



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

**ESTUDIO DE UN CASO EN LA INDUSTRIA AZUCARERA, EN RELACIÓN CON EL
PROCESO DE CLARIFICACIÓN DEL JUGO DE LA CAÑA, EN BASE A UNA TÉCNICA
ALTERNATIVA PARA LA SULFITACIÓN CONVENCIONAL**

Elmar Giovanni Cardona Quintana
Asesorado por Ing. Adolfo Narciso Gramajo Antonio

Guatemala, junio de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO DE UN CASO EN LA INDUSTRIA AZUCARERA, EN RELACIÓN CON EL
PROCESO DE CLARIFICACIÓN DEL JUGO DE LA CAÑA, EN BASE A UNA TÉCNICA
ALTERNATIVA PARA LA SULFITACIÓN CONVENCIONAL**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ELMAR GIOVANNI CARDONA QUINTANA
ASESORADO POR EL ING. ADOLFO NARCISO GRAMAJO ANTONIO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, JUNIO DE 2013

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

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

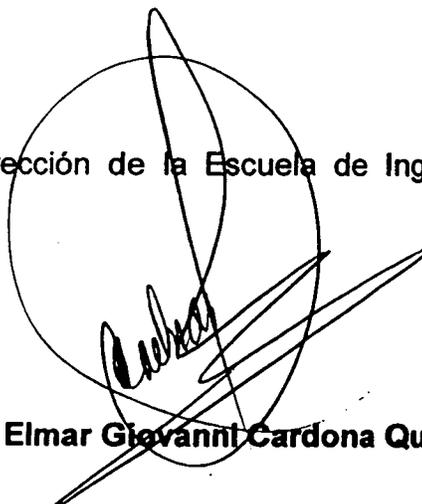
DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl de León de Paz
EXAMINADORA	Inga. Casta Petrona Zeceña Zeceña
EXAMINADOR	Ing. Cesar Alfonso García Guerra
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

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:

**ESTUDIO DE UN CASO EN LA INDUSTRIA AZUCARERA, EN RELACIÓN CON EL
PROCESO DE CLARIFICACIÓN DEL JUGO DE LA CAÑA, EN BASE A UNA TÉCNICA
ALTERNATIVA PARA LA SULFITACIÓN CONVENCIONAL**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 17 de octubre de 2011.



Elmar Giovanni Cardona Quintana

Guatemala 13 de Marzo del 2013

Ingeniero Victor Manuel Monzón Valdez
Director de la escuela de Ingeniería Química
Universidad de San Carlos
Presente

Estimado ingeniero Monzón es un gusto saludarlo, por este medio deseo comunicarle la aprobación del Informe Final de Trabajo de Graduación, del estudiante ELMAR GIOVANNI CARDONA QUINTANA, titulado "ESTUDIO DE UN CASO EN LA INDUSTRIA AZUCARERA, EN RELACION CON EL PROCESO DE CLARIFICACIÓN DEL JUGO DE LA CAÑA; EN BASE A UNA TÉCNICA ALTERNATIVA PARA LA SULFITACIÓN CONVENCIONAL" que le fuera asignado y aprobado por la terna respectiva, el cual a sido asesorado por mi persona.

Atentamente



ING. QUIMICO ADOLFO GRAMAJO ANTONIO
COLEGIADO 264

Adolfo Gramajo
Ingeniero Químico
Colegiado 264



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Guatemala, 27 de mayo de 2013
Ref. EIQ.TG-IF.030.2013

Ingeniero
Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el Acta TG-260-2011-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: **Elmar Giovanni Cardona Quintana.**

Identificado con número de camé: **49216.**

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

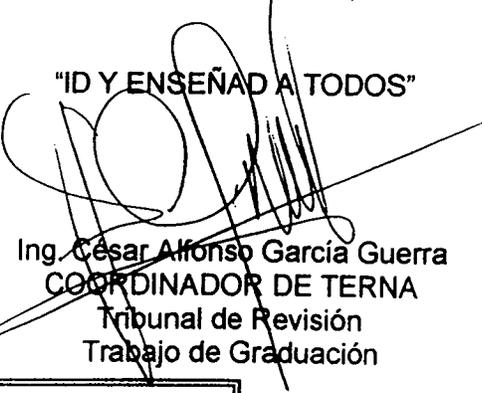
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

ESTUDIO DE UN CASO EN LA INDUSTRIA AZUCARERA EN RELACIÓN CON EL PROCESO DE CLARIFICACIÓN DEL JUGO DE LA CAÑA, EN BASE A UNA TÉCNICA ALTERNATIVA PARA LA SULFITACIÓN CONVENCIONAL

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Adolfo Gramajo Antonio.**

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. César Alfonso García Guerra
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
ACREDITADO POR
Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Arquitectura y de Ingeniería
Periodo 2013 - 2015



ACAAI



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Ref.EIQ.TG.168.2013

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, **ELMAR GIOVANNI CARDONA QUINTANA** titulado: "ESTUDIO DE UN CASO EN LA INDUSTRIA AZUCARERA, EN RELACIÓN CON EL PROCESO DE CLARIFICACIÓN DEL JUGO DE LA CAÑA, EN BASE A UNA TÉCNICA ALTERNATIVA PARA LA SULFITACIÓN CONVENCIONAL". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.


Ing. Victor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, junio 2013

Cc: Archivo
VMMV/ale

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 426 .2013

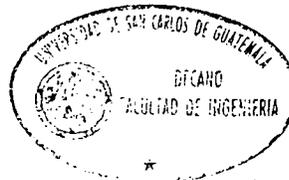
El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **ESTUDIO DE UN CASO EN LA INDUSTRIA AZUCARERA, EN RELACIÓN CON EL PROCESO DE CLARIFICACIÓN DEL JUGO DE LA CAÑA, EN BASE A UNA TÉCNICA ALTERNATIVA PARA LA SULFITACIÓN CONVENCIONAL**, presentado por el estudiante universitario **Elmar Giovanni Cardona Quintana**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 20 de junio de 2013

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser el centro de mi vida, y la luz divina que me guía.
Mis padres	Daniel Cardona Hernández y María Delia Quintana Gómez, por su infinito amor, esfuerzo y dedicación; sin ustedes queridos padres, nada de esto hubiera sido posible; que Dios los tenga en su gloria.
Mi esposa	Carolina López Flores de Cardona, quien durante nuestros 33 años de vida conyugal ha sido mi bastión y más profunda inspiración.
Mis hijos	Giovanni, Gabriela, Nancy y Natalia, por ser la luz terrenal que ilumina mi camino y el mayor orgullo de mi vida.
Mi suegro	Arturo López Flores (q.e.p.d.), quien durante su vida terrenal siempre me motivó a concretar este logro.
Mi cuñado	Jacobo Sosa (q.e.p.d.), por su incondicional cariño y apoyo, sus sabias palabras y su profundo pensamiento positivo.

Mis nietos

Sebastián y Santiago Cardona, por ser la nueva generación familiar, heredera de nuestra historia.

AGRADECIMIENTOS A:

**Ingeniero Sergio
de la Roca**

Por su incondicional ayuda y amistad desde los albores de nuestra carrera universitaria.

**Doctor Adolfo
Gramajo Antonio**

Por su colaboración en la consecución de este logro.

Ingeniero César García

Por su interés en hacer del ingeniero químico un profesional emprendedor.

**Equipo de futbol
del CIQG**

Mis queridos amigos, quienes sábado a sábado me motivaron para concluir este tema pendiente.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XXI
OBJETIVOS/HIPÓTESIS	XXIII
INTRODUCCIÓN	XXV
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1. Descripción del proceso de producción	3
2.1.1. La caña de azúcar	3
2.1.2. El peso de la caña	5
2.1.3. Descarga de la caña en la mesa	6
2.1.4. La obtención por extracción del jugo	7
2.1.5. El proceso de clarificación del jugo	12
2.1.6. La evaporación	15
2.1.7. La cristalización	16
2.1.8. La centrifugación	17
2.1.9. El secado	19
2.1.10. El envasado	20
2.2. El azufre	20
2.2.1. Formas de azufre	21
2.2.2. Características fisicoquímicas del azufre	23
2.3. La sulfitación	24

2.3.1.	Antecedentes.....	24
2.3.1.1.	El proceso de sulfitación	25
2.3.1.2.	Reacciones químicas en la sulfitación..	26
2.4.	El equipo de sulfitación convencional	28
2.4.1.	Diseño de torres de sulfitación.....	28
2.4.2.	Proceso de clarificación.....	32
2.4.3.	Reacciones químicas básicas en el proceso de clarificación.....	33
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	35
3.1.	Variables	35
3.2.	Delimitación del campo de estudio	35
3.3.	Recurso humano disponible.....	35
3.4.	Localización	35
3.5.	Recursos materiales disponibles	36
3.5.1.	Equipo y cristalería	36
3.5.1.1.	El equipo y cristalería utilizada para la determinación de la dosis adecuada en el laboratorio	36
3.5.1.2.	Equipos para prueba industrial.....	37
3.6.	Técnica cualitativa y cuantitativa	38
3.6.1.	Protocolo de demostración en laboratorio para clasificación de jugo con floculantes y donador de SO ₂	38
3.6.2.	Protocolo de demostración en laboratorio para clasificación de meladura con floculantes y donador de SO ₂	40
3.7.	Recolección y ordenamiento de la información	43
3.8.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información .	44

3.9.	Análisis estadístico	44
4.	RESULTADOS.....	45
4.1.	Resultados en laboratorio	45
4.1.1.	Resultados de laboratorio en la aplicación al jugo....	45
4.1.2.	Resultados de laboratorio en la aplicación a la meladura	46
4.2.	Resultados de aplicación a nivel industrial.....	47
4.2.1.	Análisis matemático de la correlación de las variables estudiadas	55
4.2.2.	Variable independiente azufre; dependiente sulfitos.....	57
4.2.3.	Variable independiente cal; dependiente las cenizas	59
4.2.4.	Variable independiente color jugo claro; dependiente, color de azúcar	60
4.2.5.	Variable independiente color de meladura clarificada; dependiente color del azúcar	62
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	65
	CONCLUSIONES	67
	RECOMENDACIONES.....	69
	BIBLIOGRAFÍA	71
	APÉNDICES	73

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Cultivo de caña de azúcar	5
2.	Corte de caña de azúcar	6
3.	Patio de caña y grúa de carga.....	7
4.	Tándem de molinos.....	9
5.	Caña en proceso (colchón de bagazo)	10
6.	Composición del jugo de la caña de azúcar	11
7.	Jugo diluido	12
8.	Clarificador DOOR 4-4-4	14
9.	Clarificador RSI	14
10.	Jugo claro	15
11.	Tacho continuo.....	17
12.	Centrífuga automática BMA	18
13.	Secadora de azúcar	19
14.	Área de envasado	20
15.	Azufre elemental y combustionado	22
16.	Azufre elemental en polvo entrando a la tolva del horno de quemado.....	23
17.	Diagrama de flujo horno de azufre y torre de sulfitación.....	29
18.	Bandejas de horno de azufre	30
19.	Estufa de azufre y horno de seguridad.....	30
20.	Diseño de torre de sulfitación del ingenio Chumbagua, Honduras	31
21.	Diagrama de flujo general del proceso de clarificación.....	33
22.	Dosificador de donador de SO ₂ a la balanza de jugo mixto	38

23.	Resultados de laboratorio: aplicación al jugo	45
24.	Aplicación de donador de SO ₂ a la meladura.....	46
25.	Consumo de cal.....	48
26.	Consumo de azufre en kg por tonelada de caña molida	49
27.	Sulfitos remanentes con azufre y con donador de SO ₂	50
28.	Cenizas remanentes con azufre y con donador de SO ₂	50
29.	Color del azúcar con azufre y con donador de SO ₂	51
30.	Turbiedad en la meladura con azufre y con donador de SO ₂	52
31.	Color del jugo clarificado sulfitado con azufre y con donador SO ₂	52
32.	Color del jugo diluido y el jugo claro sulfitado con azufre y con el donador de SO	53
33.	Comportamiento del pH del jugo sulfitado con el donador de SO ₂	54
34.	Consumo de cal y azufre por kilogramo	57
35.	Sulfitos azúcar blanco.....	58
36.	Cenizas azúcar blanco	60
37.	Color azúcar y jugo clarificado	62
38.	Color azúcar y meladura clarificada	63

