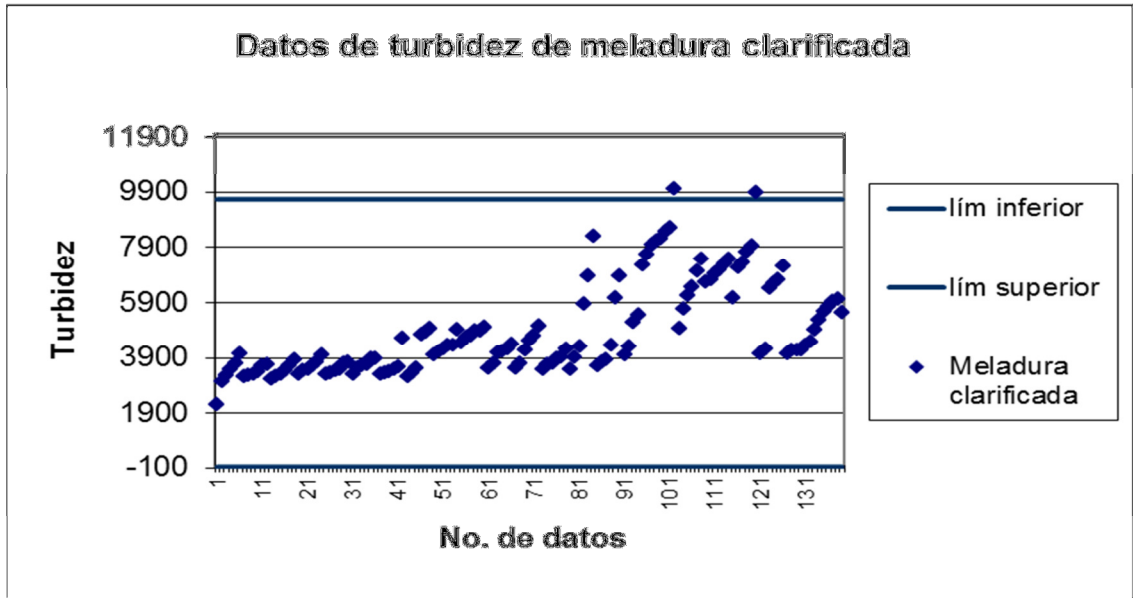
Figura B1. Prueba de rechazo del jugo clarificado



Fuente: datos calculados.

- Media: 21,66 UI
- Desviación estándar: 7,83 UI
- Límite inferior: -1,84 UI
- Límite superior: 45,17 UI

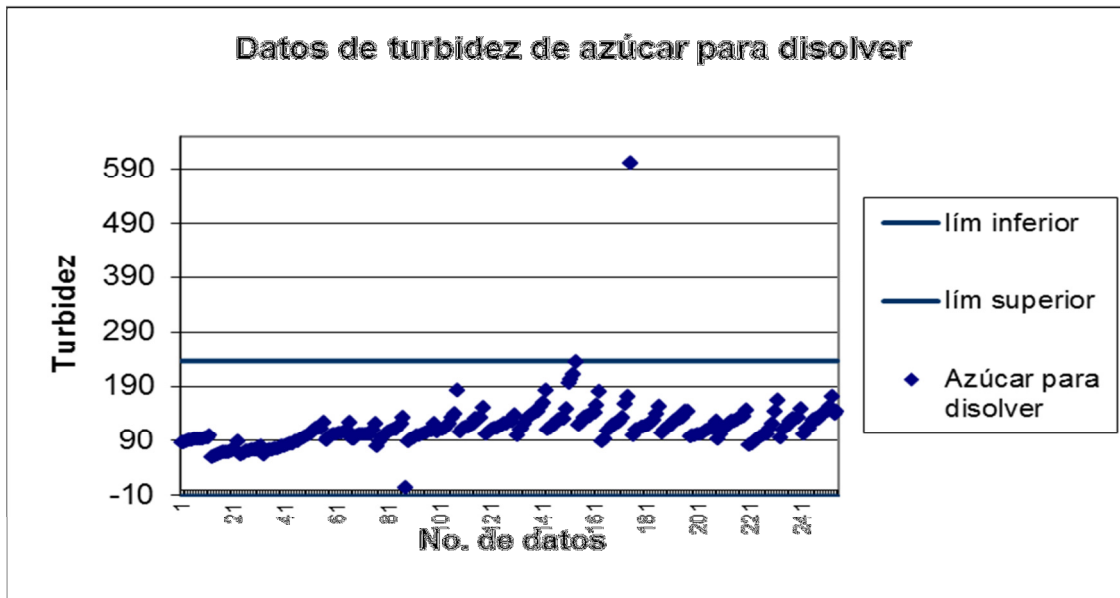
Figura B2. Prueba de rechazo de la meladura clarificada



Fuente: datos calculados.

- Media: 4 789,18 UI
- Desviación estándar: 1 616,38 UI
- Límite inferior: -59,97 UI
- Límite superior: 9 638,33 UI

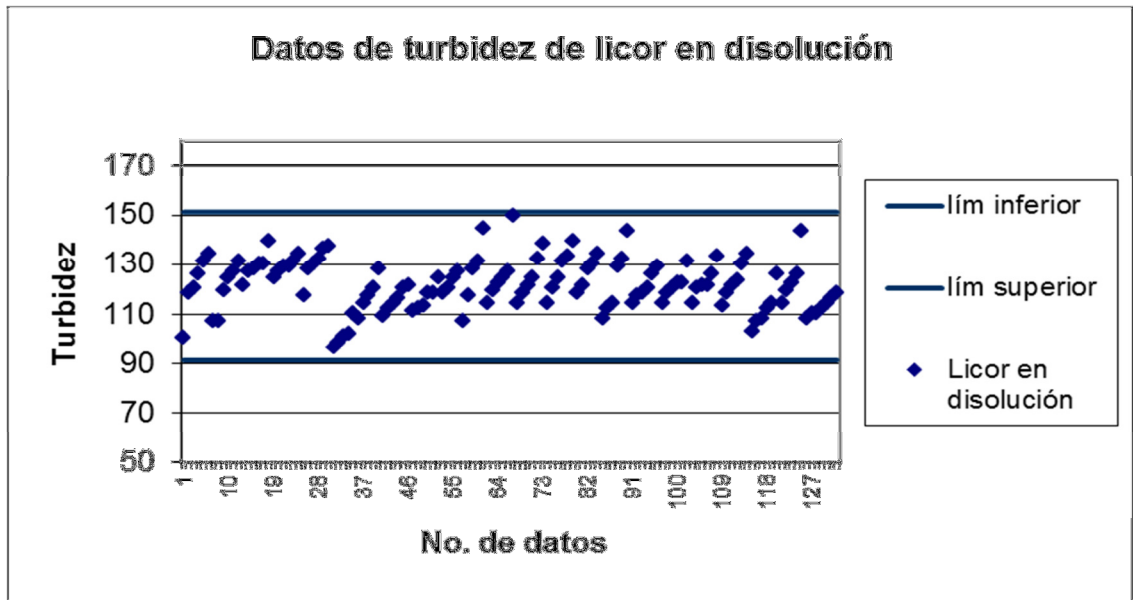
Figura B3. Prueba de rechazo del azúcar blanco para disolver



Fuente: datos calculados.

- Media: 112,37 UI
- Desviación estándar: 41,11 UI
- Límite inferior: -10,95 UI
- Límite superior: 235,68 UI