TABLAS

I.	Composición de la caña de azúcar	4
II.	Comparación de eficiencia entre un clarificador DOOR 4-4-4 y un SRI.	13
III.	Características fisicoquímicas del azufre	23
IV.	Absorción de SO ₂ versus temperatura	31
V.	Variable independiente azufre, dependiente cal.....	55
VI.	Modelo y estimaciones de los parámetros, sulfitos azúcar blanco y azufre en kg.....	56
VII.	Resumen procesamiento de las variables.....	57

VIII.	Estimaciones de los parámetros cenizas y consumo de cal	58
IX.	Variables cenizas y consumo de cal	59
X.	Estimaciones de los parámetros cenizas y consumo de cal	59
XI.	Color azúcar y color jugo clarificado	61
XII.	Resumen del modelo color azúcar	61
XIII.	Resultados sobre color azúcar y meladura clarificada	63

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
CLR	Color
SO₂	Dióxido de azufre
° Brx	Grados brix
°C	Grados centígrados
Kg	Kilogramo
ml	Mililitro
ppm	Partes por millón
%	Porcentaje
pH	Potencial de Hidrógeno
↓	Precipitado
R	Reducción
rpm	Revoluciones por minutos
Ton	Tonelada
TCM	Tonelada de caña molida
TDZ	Turbidez
UI	Unidades de color ICUMSA

GLOSARIO

Aminoácidos	Es una molécula orgánica con un grupo amino (-NH ₂) y un grupo carboxilo (-COOH; ácido). Los aminoácidos más frecuentes y de mayor interés son aquellos que forman parte de las proteínas.
Agua de imbibición	Agua normalmente caliente, que se le agrega al tándem de molinos, para aumentar la extracción de sacarosa de la fibra de la caña.
Azúcares reductores	Son aquellos azúcares que poseen su grupo carbonilo (grupo funcional) intacto, y que a través del mismo pueden reaccionar con otras moléculas. Provocan la alteración de las proteínas mediante la reacción de glucosilación no enzimática también denominada reacción de Maillard o glicación.
Bactericida	Es aquel que produce la muerte a una bacteria.
Cachaza	Residuo final de la defecación del jugo de la caña, constituido principalmente por residuos minerales como fosfato de calcio, ceras y bagacillo de la caña de azúcar, más tierra y arena.
Clarificación	Procedimiento fisicoquímico, por medio del cual se busca separar sólido de un líquido.

**Clarificador
rapidor 4 - 4 - 4**

Son tanques o depósitos de gran tamaño por los que el jugo circula a una velocidad lo suficientemente lenta, para que el precipitado producido por la reacción del floculante y la materia orgánica se asienten en la parte inferior y pueda ser extraído. El tiempo de residencia de un clarificador de este tipo es de aproximadamente 2 horas, el jugo clarificado es enviado a los evaporadores por medio de un sistema de bobeo.

Clarificadores RSI

Tanques o depósitos con la misma finalidad que el rapidor, pero con un tiempo de residencia de 45 minutos, lo que le da mayor capacidad a la fábrica y reduce las inversiones de azúcar por su velocidad de sedimentación.

Combustión

Es una reacción química de oxidación, en la cual generalmente se desprende una gran cantidad de energía, en forma de calor y luz, manifestándose visualmente como fuego. En toda combustión existe un elemento que arde (combustible) y otro que produce la combustión (comburente), generalmente oxígeno en forma de O_2 gaseoso.

Corrosión

Es una reacción química (oxido-reducción) en la que intervienen 3 factores: la pieza manufacturada, el ambiente y el agua, o por medio de una reacción electroquímica.

Cristalización	Proceso por el cual se forma un sólido cristalino, ya sea a partir de un gas, un líquido o una disolución. Es un proceso en donde los iones, átomos o moléculas que constituyen la red cristalina crean enlaces hasta formar cristales.
Decoloración	Reducción del color de los materiales en proceso.
Dextrano	Es un polisacárido complejo y ramificado formado por numerosas moléculas de glucosa; unidades en cadenas de longitud variable (de 10 a 150 kilodaltons). Es usado como antitrombótico (antiplaqueta) y para reducir la viscosidad de la sangre. Es sintetizado a partir de la sacarosa por ciertas bacterias acidolácticas, de las cuales las más conocidas son <i>Leuconostoc mesenteroides</i> y <i>Streptococcus mutans</i> .
Dureza	Contenido de sales de calcio y magnesio, ya sea en agua o en una solución cualquiera, como por ejemplo jugo de caña.
Flasheo	Ocurre cuando el condensado tiene mayor calor latente que el agua saturada a presión atmosférica, entonces parte del condensado emitido por la trampa se convertirá de nuevo en vapor al momento de entrar en contacto con la atmósfera. Antes de su ingreso a los clarificadores, el jugo calentado pasa por los tanques <i>flash</i> que

tienen el propósito de eliminar la presión, la alta velocidad y la energía en exceso que adquiere el jugo en el proceso de calentamiento.

Floculación

Proceso químico mediante el cual, con la adición de sustancias denominadas floculantes, se aglutinan sustancias coloidales presentes en el agua, jugo de caña, o cualquier solución, facilitando de esta su decantación y posterior filtración.

Fosfatación

Adición de fosfato a una solución para obtener iones fosfato libres.

Fructosa

Es una forma de azúcar encontrada en las frutas y en la miel. Es un monosacárido con la misma fórmula empírica que la glucosa, pero con diferente estructura.

Grados brix

Sirven para determinar el cociente total de sacarosa disuelta en un líquido. Una solución de 25 °brix contiene 25 g de azúcar (sacarosa) por 100 g de líquido. Dicho de otro modo, en 100 g de solución hay 25 g de sacarosa y 75 g de agua.

Gramíneas

Son una familia de plantas herbáceas, o muy raramente leñosas, perteneciente al orden Poales de las monocotiledóneas (Liliópsida).

Glucosa	Es un monosacárido con fórmula molecular $C_6H_{12}O_6$, la misma que la fructosa pero con diferente posición relativa de los grupos -OH y O=. En terminología de la industria alimentaria suele denominarse dextrosa a este compuesto.
Hidratos de carbono	Son moléculas orgánicas compuestas por carbono, hidrógeno y oxígeno. Son solubles en agua y se clasifican de acuerdo con la cantidad de carbonos que poseen o por el grupo funcional aldehído. Son la forma biológica primaria de almacenamiento y consumo de energía.
ICUMSA	International Committee of Uniform Methods Sugar Analyses.
Imbibición compuesta	Proceso en el cual el agua que se agrega al quinto o último molino, se reusa para alimentárselo al molino anterior; procediéndose así hasta el segundo molino.
Imbibición simple	Proceso por medio del cual se le agrega el agua de imbibición, al último molino.
Jugo de primera extracción	Jugo que se extrae del primer molino.
Jugo sulfitado	Jugo que ha pasado por la torre de sulfitación, agregándosele SO_2 en contracorriente, en una

columna ascendente-descendente.

***Leuconostoc
mesenteroides***

Es una especie de bacteria, normalmente asociada con la fermentación, bajo condiciones de salinidad y relativa baja temperatura. Produce polisacáridos llamados dextranos y que son usados en soluciones coloidales artificiales en la fluidoterapia en humanos.

Lípidos

Son un conjunto de moléculas orgánicas, la mayoría biomoléculas, compuestas principalmente por carbono e hidrógeno y en menor medida de oxígeno; aunque también pueden contener fósforo, azufre y nitrógeno; se les conoce comúnmente como grasas.

Maceración

Es un proceso de extracción sólido-líquido. El producto sólido (materia prima) posee una serie de compuestos solubles en el líquido extractante, que son los que se pretende extraer.

Neutralización de pH

Adición de ácido o base para llevar el valor del pH a 7.0.

Pago por calidad

Forma en que la industria azucarera, les cancela a los cañeros el valor del material que los mismos han cultivado y que entregan al ingenio para su proceso; toma en cuenta además del peso, el contenido de sacarosa que la caña tiene.

Patio de caña	Lugar dentro de las instalaciones de un ingenio azucarero, en donde se acumula la caña que está lista para ser procesada.
pH	Medida de la acidez o alcalinidad de una solución, que se define como el inverso del logaritmo de la concentración de iones hidrógeno = $1 / \log. [H^+]$.
Proteínas	Son biomoléculas formadas por cadenas lineales de aminoácidos. El nombre proteína proviene de la palabra griega <i>πρωτεος</i> (" <i>proteios</i> "), que significa "primario" o del dios <i>Proteo</i> , por la cantidad de formas que pueden tomar.
Reacciones de Millard	Se trata de un conjunto complejo de reacciones químicas que se producen entre las proteínas y los azúcares reductores, que se dan al calentar (no es necesario que sea a temperaturas muy altas) los alimentos o mezclas similares, como por ejemplo una pasta o el jugo de caña de azúcar; básicamente se denomina caramelización de los alimentos.
Sacarosa	Es un disacárido formado por alfa-glucopiranososa y beta-fructofuranosa. Su fórmula es: $(C_{12}H_{22}O_{11})$. En la naturaleza se encuentra en un 20% del peso en la caña de azúcar y en un 15% del peso de la remolacha azucarera, de la que se obtiene el azúcar de mesa. La miel también es un fluido que

contiene gran cantidad de sacarosa parcialmente hidrolizada.

Setting

Conjunto de medidas de ajuste que se aplican a los molinos durante la zafra en los ingenios azucareros; a medida que transcurre la misma, la distancia entre las masas del molino, se debe ir ajustando.

Sulfitos remanentes en el azúcar

Son los compuestos sulfitados que se encuentran en el azúcar final, expresados en ppm de SO₂.

Sulfitación

Adición de SO₂ al jugo y/o la meladura de la caña de azúcar.

Tándem

Conjunto de varios molinos, normalmente 5, que constituyen un juego de elementos, para lograr la mayor extracción de sacarosa posible.

Transmitancia Óptica

Es la fracción de luz incidente, a una longitud de onda especificada, que pasa a través de una muestra. Su expresión matemática es: $T = \frac{I}{I_0}$
Donde I_0 es la intensidad del rayo incidente, e I es la intensidad de la luz que viene de la muestra.

Toneladas de caña molida

Peso total en toneladas, (mil kilos) que muele un ingenio en una unidad de tiempo, normalmente por hora o por día.

Turbidez

Se refiere a la falta de transparencia de un líquido debido a la presencia de partículas en suspensión. Cuantos más sólidos en suspensión haya en el líquido (generalmente se hace referencia al agua), más sucia parecerá esta, y más alta será la turbidez.

RESUMEN

Se llevaron a cabo las pruebas de laboratorio, simulando los procesos que se realizan normalmente en una central azucarera, tanto en jugo como en meladura. Dentro de ellos, luego de la sulfitación, están: el calentamiento de jugo, flasheo, floculación, neutralización, fosfatación y clarificación de una muestra de materiales de dicha central, usando tres concentraciones diferentes, en partes por millón base caña molida del donador de SO_2 ; todo esto para demostrar que este es un sustituto del proceso tradicional de sulfitación por medio de la quema de azufre elemental con el objetivo de bloquear las reacciones de Millard, actuando como decolorante y clarificante.

Se varió el pH de la alcalización con el objetivo de identificar a qué concentración de donador de SO_2 y en qué nivel de pH se lleva a cabo la mayor decoloración y la mayor clarificación posible, comparando los resultados contra los datos del promedio acumulado, reportados por el ingenio en los 8 meses anteriores a la prueba.

El avance del proceso en el laboratorio permitió determinar por observación, primero la decoloración lograda en el jugo sulfitado comparado con el blanco del proceso, luego la velocidad de formación del flóculo, sus dimensiones y la altura alcanzada en una probeta graduada, y determinando la compactación del flóculo (cachaza) y por último la medida del color y la turbiedad en unidades ICUMSA.

En el caso de la meladura, se procedió de acuerdo con el protocolo de la prueba para este material, observándose una importante reducción en la turbidez, la cual tiene una incidencia importante en la obtención del color final del azúcar.

Se obtuvieron resultados satisfactorios en todas las concentraciones del donador de SO_2 y pH propuestos, siendo el punto óptimo en función de los resultados y el costo una dosis inicial de 60 ppm de donador de SO_2 en la aplicación al jugo, a un pH de 7.2; lo que dio una reducción porcentual de color del 30% y reducción de la medida de la turbidez del 72%. En la meladura, a un pH de 6.4, con una dosis de 40 ppm, se obtuvo el 73% de disminución en la turbidez y 16 % en el color, que son condiciones muy superiores a las logradas con la sulfitación tradicional.

Luego de realizadas las correspondientes pruebas y conclusiones en laboratorio, se procedió a hacer la aplicación a nivel industrial, tomando los datos pertinentes para comprobar la hipótesis de investigación, cumpliendo con los objetivos generales y específicos, determinando que los mismos fueron logrados y la hipótesis comprobada; siendo la más importante que sí es posible sustituir el 100% del uso de azufre elemental para el proceso de sulfitación, sustituyéndolo por un donador de SO_2 totalmente ecológico y de grado alimenticio.

OBJETIVOS

General

Obtener jugo y meladura clarificados, de igual o mejor calidad que el obtenido en el proceso actual, mediante la sulfitación, usando una mezcla patentada donadora de SO₂, y buscando una reducción de los demás insumos químicos del proceso.

Específicos

1. Realizar el monitoreo del pH para establecer la variación entre el jugo diluido y el jugo sulfitado con la dosificación del donador de SO₂, para comprobar que con este método, a diferencia del de aplicación de azufre, no existe variación susceptible.
2. Evaluar el consumo de cal como agente alcalinizante entre el sistema de donador de SO₂ y el de aplicación de azufre.
3. Evaluar las variables de color y turbidez en el jugo y la meladura con los dos métodos en mención.
4. Determinar la correlación entre la calidad del jugo clarificado con el nuevo agente y el color final del azúcar.
5. Evaluar la concentración de sulfitos y cenizas remanentes en el azúcar final, comparando ambos métodos de sulfitación.

HIPÓTESIS

Se puede obtener jugo y meladura clarificados, de la misma calidad en color y turbidez, por medio de la sulfitación alterna con una mezcla patentada donadora de SO₂, sin que exista una reducción entre el pH del jugo mixto y el jugo sulfitado, en un ingenio azucarero.

INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar es uno de los cultivos más antiguos del mundo, se cree que se originó en la isla de Nueva Guinea y de allí se extendió a varios lugares, hasta llegar a la India, en donde se inició como un proceso; esto fue en el año 3,000 A.C.

Fue Cristóbal Colón quien en su segundo viaje, en 1493, la trajo a América, introduciéndola en la isla de La Española; lamentablemente estas cañas no se reprodujeron adecuadamente, siendo hasta 1501 cuando se cultivaron plantas que sí germinaron y crecieron adecuadamente, para esta época por supuesto en Europa, ya se tenía un proceso de cultivo y extracción importante. De la Española, migró el cultivo a Santo Domingo, y de allí a lo largo del Caribe y América del Sur.

La caña de azúcar, pertenece a la familia de las gramíneas, es una planta de tallo leñoso, de aproximadamente dos metros de altura en su época de mayor desarrollo, contiene hoja largas, y flores purpúreas; para la extracción de la sacarosa, lo que interesa es el tallo, que está constituido por un tejido esponjoso donde se encuentran contenidas las celdas de azúcar.

Se cultiva en todas las regiones tropicales y subtropicales del mundo, en Centro América, se cultiva principalmente a la altura del nivel del mar, hasta los 1,500 metros de altura; es importante para el mayor rendimiento, la humedad, la luminosidad para la fotosíntesis, la calidad de los suelos y por supuesto la temperatura.

Este cultivo tiene una característica muy especial, que luego de ser sembrado, permite una cosecha anual, sobre todo en las regiones cálidas, pero la rápida velocidad de su rebrote permite varias cosechas luego de su siembra original; normalmente en Centro América, la resiembra se realiza cuando están entre los 4 a 8 años, por esto se denomina como un cultivo perenne, que hace uso de un recurso vital como la luz solar, haciéndolo un cultivo rentable, sobre todo en las condiciones actuales, en donde el precio del edulcorante está en el máximo histórico.

La principal característica de la caña de azúcar es que está constituida por agua y carbohidratos; los carbohidratos insolubles constituyen la llamada fibra, y los solubles son los azúcares, sacarosa, fructuosa y glucosa. Los contenidos de cenizas, lípidos y proteínas, son porcentajes despreciables, pero cuando se realiza el proceso de cristalización, estas pequeñas concentraciones, sí son importantes, ya que interfieren en la calidad del grano y el color del azúcar.

Por supuesto que para la industria azucarera, es el contenido de sacarosa la que interesa, ya que será el elemento que finalmente se comercializará; es por eso que ha habido y seguirá habiendo, muchos esfuerzos encaminados a elevar, mantener y controlar el contenido de sacarosa, buscando mejorar los programas agronómicos, las variedades genéticamente mejoradas, y los procesos de ingeniería de extracción y cristalización del grano, ya que el mismo constituye aproximadamente el 50% del total de la materia seca del tallo maduro de la caña de azúcar.

Debido a las precipitaciones pluviales, y la variación de las temperaturas que influyen en la concentración de sacarosa, es que en la mayor parte del

mundo a excepción de Hawái, Perú y Colombia, la cosecha de la caña, se realice únicamente en una época del año, lo que se denomina zafra.

El azúcar es un cuerpo sólido, cristizable, del grupo de los hidratos de carbono, de color blanco en su más puro estado, de sabor muy dulce soluble en agua y alcohol, proveniente del jugo de la caña de azúcar y la remolacha azucarera; la última se puede cultivar en climas más fríos, pero no es un cultivo tan generalizado como el de la caña.

Para la obtención de azúcar por el método de blanco directo, es necesario hacer uso del SO_2 , molécula que inhibe la reacción de Millard, evitando que el grano se oscurezca; el método para obtener y mezclar SO_2 con el jugo, se denomina sulfitación, por lo complicado y contaminante de este proceso, es que se realizó el estudio de este caso, con una tecnología diferente totalmente ecológica y rentable.

1. ANTECEDENTES

Actualmente, el proceso de sulfitación se lleva a cabo en la mayor parte del mundo azucarero, por medio de la tostación de azufre elemental en hornos rotatorios; el azufre, en su proceso de combustión genera SO_2 , elemento que utilizado en su forma de SO_3 , inhibe la coloración de los jugos de la caña y por ende la coloración del azúcar final.

Esto fue estudiado por el Dr. Millard (año) científico francés, que determinó los procesos que se llevaban a cabo en ciertos alimentos, cuando eran sometidos a altas temperaturas, en presencia de sacarosa, proteínas y aminoácidos; descubrió que estos se tostaban, generando coloraciones oscuras y cientos de reacciones químicas que incluso ahora no han sido estudiadas a cabalidad.

Por años, el mundo azucarero ha buscado una alternativa para sustituir la quema de azufre, principalmente por tres razones: la primera es por la reducción de pH en el jugo diluido que este sistema implica y la consecuente pérdida de sacarosa; segundo, por la alta corrosión que este proceso genera en todo el sistema metálico del ingenio y por último, por la falta de control que este procedimiento conlleva, lo que obliga a una sobredosificación de gases de combustión del azufre, aumentando los residuos de sulfitos, en el azúcar final.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Descripción del proceso de producción

El proceso de producción debe iniciarse con la preparación del terreno y el estudio de suelo. Se toma en cuenta la topografía del terreno y de acuerdo con ella, se construyen canales de riego, drenaje y vías de acceso.

El suelo debe quedar en adecuadas condiciones para la siembra. Se requiere de agua en la cantidad y forma oportuna para lograr una buena producción. El riego se aplica hasta dos meses antes de la cosecha.

Debe realizarse un análisis foliar, control de malezas y aplicación adecuada de fertilizantes para lograr un mejor cultivo.

2.1.1. La caña de azúcar

La caña de azúcar es uno de los cultivos más antiguos del mundo, de la familia de las gramíneas, es la fuente más importante del edulcorante que tiene diversos usos.

En la tabla I puede observarse la composición típica de la caña; se ve que contiene 74.5 % de agua, 14% de azúcares, 10 % de fibra, 0.5% de cenizas, 0.4% de cuerpos nitrogenados y 0.6% de ceras, grasas y pectinas. Por supuesto lo que interesa en este punto es el contenido de azúcares, específicamente la sacarosa.

Tabla I. **Composición de la caña de azúcar**

Componentes	Porcentaje
Agua	74.5
Cenizas <ul style="list-style-type: none"> • Sílice (SiO₂) • Potasa (K₂O) • Cal (CaO) • Magnesio (MgO) • Ácido fosfórico 	0.5
Fibra <ul style="list-style-type: none"> • Celulosa 5.5% • Hemicelulosa 2.3% • Lignina 2,0% • Goma de caña 0.2% 	10%
Azúcares <ul style="list-style-type: none"> • Sacarosa 12.5% • Glucosa 0.9% • Fructuosa 0.6% 	14%
Cuerpos nitrogenados <ul style="list-style-type: none"> • Albuminoides • Amidas • Aminoácidos • Ácido nítrico • Amoniacó 	0.4%
Ceras, grasas y pectinas (gomas)	0.6%

Fuente: elaboración propia.

Figura 1. Cultivo de caña de azúcar



Fuente: campo de cultivo, ingenio Pichichi, valle del Cauca, Colombia.

2.1.2. El peso de la caña

La caña, después de ser cortada, es llevada al ingenio por medio de camiones, tráileres, carretas, furgones de ferrocarril y hasta en carretones tirados por animales; esta caña es pesada y depositada en el patio de caña; la misma pasa por un sistema de báscula en donde se obtiene el peso neto del material cuando entra; antes se toma una muestra por sonda para establecer la calidad del material y su pago por calidad, en la mayoría de los ingenios, para eliminar tierra, otra basura indeseable y materiales insolubles, que en la mayoría de los casos es arena, tierra y roca molida.

Se procede a lavar la caña; es necesaria esta limpieza de materia extraña con coladores o desarenadores, ya que el valor normal de sólidos insolubles es de 2 a 4% y en época lluviosa puede llegar hasta el 6 o 7%; pero si en algún momento se detecta un aumento del material insoluble, arriba del 20%, el ingenio deberá de suspender la molienda, hasta corregir esta carga extra que trae consigo muchos problemas en la operación.

En algunos lugares dada la cantidad de materia extraña, se ha implementado la sección denominada *trash*, que tiene como objetivo reducir al mínimo la materia extraña, para mejorar la calidad del material que entra y evitar daños al equipo. Si no se realiza esta operación, el trabajo en la clarificación, se hace más difícil.

Figura 2. **Corte de caña de azúcar**



Fuente: campo de cultivo del ingenio San Carlos, valle del Cauca Colombia.

2.1.3. Descarga de la caña en la mesa

La mayoría de los ingenios azucareros, cuenta con sistema de descarga de caña, normalmente por grúas o cargadores; existen también sistemas que usan las vías del ferrocarril con vagones especiales que se voltean de forma adecuada para verter el material en la mesa de ingreso al tándem de molinos, como se puede apreciar en la fotografía siguiente.