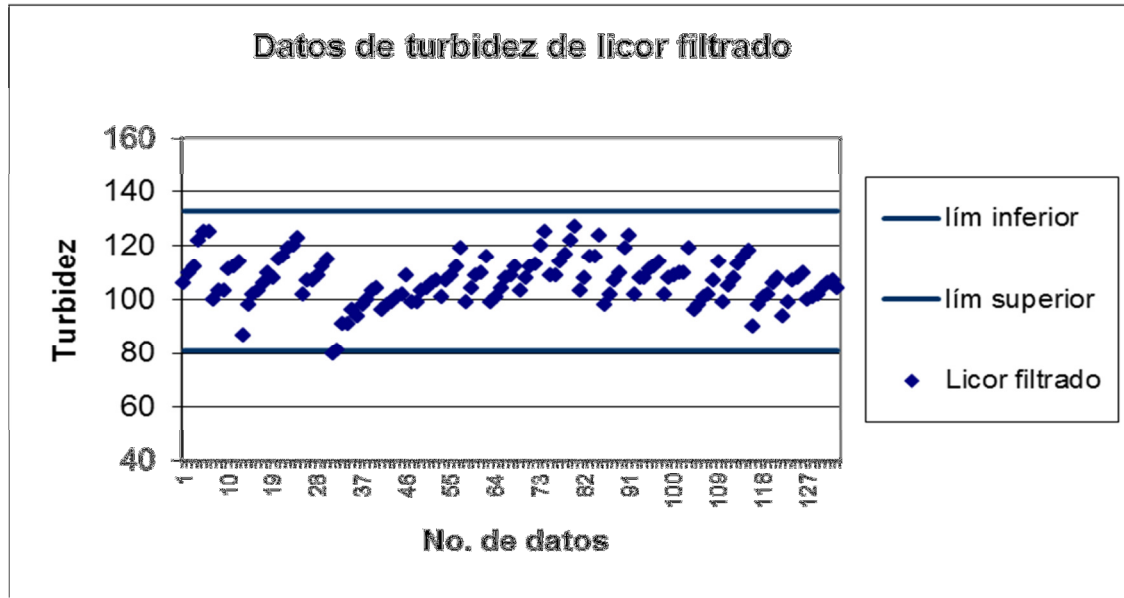
Figura B4. Prueba de rechazo del licor en disolución



Fuente: datos calculados.

- Media: 121,29 UI
- Desviación estándar: 9,98 UI
- Límite inferior: 91,41 UI
- Límite superior: 151,16 UI

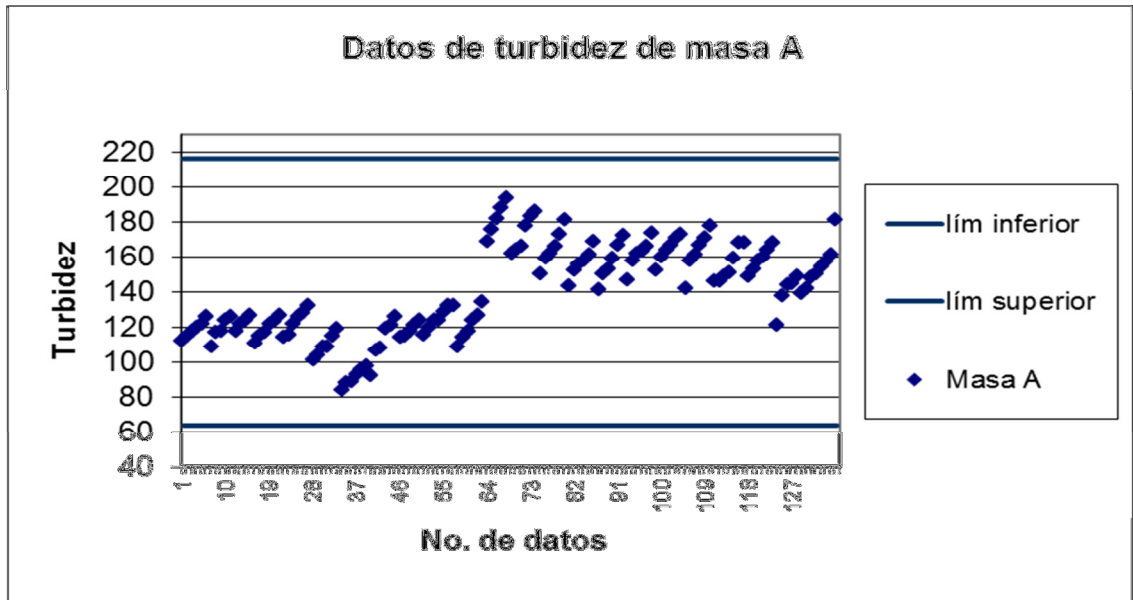
Figura B5. Prueba de rechazo del licor filtrado



Fuente: datos calculados.

- Media: 106,95 UI
- Desviación estándar: 8,66 UI
- Límite inferior: 80,96 UI
- Límite superior: 132,94 UI

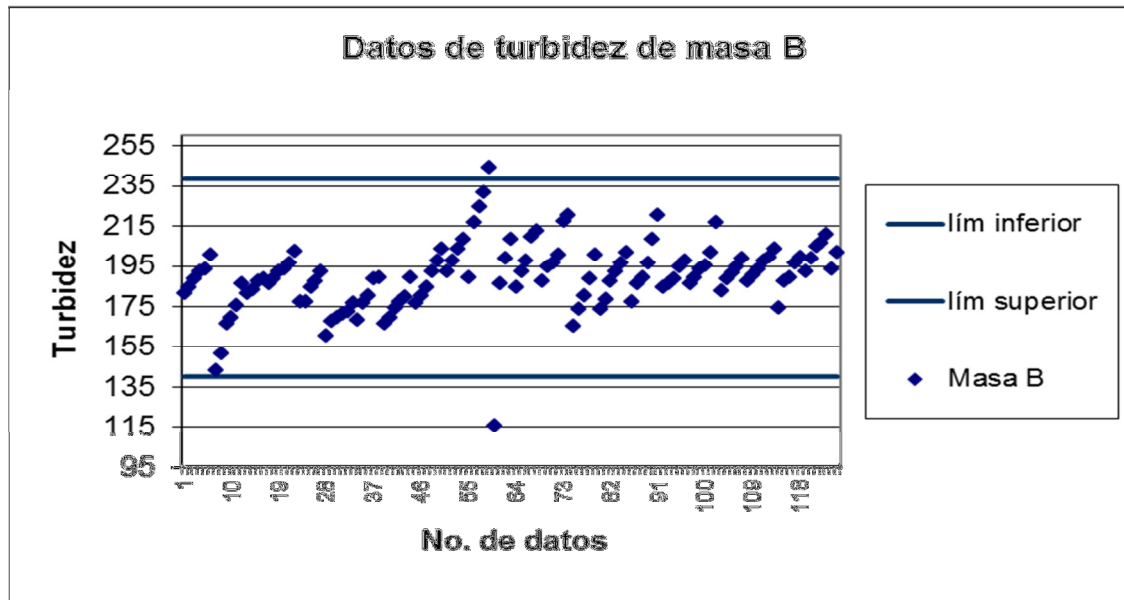
Figura B6. Prueba de rechazo de la masa A



Fuente: datos calculados.

- Media: 140,04 UI
- Desviación estándar: 25,44 UI
- Límite inferior: 63,71 UI
- Límite superior: 216,37 UI

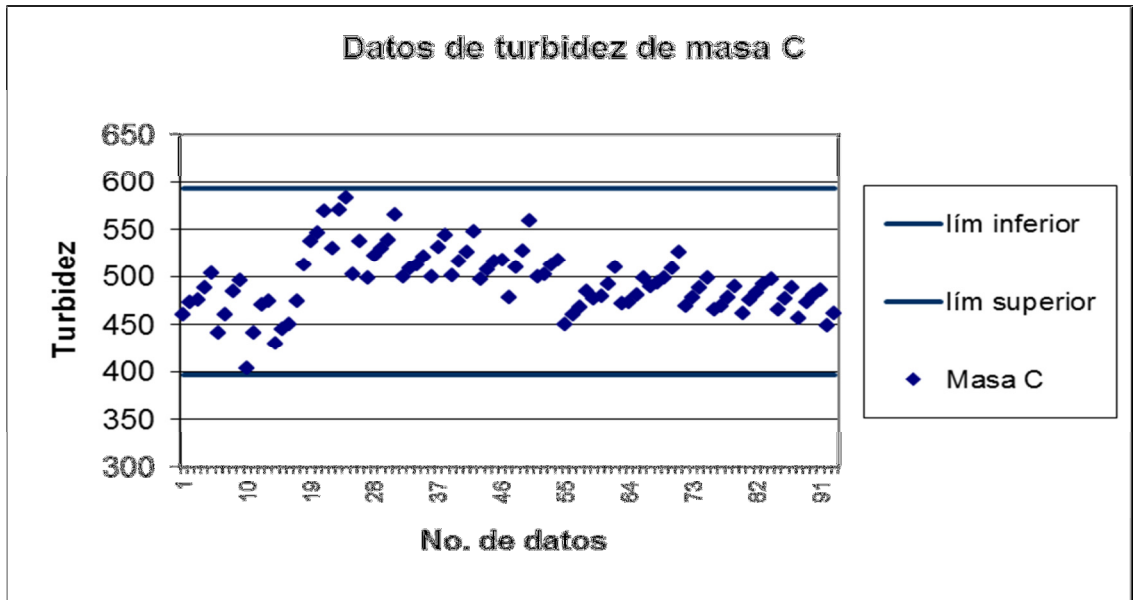
Figura B7. Prueba de rechazo de la masa B



Fuente: datos calculados.