Figura 3. **Patio de caña y grúa de carga**



Fuente: instalaciones del ingenio Providencia, Costa Rica.

Antes de entrar a los molinos es necesario abrir la fibra de la caña, de tal manera que se pueda realizar una extracción exitosa; para eso se utiliza la sección de prepicadoras, picadoras y desfibradoras; la caña se corta en trozos pequeños para desfibrarlos y abrir las celdas en donde está contenida la sacarosa. En la desmenuzadora, que es un molino abierto de dos o tres masas, se lleva a cabo la extracción del jugo de primera extracción, que corresponde al 50 al 60% del jugo total.

2.1.4. La obtención por extracción del jugo

Luego del desmenuzador, la caña ya convertida en una colchón de material, pasa por un juego de 5 o 6 molinos, cada uno de ellos compuesto de 3 masas principales que extraen (masa cañera, superior y bagacera) y una cuarta masa más pequeña en diámetro, que es la masa alimentadora, por supuesto que la presión ejercida por las masas de los molinos es sumamente importante, así como la densidad del colchón de material; para ello los molinos deben de tener una presión que oscila entre 2500 A 3000 psig (Spencer, 1967).

Otro factor importante es la velocidad de rotación de las masas, la cual para la máxima extracción, se recomienda que sea de 6 rpm.

Existe una norma a respetar en la industria, que dice: a mayor número de molinos mayor extracción. Anteriormente se señaló que la cantidad de fibra del material es sumamente importante, ya que igual se sabe que: a mayor contenido de fibra, menos extracción.

Es importante saber que el sistema de molienda necesita agua para lograr la máxima extracción de sacarosa, para esto se le agrega la denominada agua de imbibición, que corresponde a la que se utiliza en el último molino para extraerle más cantidad de jugo al bagazo. La misma puede ser simple o compuesta, si solo se agrega agua se denomina simple, pero si se mezcla agua y jugo antes de agregarla al sistema, se denomina compuesta.

Si se sigue este método se estará haciendo una maceración completa, que consiste en retornar el jugo de un molino siguiente al anterior, como ejemplo, del 5 al 4, del 4 al 3 y del 3 al 2; la cantidad de agua que se recomienda oscila entre el 25 al 30% base caña, lo que equivale entre 275 a 300 gpm; el agua se puede agregar fría o caliente, lo ideal, dependiendo del tipo de rallado en los molinos, es que tenga una temperatura entre 55 a 60°C, mientras mejor calidad tenga el agua a agregar, mejor será la razón de extracción; la recomendación es que contenga la menor cantidad de dureza posible.

De acuerdo con Spencer (1967), el agua de imbibición, se agrega normalmente en el cuarto o quinto molino, si la extracción no es la correcta por todos los factores anotados, más el *setting* del tándem, se perderá sacarosa que se irá con el bagazo y se quemará en la caldera.

En esta etapa del proceso, se pueden tener pérdidas fuertes de sacarosa, por crecimientos microbiológicos, principalmente causados por la bacteria *Leuconostoc mesenteroides*.

Este microorganismo genera complejos enzimáticos, que degradarán la sacarosa, formando un polisacárido de alto peso molecular (20×10^6) llamado dextrano; para ello es vital la aplicación de bactericidas, más la limpieza profunda con agua a alta presión y alta temperatura no menor a 80 grados centígrados.

De la molécula de sacarosa, solo la porción de glucosa es usada en la formación de la dextrana, la porción de fructuosa que permanece, se descompone subsecuentemente en ácidos y compuestos colorantes, causando una disminución en el pH del jugo y aumento de color, volviendo a incrementar la tasa de inversión, ocasionando más pérdidas de sacarosa.

Figura 4. **Tándem de molinos**



Fuente: instalaciones del ingenio Providencia, Costa Rica.

Figura 5. **Caña en proceso (colchón de bagazo)**



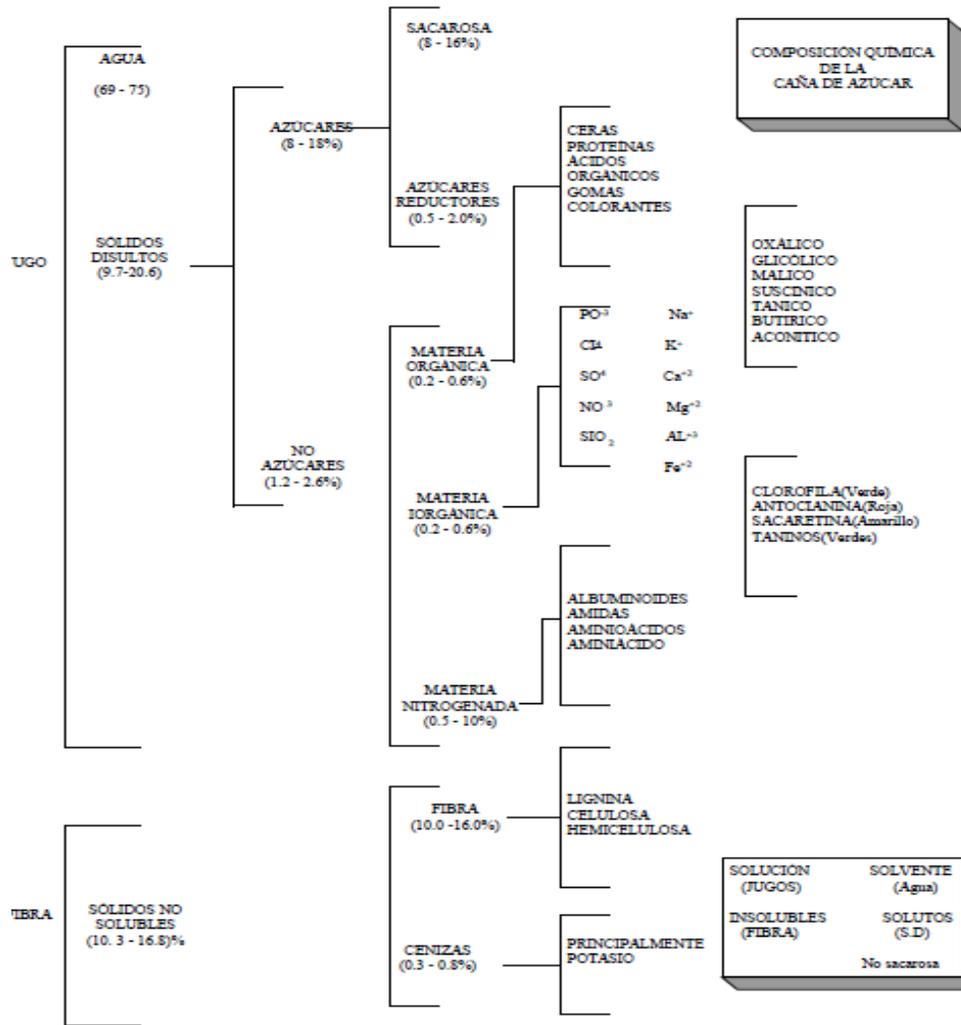
Fuente: maquinaria del ingenio Providencia, Costa Rica.

En los jugos de cañas frescas de las variedades más utilizadas, se pudo determinar que resultaban ser mayoritariamente cinco. Estos azúcares aumentan su contenido luego del corte de la caña por la acción de las propias enzimas de la caña y en parte por la acción de las enzimas de origen microbiano, para así acumularse en los productos intermedios de la fábrica.

Se ha podido demostrar la presencia de azúcares como la D-xilosa, la 1-kestosa, la rafinosa y la lactosacarosa, todos capaces de provocar cambios en la morfología del cristal de sacarosa, aunque pudo comprobarse que la aparición de los “cristales agujas” era provocada principalmente producto de la acción de la D-xilosa y la Lactosacarosa.

La composición normal del jugo de caña se presenta en la siguiente figura.

Figura 6. Composición del jugo de la caña de azúcar



Fuente: BATULE, Eduardo. La clarificación del jugo de la caña y la meladura. p. 40.

Inmediatamente después de su obtención, el jugo debe ser filtrado; para esto se cuenta con filtros banda, llamados cushcush, y posteriormente filtros rotativos y los llamados DSM. Este paso es importante para obtener un buen color de azúcar final, ya que el bagacillo, si no se saca del sistema, continuará coloreando el producto durante todo su recorrido.

Figura 7. **Jugo diluido**



Fuente: maquinaria utilizada en el ingenio Pichichi, valle del Cauca, Colombia.

2.1.5. El proceso de clarificación de jugo

El jugo procedente de los molinos es normalmente de un color verde oscuro, denominado jugo mixto, la razón es que contiene una serie de sólidos tanto suspendidos, como disueltos, lo que le da una apariencia turbia, además de un pH ácido, cercano a 5.2-5.4.

Durante el proceso de clarificación o defecación se busca remover los sólidos antes apuntados, para lograr que se dé este proceso físico químico; se debe de contemplar otros subprocesos involucrados, los cuales son indispensables para lograr este objetivo, dentro de estos están: el alcalizado y el precalentado, normalmente llevados a cabo en ese orden, el proceso de sulfitación (Spencer, 1967).

- La sulfitación: se lleva a cabo inmediatamente después de la extracción, ya que es el momento ideal para remover color y turbidez, disminuyendo

la incidencia de las reacciones de Millard por medio del SO₂, luego para elevar el pH se emplea cal de forma universal.

- El alcalizado: no es más que agregar cierta dosificación de lechada de cal o sacarato que es una mezcla de lechada y jugo de caña; normalmente se utiliza alrededor de 1 libra de cal hidratada (CaO) por tonelada de caña, neutralizando la acidez natural del jugo y formando sales insolubles de calcio, en su mayor parte fosfato de calcio; para este fin es actualmente obligatorio el uso de compuestos clarificantes, dentro de ellos, el ácido fosfórico, los floculantes y los decolorantes.
- El calentamiento del jugo ya alcalizado hasta el punto de ebullición o ligeramente arriba de 103 a 105 grados centígrados: tiene como objetivo coagular la albúmina y algunas grasas, ceras, y gomas, además de catalizar las demás reacciones.

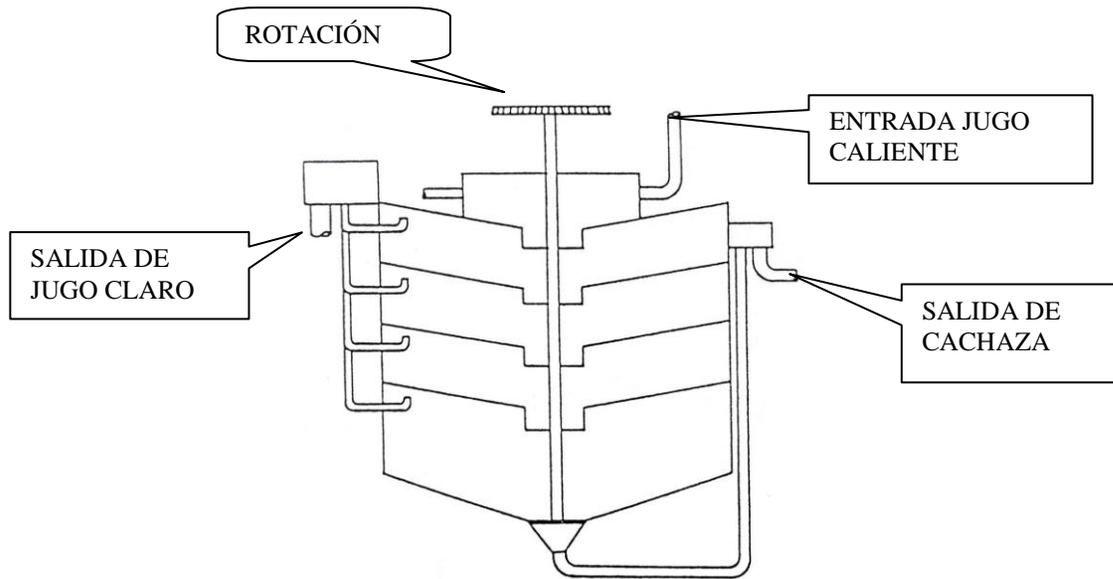
Existen en el mercado, preponderantemente dos tipos de clarificadores, los denominados *door* 4-4-4, y los clarificadores rápidos SRI, ambos con la misma función pero con características diferentes, principalmente su eficiencia y su velocidad.