- Media: 189,37 UI
- Desviación estándar: 16,39 UI
- Límite inferior: 140,18 UI
- Límite superior: 238,55 UI

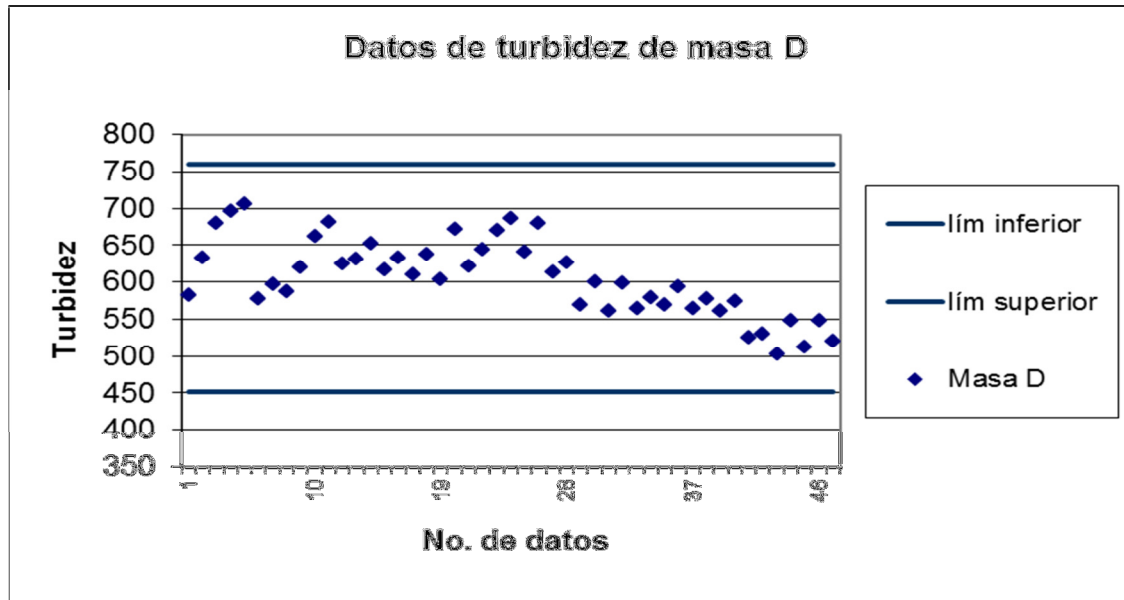
Figura B8. Prueba de rechazo de la masa C



Fuente: datos calculados.

- Media: 494,87 UI
- Desviación estándar: 32,70 UI
- Límite inferior: 396,77 UI
- Límite superior: 592,97 UI

Figura B9. Prueba de rechazo de la masa D



Fuente: datos calculados.

- Media: 606,06 UI
- Desviación estándar: 51,42 UI
- Límite inferior: 451,78 UI
- Límite superior: 760,34 UI

Apéndice 5. **Valores promedio de turbidez durante días de recopilación de datos, excluyendo los datos dejados fuera por la prueba de rechazo**

Tabla B4. **Promedios diarios de turbidez del jugo clarificado**

Día	Jugo clarificado
144	19,76
145	19,23
146	17,35
147	18,95
148	18,39
149	22,09
150	20,35
151	18,71
152	16,93
153	19,09
154	19,43
155	16,48
156	17,48
157	19,43
158	23,21
159	30,49
160	29,00
161	23,13
162	18,44
163	20,17
164	23,08
165	15,42
166	25,98
167	25,29

Fuente: datos calculados.