Tabla II. **Comparación de eficiencia entre un clarificador DOOR 4-4-4 y un SRI**

CARACTERÍSTICA	DOOR 444	SRI
Razón flujo gal/m	1000	1300
Turbidez ICUMSA, UMA	45	10
Remoción de fosfato	93%	97%
Densidad cachaza °Be	10	50

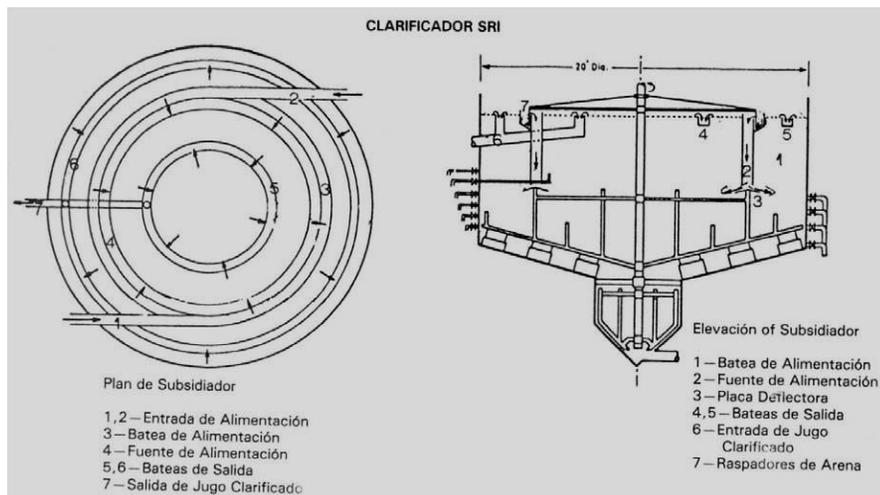
Fuente: BATULE, Eduardo. La clarificación del jugo de la caña y la meladura. p. 38.

Figura 8. Clarificador *DOOR 4-4-4*



Fuente: BATULE, Eduardo. La clarificación del jugo de la caña y la meladura. p.137.

Figura 9. Clarificador *SRI*



Fuente: BATULE, Eduardo. La clarificación del jugo de la caña y la meladura. p. 155.

El resultado final del proceso de clarificación de jugo es, un producto amarillo limón, con excelente turbidez y alto brillo, libre de sedimentos y bagacillo, como lo muestra la fotografía siguiente.

Figura 10. **Jugo claro**



Fuente: ingenio Pichichi, valle del Cauca, Colombia.

2.1.6. La evaporación

El jugo clarificado, físico-químicamente debería de guardar más o menos la misma composición que el jugo mixto, con la diferencia de los sólidos suspendidos, arena y tierra, que han sido evacuados en la clarificación, además de los no azucares que han sido modificados por la sulfitación, pero con una apariencia totalmente diferente, ya que se han extraído las impurezas precipitadas por el tratamiento con cal, así que contiene aproximadamente 85% de agua.

Las dos terceras partes de esta agua se evaporara en la sección de evaporadores al vacío de múltiple efecto, los cuales, como su nombre lo indican son una serie de intercambiadores que trabajando al vacío, y en serie, van cediendo el vapor vegetal que generan al siguiente baso, el cual opera a mas alto vacío, logrando así mantener una rata de evaporación adecuada, optimizando el balance energético de la fábrica, y logrando el objetivo de concentrar el jugo, hasta convertirlo en un material denominado meladura, logrando llevar la solución a concentraciones de 65 grados Brix, el vapor del último efecto pasa a un condensador para aprovecharlo como condensado.

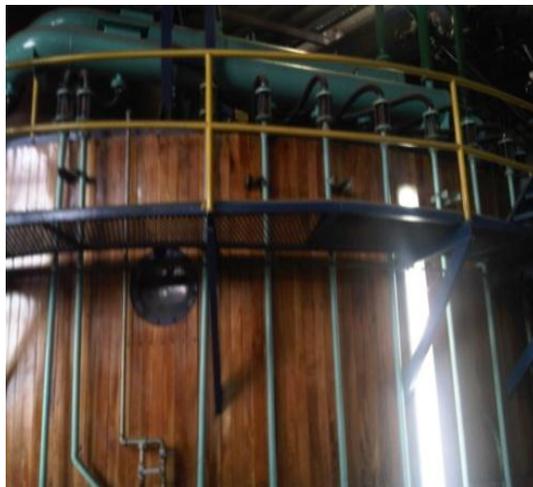
2.1.7. La cristalización

La cristalización tiene lugar en los tachos al vacío de simple efecto, en este equipo, es en donde la meladura, continua su proceso evaporativo hasta saturarse de azúcares. para que el proceso de cristalización se lleve a cabo de manera eficiente es necesario realizar el proceso denominado siembra, que no es más que añadir al tacho, en el momento preciso, la semilla, la cual es sacarosa debidamente tratada, de tal forma que con el tamaño correcto y en una solución alcohólica, sea agregado al tacho, para que acelere el proceso de cristalización sirviendo de núcleo, para que el grano se alimente a la velocidad necesaria y que aproveche la mayor cantidad de sacarosa de la solución.

Debe añadirse paulatinamente más meladura, hasta llegar a los límites de acuerdo al volumen total del tacho y el crecimiento de la templa. Bajo la vigilancia de un tachero y con los instrumentos adecuados, los cristales originales crecen sin que se formen cristales adicionales, o granos falsos de manera que cuando el tacho está totalmente lleno todos los cristales tienen el tamaño deseado, y los cristales y el jarabe forman una masa densa conocida como masa cocida o “magma” (Spencer, 1967).

La “templa” (contenido del tacho) se descarga a un mezclador o cristalizador. La ebullición de las masas cocidas y la reebullición de las mieles se llevan a cabo, utilizando sistemas de ebullición escogidos para ajustarse a muchas condiciones.

Figura 11. **Tacho continuo**



Fuente: instalaciones del ingenio Pantaleón, Escuintla, Guatemala.

2.1.8. La centrifugación

La masa cocida que proviene del mezclador o cristalizador, es descargada a la centrifugas, máquinas automáticas que se encargaran de tamizar el azúcar contenida en la masa.

Esta máquina cuenta con un tambor cilíndrico perforado, y forrado por una tela especial de un *mesh* determinado dependiendo del proceso si es para azúcar crudo o azúcar blanco, y si es de azúcar de primera, comercial o continua (Spencer, 1967).

El tambor gira a velocidades que oscilan entre 1000 y 1800 rpm; la masa que cae en la centrifugadora es sometida a la fuerza centrífuga pasando por un ciclo automático que incluye al menos dos lavados, uno de prepurga con agua a 80 psig y 60 grados centígrados y a un ángulo determinado, y otro de mayor duración, con el objetivo de lavar el grano y que desprenda de su núcleo la miel que viene en la masa; esta lavada formará la miel de segunda o tercera, dependiendo del punto del proceso.

La miel pasa a través del revestimiento debido a la fuerza centrífuga ejercida (de 500 hasta 1800 veces la fuerza de gravedad), y después de que el azúcar es purgado se corta, dejando la centrifuga automática BMA lista para recibir otra carga de masa cocida.

Figura 12. **Centrífuga automática BMA**



Fuente: instalaciones del ingenio Río Paila Castilla, valle del Cauca, Colombia.

2.1.9. El secado

Luego de obtenida la descarga de cada centrifuga, el azúcar purgado es transportada a la línea de secado por transportadores especiales, el principal objetivo es eliminar la humedad residual del proceso de centrifugado, ya que si no se hiciera, el azúcar, a la hora de almacenarse se endurecería por el contacto con el aire del ambiente y no cumpliría con la normas para su comercialización, las secadoras son tambos cilíndricos con flujo de vapor controlado, para que las temperaturas sean las correctas y el azúcar no se queme en este proceso y adquiera así color, lo cual lo sacaría también de norma.

Figura 13. **Secadora de azúcar**



Fuente: ingenio Ciudad Caracas, Cuba.

2.1.10. El envasado

Siguiendo las BPM, el área de embasado ya sea a granel o en otra presentación debe ser un área controlada, por lo que el azúcar se transporta por bandas especiales normalmente cerradas, hasta caer en las tolvas de alimentación, las cuales descargan a las básculas que contienen el empaque adecuado para que el producto no se contamine.

Figura 14. **Área de envasado**



Fuente: ingenio Ciudad Caracas, Cuba.

2.2. El azufre

Este elemento no metal tiene un color amarillento, y arde con llama de color azul, desprendiendo dióxido de azufre. Es insoluble en agua pero se disuelve en disulfuro de carbono. Es un elemento multivalente, y normalmente se le puede encontrar en los estados de oxidación -2, +2, +4 y +6.

2.2.1. Formas del azufre

El azufre se presenta en los 3 estados (sólido, líquido y gaseoso), tiene formas alotrópicas, sus estructuras cristalinas más comunes son el prisma monoclinico (azufre β) y el octaedro ortorrómbico (azufre α). A temperatura ambiente, la transformación del azufre monoclinico en ortorrómbico, es más estable y muy lenta.

Al fundirlo, se obtiene un líquido que fluye fácilmente formado por moléculas S₈. Sin embargo, si solo se calienta, pasa del color amarillo a un color marrón rojizo, incrementando su viscosidad. Esta estructura está constituida por moléculas S₈, pero con estructura de hélice espiral.

En estado de vapor normalmente a 780 °C también se forman moléculas S₈; a temperaturas mayores cercanas a los 1800 °C la disociación es completa y se encuentran átomos de azufre.

Se le encuentra en trozos, barras o polvos; el polvo muy fino se denomina "flor de azufre" que puede obtenerse por precipitación en medio líquido o por sublimación de su vapor sobre una placa metálica fría.

Tiene muchos usos, para la fabricación de pólvora, fertilizantes, para vulcanización y como fungicida; los sulfitos se usan para blanqueo de papel y las sales de magnesio como laxantes; también se utiliza como nutritivo para plantas. En la industria azucarera se usa como fuente de SO₂ gaseoso. Se tiene noción de su uso, desde los tiempos de Homero, quien lo menciona en sus obras, igual que en la Biblia, en donde se relaciona al demonio con el fuego y el azufre, igual en la Edad Media se relacionó el olor sulfuroso con las prácticas demoniacas.

En la figura 15 se puede observar el azufre elemental y el azufre ardiendo; se puede encontrar en la corteza terrestre en grandes cantidades, combinado o en forma nativa, normalmente cerca de lugares volcánicos; el mayor productor mundial es Estados Unidos, en donde se utiliza el proceso *fräsch* para su extracción; también se obtiene del gas natural por separación, en pequeñas cantidades; se observa también en restos fósiles, en este caso en los combustibles que al quemarse generan SO_2 que con la humedad del aire, forman compuestos ácidos generando la llamada lluvia ácida.

Por esta razón, se exige que se reduzca el contenido de azufre en los combustibles, lo que da lugar a que de esta fuente se obtenga la mayor cantidad de azufre que se produce en el mundo.

Como ya se anotó, los óxidos más importantes son el dióxido de azufre, SO_2 (formado por la combustión del azufre) que en agua forma una solución de ácido sulfuroso, y el trióxido de azufre, SO_3 , que en solución forma el ácido sulfúrico, los sulfitos y sulfatos son sus sales respectivas.

Figura 15. **Azufre elemental y combustionado**



Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Burning-sulfur.png>. Consulta: marzo de 2013.

Figura 16. **Azufre elemental en polvo entrando a la tolva del horno de quemado**



Fuente: Ingenio Mayagüez, valle del Cauca, Colombia.

2.2.2. Características fisicoquímicas del azufre

En la siguiente tabla se describen las diferentes características fisicoquímicas del azufre.

Tabla III. **Características fisicoquímicas del azufre**

Punto de ebullición	444° C
Punto de fusión	1220 – 1229 °C
Densidad del vapor	1,1
Presión de vapor	Menor de 0.1 a 140 °C
Gravedad específica	1.14 - 2.07
Tasa de evaporación	Menor de 1.00

Continuación de la tabla III.

Pureza, % base seca	99.9
Cenizas p/p	0.01%
Humedad, p/p	2.00%
Carbón p/p	0.09%
Solubilidad en agua	Insoluble
Peso molecular	256.5
Fórmula	S8

Fuente: elaboración propia.

2.3. La sulfitación

Se refiere a la sulfonación obtenida por reacción del dióxido de azufre, o más generalmente de sus derivados (sulfitos, disulfitos), con un grupo electrófilo.

2.3.1. Antecedentes

Durante años, la industria azucarera ha utilizado el azufre como materia prima para lograr el proceso de sulfitación, por eso es sumamente importante analizar la acción del SO₂, sobre el jugo de la caña.

Se ha tratado por muchos años de establecer diferentes métodos para lograr la inhibición del proceso de caramelización del azúcar con diferentes elementos y formas de aplicación; sin embargo, el más efectivo y rentable es el uso del SO₂.

La acción del SO_2 va más allá de la neutralización del exceso de cal que se adiciona en la alcalización, ya que no solo blanquea el jugo por su reacción con materiales colorantes combinándose con azúcares reductores, sino que bloquea la función carbonilo, además de reducir a compuestos incoloros las sales férricas provenientes del metal de los molinos.

Las materias colorantes en el jugo se pueden clasificar en las que vienen de la parte verde de la caña, clorofilas y carotenos; los materiales no azúcares, como los fenólicos, polifenoles y flavonoides, son los que más contribuyen al color y por último los compuestos del caramelo, fundamentados en las reacciones de Maillard, ya mencionadas anteriormente.

Aun así, se sabe que todos estos compuestos son apenas el 17% del 1% de todas de componentes del jugo de la caña, pero su incidencia es enorme en el color.

2.3.1.1. El proceso de sulfitación

El proceso de sulfitación, consiste en hacer pasar los gases de la tostación de azufre elemental, en contracorriente con el jugo de la caña de azúcar en una torre de contacto (torre de sulfitación), con el objetivo de que el SO_2 generado entre en contacto con el jugo, generando bisulfitos que reaccionarán con las proteínas y los aminoácidos para bloquear por medio de las reacciones de Millard, la formación de compuestos que le den color al material de proceso.

El radical SO_3 que se generará, formará sulfito cálcico que precipitará con la cachaza, actuando como clarificante.

2.3.1.2. Reacciones químicas en la sulfitación

Las reacciones químicas que se dan al realizar este proceso de sulfitación con azufre son las siguientes:



El ácido sulfuroso se disocia en bisulfito e hidrógeno:



El bisulfito reacciona con los grupos carboxilos que dan color.

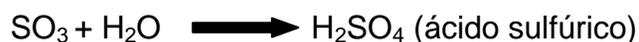


El SO_3^- reacciona con el calcio del jugo y el que se agrega con la cal, formando el sulfito de calcio CaSO_3 , que a la temperatura de 80°C se hace muy estable y es un magnífico clarificante de coloides que dan color.



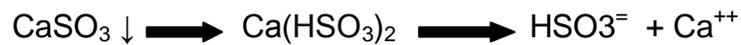
Reacciones indeseables:

El SO_2 a la temperatura de fusión del azufre (400°C) forma SO_3 y con la humedad del aire forma ácido sulfúrico, que llega junto con el SO_2 al jugo.



El ácido sulfuroso y ácido sulfúrico al entrar en contacto con el jugo mezclado, disminuyen en forma drástica el pH a valores de 3.5 a 4.0, ocasionando formación de azúcares reductores por inversión de sacarosa. (pérdida de azúcar).

Cuando se excede la sulfitación y el SO₂ sobrepasa su punto de saturación, el sulfito de calcio (CaSO₃ ↓) se disuelve nuevamente en:



Al entrar a los evaporadores con temperaturas de ebullición, el bisulfito se descompone en SO₂ y se forman incrustaciones de sulfitos; además el SO₂ se disuelve en el condensado causando baja en el pH y corrosión en las líneas de vapor condensado.

Los productos de corrosión son arrastrados hasta calderas, causando depósitos e incrustaciones con su consecuente disminución de eficiencia calorífica, requiriendo más combustible para generar la misma cantidad de vapor.

Sin perder de vista que estas incrustaciones de fierro pueden causar fallas en los tubos y paros muy costosos.

Otras reacciones:





2.4. El equipo de sulfitación convencional

A continuación se describe el equipo necesario para realizar el proceso de sulfitación.

2.4.1. Diseños de torres de sulfitación

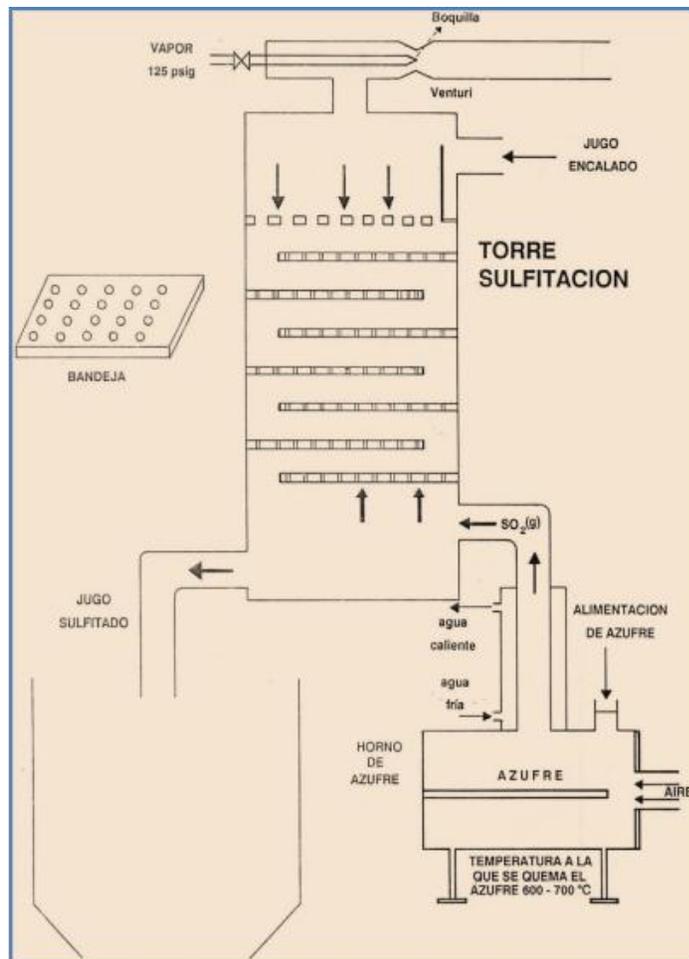
En una industria azucarera, el proceso típico de clarificación es como sigue: al jugo que proviene del filtrado inicial tiene un pH ácido entre 5.1 y 5.6 unidades.

En un primer tanque, se le adiciona lechada de cal; a esto se le conoce como prealcalización, con el fin de aumentar el pH hasta valores entre 6.5 y 7.0 este proceso no se realiza en todos los ingenios, la mayoría realiza primero la sulfitación y luego una alcalización completa.

El objetivo de la prealcalización es minimizar pérdidas de sacarosa, además de lograr que la cal adicionada ayude a precipitar impurezas y aumente la capacidad del coagulante o floculante. A continuación el jugo se hace pasar por la torre sulfitadora o tanque sulfitador, dependiendo del diseño. El objetivo es adicionar, en forma de finas burbujas, una corriente de humos (SO_2 , N_2 , O_2) proveniente de la quema de azufre sólido en un horno. En este proceso, el jugo sufre un aumento de temperatura de hasta 8°C por el contacto con los humos.

Como ya se señaló, el dióxido de azufre en sus reacciones posteriores, transforma compuestos que dan coloración oscura al jugo en compuestos incoloros, este efecto se mantiene incluso durante los de calentamientos posteriores que sufrirá el jugo, además de servir de agente antiséptico. La sulfitación tiene un efecto sobre el pH del jugo, reduciéndolo a niveles entre 4.3 y 4.5, justo en el límite inferior del intervalo en el cual se produce la pérdida de sacarosa, por lo que el control de pH resulta crítico.

Figura 17. Diagrama de flujo horno de azufre y torre de sulfitación



Fuente: BATULE, Eduardo. La clarificación del jugo de la caña y la meladura. p. 92.

Figura 18. **Bandejas de horno de azufre**



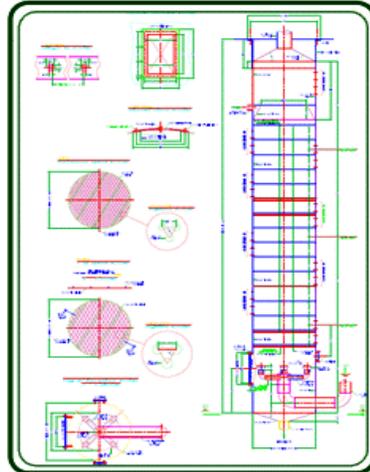
Fuente: instalaciones de Ingenio Mayagüez, valle del Cauca, Colombia.

Figura 19. **Estufa de azufre y horno de seguridad**



Fuente: instalaciones de Ingenio Mayagüez, valle del Cauca, Colombia.

Figura 20. **Diseño de la torre de sulfitación del ingenio Chumbagua, Honduras**



Fuente: www.chumbagua.com- Consulta: febrero de 2013.

Lamentablemente por todas las circunstancias no ideales de los diferentes sistemas empleados para la sulfitación, la absorción de SO_2 dentro del jugo es reducida, y una gran cantidad va hacia el ambiente; la temperatura es dentro de los múltiples factores uno de los más incidentes, como puede comprobarse en la siguiente tabla.

Tabla IV. **Absorción de SO_2 versus temperatura**

ABSORCIÓN DE SO_2 EN % DE ACUERDO CON LA VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA	
TEMPERATURA °C	% ABSORCIÓN
20	8.6
30	7.4
40	6.1
50	4.9
100	0.1

Fuente: elaboración propia.

2.4.2. Proceso de clarificación

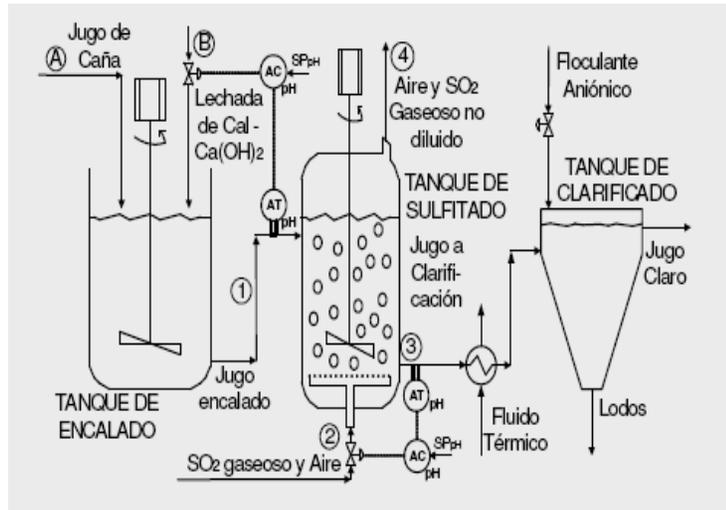
Si se ha realizado una prealcalización, el pH del jugo ya sulfitado, no se reducirá tanto, por lo que luego de salir del sulfitador, se acostumbra una segunda alcalinización; esta es la más recurrente; esta alcalización se espera arrastre partículas pequeñas y torne insolubles algunos contaminantes.