Tabla B5. **Promedios diarios de turbidez de la meladura clarificada**

Día	Meladura Clarificada
144	3 257,83
145	3 363,33
146	3 395,00
147	3 556,00
148	3 471,17
149	3 592,67
150	3 577,83
151	4 070,17
152	4 299,17
153	4 730,33
154	3 977,33
155	4 246,50
156	3 761,67
157	5 409,00
158	4 712,50
159	5 603,00
160	8 237,80
161	6 256,17
162	6 983,33
163	7 216,00
164	5 830,17
165	4 210,67
166	5 547,00
167	5 516,00

Fuente: datos calculados.

Tabla B6. **Promedios diarios de turbidez del azúcar estándar para disolver**

Día	Azúcar para disolver
144	90,08
145	67,55
146	69,89
147	74,42
148	100,83
149	101,90
150	100,80
151	104,55
152	91,92
153	124,33
154	118,78
155	116,67
156	130,17
157	147,50
158	144,78
159	126,17
160	112,50
161	123,18
162	110,91
163	115,83
164	104,42
165	123,44
166	125,92
167	148,60

Fuente: datos calculados

Tabla B7. **Promedios diarios de turbidez del licor en disolución**

Día	Licor en disolución
144	121,50
145	119,17
146	129,17
147	129,00
148	130,00
149	101,40
150	117,40
151	115,33
152	116,00
153	122,25
154	125,40
155	125,83
156	124,50
157	126,83
158	126,20
159	123,00
160	120,67
161	121,17
162	122,50
163	123,17
164	111,67
165	124,80
166	111,67
167	118,00

Fuente: datos calculados.

Tabla B8. **Promedios diarios de turbidez del licor filtrado**

Día	Licor filtrado
144	116,67
145	107,17
146	101,00
147	116,83
148	108,67
149	87,80
150	99,80
151	100,83
152	103,00
153	109,60
154	107,60
155	105,50
156	113,50
157	116,33
158	113,40
159	110,00
160	109,17
161	109,67
162	103,00
163	109,83
164	100,83
165	103,60
166	103,33
167	104,00

Fuente: datos calculados.

Tabla B9. **Promedios diarios de turbidez de las masas A**

Día	Masa A
144	118,83
145	118,80
146	122,75
147	119,17
148	123,00
149	109,50
150	91,33
151	112,17
152	118,00
153	126,83
154	121,00
155	181,80
156	173,17
157	165,17
158	156,50
159	157,00
160	161,67
161	164,50
162	162,83
163	153,17
164	158,67
165	144,17
166	148,33
167	171,00

Fuente: datos calculados.

Tabla B10. **Promedios diarios de turbidez de las masas B**

Día	Masa B
144	189,67
145	165,00
146	184,75
147	192,83
148	183,40
149	169,17
150	180,20
151	175,67
152	188,67
153	200,00
154	215,00
155	197,33
156	198,80
157	202,33
158	181,20
159	187,83
160	196,00
161	189,80
162	196,67
163	190,60
164	194,83
165	189,00
166	200,50
167	201,00

Fuente: datos calculados.

Tabla B11. **Promedios diarios de turbidez de las masas C**

Día	Masa C
144	474,50
145	472,75
146	453,25
147	450,50
148	517,75
149	563,25
150	513,00
151	539,50
152	510,25
153	525,00
154	522,75
155	509,50
156	518,75
157	508,00
158	465,75
159	489,75
160	481,00
161	497,25
162	490,25
163	478,00
164	477,50
165	483,00
166	474,75
167	465,67

Fuente: datos calculados.

Tabla B12. **Promedios diarios de turbidez de las masas D**

Día	Masa D
144	607,50
145	694,00
146	587,50
147	603,50
148	672,00
149	624,00
150	641,50
151	624,00
152	623,50
153	637,00
154	632,50
155	678,00
156	660,50
157	620,00
158	585,50
159	579,50
160	571,50
161	582,00
162	570,50
163	568,00
164	528,50
165	526,00
166	530,00
167	521,00

Fuente: datos calculados.

Tabla B13. **Promedios diarios de turbidez del azúcar refinado**

Día	Azúcar refinado
144	37,00
145	33,33
146	31,33
147	35,33
148	34,67
149	36,67
150	27,67
151	34,00
152	36,00
153	34,33
154	32,00
155	32,33
156	32,00
157	40,00
158	36,67
159	41,33
160	43,00
161	52,50
162	46,00
163	48,67
164	47,00
165	36,00
166	35,67
167	37,00

Fuente: datos calculados.