Se calienta el jugo hasta 105°C, normalmente con vapor de escape, buscando facilitar la formación de flóculos y catalizar las reacciones por medio de la temperatura.

Antes de entrar al clarificador, y luego de ser calentado, se le agrega el floculante respectivo, haciéndolo pasar antes por el tanque flash, en donde se separan los gases que el jugo lleva; de este modo, se logra separar del jugo, por decantación los sólidos o cachaza, que van al fondo, logrando el jugo claro que sale por la parte superior.

Todo el proceso de clarificación se ve afectado por varias perturbaciones, entre las que vale mencionar la preparación de la cal o sacarato, mala operación o desperfectos en los hornos de sulfitación, flujos de jugo cambiantes por alteraciones en la operación de molino, entrada de corrientes de recirculación del proceso (jugo filtrado, aguas dulces), mala preparación del floculante y mala escogencia del mismo, etc.

Figura 21. Diagrama de flujo general del proceso de clarificación



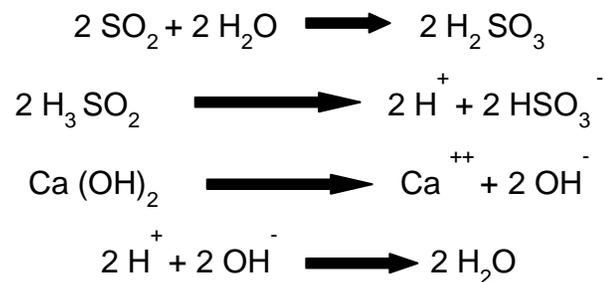
Fuente: <http://eventos.saber.ula.ve/eventos/getFile.py/access?contribId=217&sessionId=66&resId=0&materialId=paper&confId=47>. Consulta: enero de 2013.

2.4.3. Reacciones químicas básicas en el proceso de clarificación

De acuerdo con Revollar et al, en su trabajo “Diseño Integrado de la planta de sulfitación en un ingenio azucarero”, en el primer tanque de la etapa de clarificación (tanque de encalado), la reacción que ocurre es una neutralización de la acidez del jugo (H^+) con hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$), lo que deja un exceso de cal en suspensión (a manera de “buffer”). Si esto no existe, básicamente el jugo entrará a la torre, inmediatamente de ser filtrado y se producirá la disminución de pH apuntado. También sugiere el mismo autor junto con su equipo de investigadores, que “en el tanque de sulfitado (segunda etapa), las reacciones químicas incluyen la ya mencionada, debido a que del tanque de encalado pasa exceso de cal en suspensión”.

Finalmente, en el clarificador, además de los efectos físicos del floculante aniónico (no mostrados en las reacciones químicas que siguen), se presenta la formación del sulfito de calcio CaSO_3 . Las reacciones químicas que se dan en toda la etapa de clarificación son:

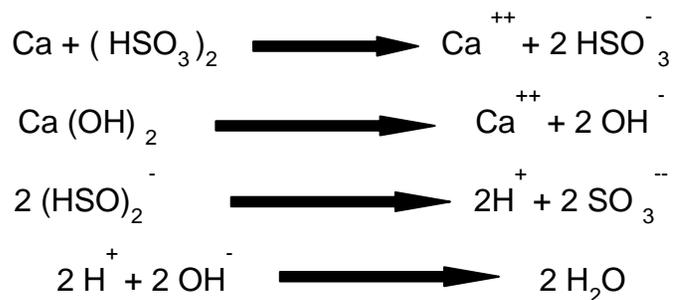
Primera parte de la neutralización- formación de sulfito:



Combinando las reacciones se tiene:



Segunda parte de la neutralización:



La combinación de las reacciones da:



Finalmente combinando la primera con la segunda reacción da:



3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Se evaluaron las variables de pH de jugo mixto, pH de jugo sulfitado, color del jugo mixto, color del jugo clarificado, color de la meladura cruda, color de la meladura clarificada, la TDZ de la meladura cruda y la meladura clarificada y el contenido de sulfitos y cenizas remanentes en el azúcar.

3.2. Delimitación del campo de estudio

Habría que centrarse en el impacto comparativo de la sulfitación, para eso se tomará en cuenta los procesos de sulfitación, alcalización, clarificación de jugo y meladura además de los colores de azúcar obtenidos luego del proceso de secado.

3.3. Recurso humano disponible

- Investigador: Br. Elmar Giovanni Cardona Quintana
- Asesor: Ing. Q. Adolfo Narciso Gramajo Antonio
- Personal del laboratorio de cada una de las unidades

3.4. Localización

La parte experimental de la investigación se llevó a cabo en las instalaciones de una central azucarera en la república de Colombia, precisamente en el laboratorio de fábrica.

3.5. Recursos materiales disponibles

- Jugo de caña de azúcar
- Hidróxido de sodio o sacarato
- Floculante catiónico de alta carga y alto peso molecular
- Donador de SO₂
- Ácido fosfórico

3.5.1. Equipo y cristalería

A continuación se describe el equipo utilizado para el experimento en el laboratorio.

3.5.1.1. Equipo y cristalería utilizada para la determinación de la dosis adecuada en el laboratorio

- Toma muestras de jugo mixto
- Balanza analítica
- Probetas
- Pipetas
- Agitador magnético
- Planchas eléctricas
- Termómetro
- *Beackers*
- Tubos de ensayo
- 5 vasos de vidrio de 250 ml
- 2 probetas graduadas de un litro
- Una olla para calentar el jugo de 5 litros

- Jeringas de 5 ml para aplicar el floculante
- Un potenciómetro portátil para alcalizar el jugo
- Tres jarras de un litro de plástico para mezclar
- Vasos con canicas para preparar el floculante

3.5.1.2. Equipos para prueba industrial

Los equipos que se utilizaron para el proceso de sulfitación fueron:

- Equipo de preparación y dosificación del donador de SO₂
 - Tanque de preparación
 - Tanque de dosificación
 - Agitador
 - Bomba de dosificación
 - Estructura de soporte

- Equipos del ingenio a ser utilizados
 - Bombas de jugo
 - Tanque de jugo mixto
 - Tanque de alcalización
 - Medidores de pH jugo alcalizado
 - Bombas de alcalización
 - Calentadores de jugo mixto
 - Clarificador 4 x 4 rapidor
 - Clarificador SRI

Figura 22. **Dosificador de donador de SO₂ a la balanza de jugo mixto**



Fuente: instalaciones del ingenio Providencia, valle del Cauca, Colombia.

3.6. Técnica cualitativa y cuantitativa

A continuación se describen los protocolos de demostración en laboratorio para la clarificación de jugo y meladura con floculantes y donador de SO₂.

3.6.1. Protocolo de demostración en laboratorio para clarificación de jugo con floculantes y donador de SO₂

- Preparación del floculante del proceso a 0.1% de concentración y dejarlo madurar por una hora;
- Tomar una muestra de 5 litros de jugo mezclado, ya colado, ir con el que toma la muestra personalmente, esto es muy importante, para la representatividad de la prueba;
- Tomar el pH de la muestra;

- Tomar un litro de la muestra y agregar la dosis óptima de donador de SO₂ que se determinó en los ensayos de laboratorio;
- Agregar la cantidad de ácido fosfórico necesario para complementar el fosfato disponible que viene en la caña, para llevarlo a un mínimo de 250 ppm y un máximo de 300;
- Agitar bien, esperar 10 minutos;
- Alcalizar al pH del ingenio, normalmente se deberá de alcanzar un pH entre 7.0-7.2, con la lechada de cal o saca rato del proceso;
- Calentar a ebullición;
- En una probeta de un litro, agregar 50 ml del floculante diluido 1:10, agregar jugo caliente, mezclarlo bien y ver la formación del floc, tiempo de sedimentación y el jugo claro. Tomar lectura del desplazamiento del floc formado cada minuto, durante cinco minutos (5 lecturas). Esperar 30 minutos y ver la consistencia del lodo formado debe estar en la marca entre, 200 ml. (+/- 50 ml). Se grafica el volumen desplazado cada minuto, hasta los cinco minutos, contra el tiempo en minutos;
- Comparar con el jugo claro del proceso a la misma hora, sacar una muestra personalmente y primero hacer la comprobación visual, y tomarle una fotografías juntas, en tubos de ensayo;
- Determinarle color, turbidez, pureza. azúcares reductores, BRX y sacarosa;
- Obtener los mismos datos del jugo claro del proceso, para compararlo con el claro de la mejor muestra obtenida.

3.6.2. Protocolo de demostración en laboratorio para clarificación de meladura con floculantes y el donador de SO₂

Productos a usar:

- Donador de SO₂ en polvo
- Ácido fosfórico grado alimenticio
- Pureza: 85%
- Densidad: 1.7
- Floculantes
- Cal (lechada o sacarato)

Preparación de soluciones:

- Ácido fosfórico

Soluciones de 10 gr./lt.

$10 \text{ gr.} / 1.7 \text{ gr./cm}^3 = 5.882 \text{ ml.}$

Pureza 85%. = $5.882 / 0.85 = 6.92 \text{ ml.}$

Es decir se miden 6.92 ml de ácido fosfórico y se diluyen con un litro de agua, para obtener una solución de 10 gr/lt (10 mg/ml); 6.92 ml para probetas de un litro; 3.46 ml para probetas de ½ litro; 1.384 ml para vasos de 200 ml o se miden 1.384 ml de ácido fosfórico y se le agregan a 200 ml de agua, para obtener una solución de 10 gr/lt.

Esta solución servirá para tener las siguientes ppm en diferentes recipientes:

- 1ml = 10 mg
 - 1 ml en un litro de meladura son 10 ppm
 - 1 ml en 0.5 litros de meladura son 20 ppm
 - 1 ml en 0.2 litros de meladura son 50 ppm
 - 2 ml en 0.2 litros de meladura son 100 ppm
- Lechada de cal: preguntar por la concentración y tiempo de madurez.
 - Floculantes: preparación de soluciones de 0.1%
 - 1 gr/ lt. = 1 mg/ml
 - 0.5 gr/ 0.5 lt = 1 mg/ ml
 - 0.2 gr/ 0.200 lt = 1 mg/ml

Se diluye 1 a 10 para que se incorpore mejor al proceso:

- Gr/lt = 0.1 mg/ml
- 10 ml = 1 mg

Para obtener 15 ppm en vasos de precipitado de 200 ml, se agregan 3 ml de floculante al 0.01% a un vaso de 200 ml:

- 10 ml/lt = 1 ppm
- 10 ml/0.5 lt = 20 ppm
- 10 ml/0.20 lt. = 50 ppm

Material de laboratorio necesario:

- 5 vasos de vidrio de 200 ml
- 3 jarras de plástico de un litro (con marca en un litro)
- 2 probetas de un litro de vidrio graduadas
- 2 agitadores manuales
- Estufa o resistencia para calentar
- Recipiente de metal de 2 a 4 litros para calentar la meladura
- Un potenciómetro portátil

Procedimiento:

- Tomar 5 litros de meladura sin tratar del proceso;
- Mezclando todo el tiempo, pasar un litro al recipiente metálico para calentar;
- Tomar el pH;
- Adicionar la dosis de ácido fosfórico que indique el azucarero (estar seguros). En caso de dudas, agregar ácido fosfórico agregando poco a poco hasta bajar un punto el pH;
- Agregar donador de SO₂ con 20 ppm y 20 mg de donador en un litro de meladura;
- Sin dejar de agitar, esperar 5-10 minutos y agregar cal hasta obtener el pH del proceso o recuperar el punto bajado por el ácido fosfórico;

- Calentar a 90°C;
- Pasar de inmediato la meladura tratada a una jarra de plástico de un litro;
- Con los vasos preparados con los diferentes floculantes con 15 ppm a cada uno de los vasos, agregar la meladura tratada en forma rápida a los vasos y observar el mejor resultado de claridad;
- Tomar los datos pertinentes (brx, pureza, color, turbidez) en meladura sin clarificar, meladura clarificada con donador de SO₂ y meladura clarificada del proceso.

3.7. Recolección y ordenamiento de la información

Se establecieron los datos del promedio acumulado durante todos los meses de zafra del 1 de enero al 3 de agosto, en los siguientes rubros: toneladas de caña molida, kg de cal, kg de cal/toneladas de caña molida, kilogramos de azufre y kg de azufre/tonelada de caña molida.

Se determinó cada día la variación de los colores de jugo diluido y jugo clarificado, la turbiedad del jugo clarificado, el % de remoción de color entre el jugo diluido y clarificado, además los colores de meladura sin clarificar, meladura clarificada, turbiedad de la meladura sin clarificar, la remoción porcentual del color, la turbiedad de la meladura clarificada, además del color del azúcar; todas estas mediciones en UI.

Además, se tomaron los datos de turbiedad del azúcar, las cenizas y los sulfitos remanentes y por último, los pH del jugo diluido y el jugo sulfitado, obteniendo el delta pH entre estas mediciones.

3.8. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Luego de establecer la base de estos datos, se procedió a tomar las mismas mediciones diarias cada 3 horas, reportando al final del día, el valor promedio diario de cada una de ellas, del periodo comprendido del 3 al 29 de agosto.

3.9. Análisis estadístico

Por el método regresión lineal se estableció la tendencia de las diferentes variables a ser estudiadas; se aplicó un modelo matemático en cada caso, para determinar el grado de dependencia de las mismas, ya sea directa o inversa, según sea el caso.

4. RESULTADOS

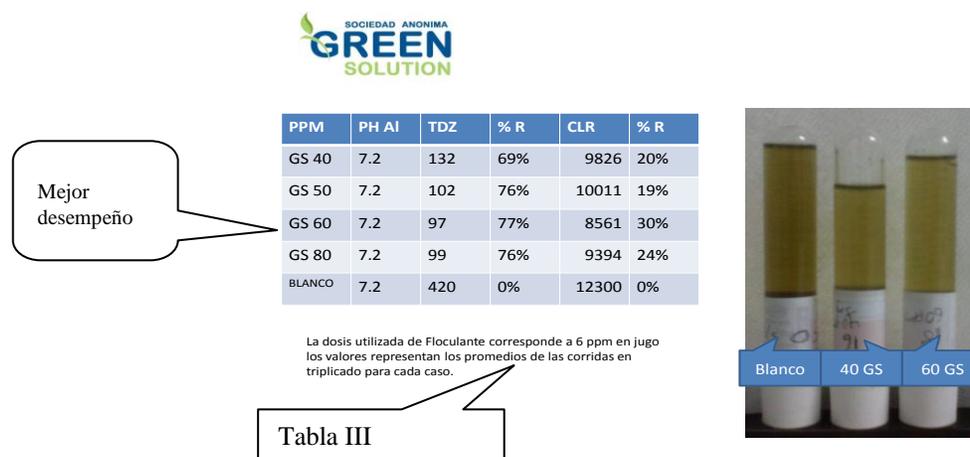
4.1. Resultados en laboratorio

A continuación se presentan los resultados de laboratorio de los ensayos propuestos.

4.1.1. Resultados de laboratorio en la aplicación al jugo

En la figura siguiente se presentan los resultados obtenidos en la aplicación del jugo.

Figura 23. **Resultados de laboratorio: aplicación al jugo**



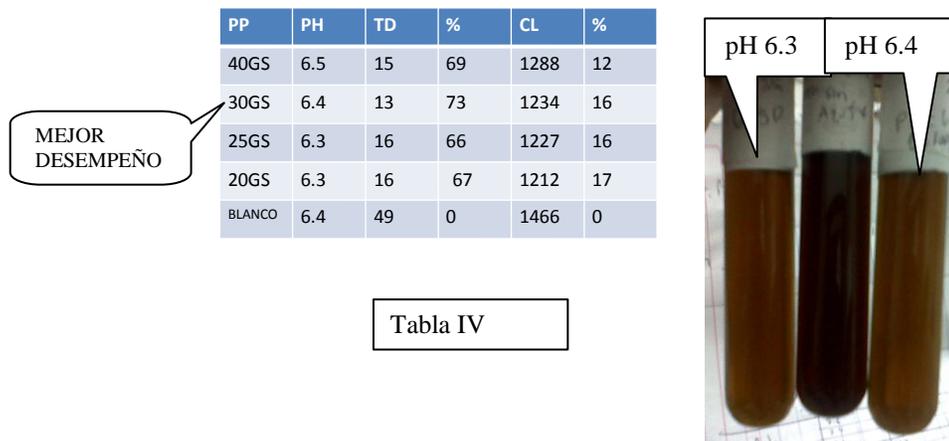
Fuente: elaboración propia.

Se pudo determinar que a una concentración de 60 ppm del donador de SO₂ y a un pH de 7.2 se logra una reducción de la TDZ del 77% y un 30 % de decoloración.

4.1.2. Resultados de laboratorio en la aplicación a la meladura

A continuación se presentan gráficamente, los resultados de la aplicación a la meladura.

Figura 24. Aplicación de donador de SO₂ a la meladura



Fuente: elaboración propia.

Se pudo comprobar que con una dosis de 30 ppm de donador de SO₂ se logra una reducción de la TDZ del 73% una reducción en color del 16% en la meladura.

4.2. Resultados de aplicación a nivel industrial

Se logró obtener azúcar blanco directo de menos de 250 unidades de color, sustituyendo el 100% la quema de azufre elemental, lográndolo por medio de la decoloración y clarificación del jugo de la caña del proceso en el ingenio base de este caso de estudio, utilizando el donador de SO₂.

Se logró una reducción de color del jugo diluido, al jugo claro del orden del 21%, o sea un 16% más que con la aplicación de azufre.

Se logró llevar el delta pH a cero a partir del día 13 de agosto, ya que se fue reduciendo paulatinamente la aplicación de azufre y el aumento de la dosis del donador de SO₂; 12 horas después de eliminar el azufre, el delta pH era prácticamente cero.

El color promedio de la meladura sin clarificar, durante el periodo de la aplicación, se redujo en 1004 UI, lo que corresponde a un 6.3%.

El valor de la turbidez de la meladura sin clarificar se redujo en 1410 UI, lo que corresponde a un 24.6%

Se pudo comprobar que el efecto de la sulfitación en el color de la meladura, es prácticamente mínimo, lo cual es normal, ya que el clarificador de meladura está diseñado para reducir la turbidez y no el color.

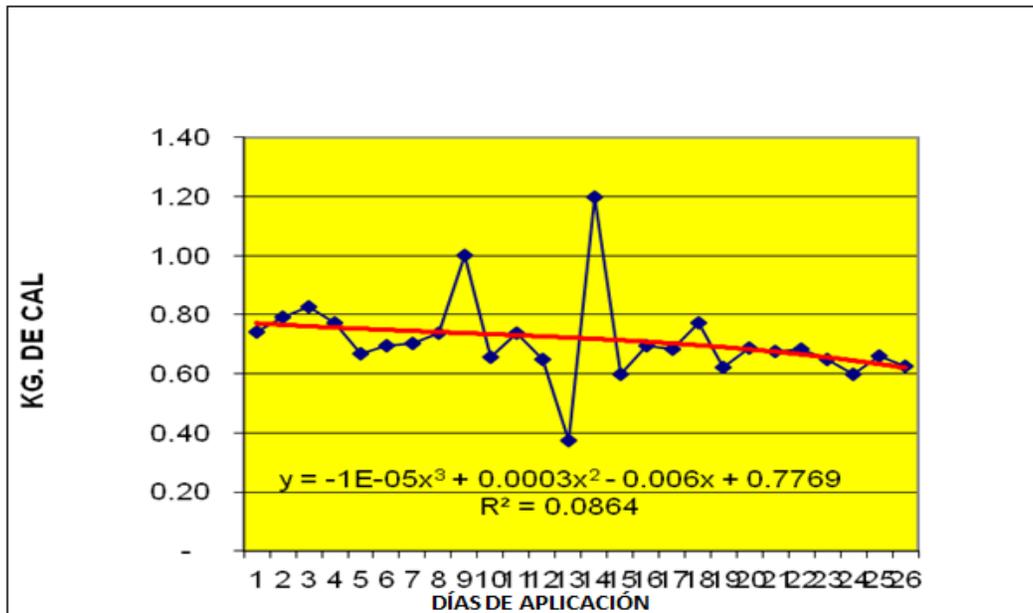
El valor promedio de la reducción de la turbidez entre la meladura sin clarificar y la clarificada corresponde 3741 UI, lo que equivale a una reducción porcentual del 65% respecto del promedio anterior, al inicio de la aplicación.

Se determinó una reducción del 11% en la turbiedad del azúcar final, un 22% en las cenizas residuales y un 60% en el residual de sulfitos.

Se logró mantener prácticamente el color promedio del azúcar del ingenio, sin necesidad de hacer reprocesos de fundición (Remeltin), logrando un blanco directo de 225 UI sin la quema de azufre elemental y sus correspondientes problemas, sin afectar el pH del jugo diluido; lo que al final redundará en mayor recobrado de azúcar al eliminar las inversiones por la reducción del pH ente el jugo diluido y el sulfitado.

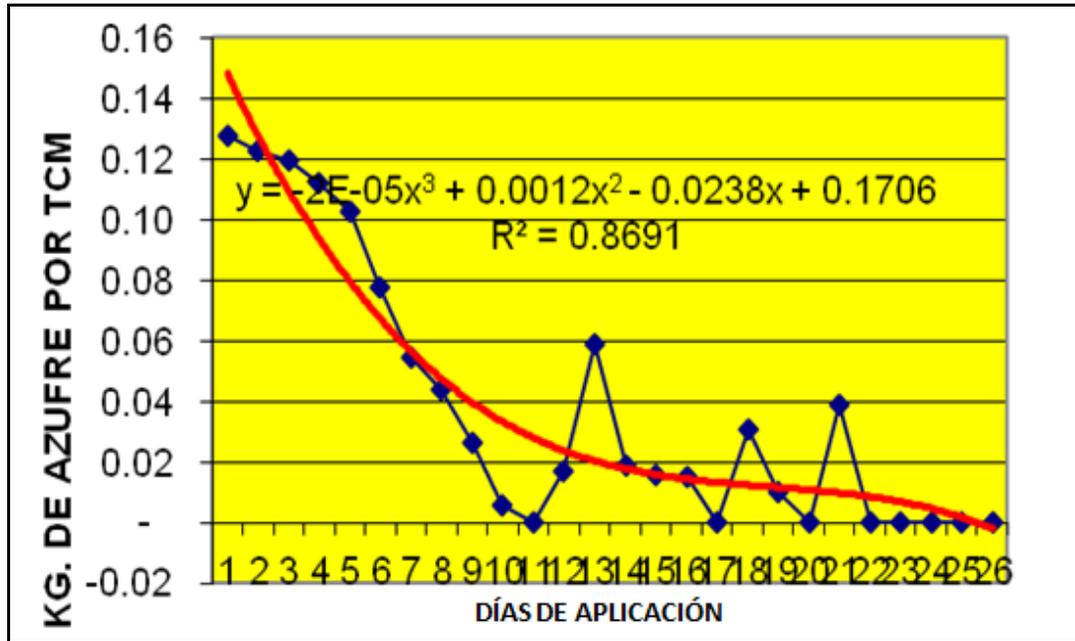
Se obtuvo una reducción del consumo de cal del orden de los 0.17 kilos por tonelada de caña molida, lo que corresponde a un 12.25%; esto puede apreciarse en la siguiente gráfica.

Figura 25. Consumo de cal



Fuente: elaboración propia.

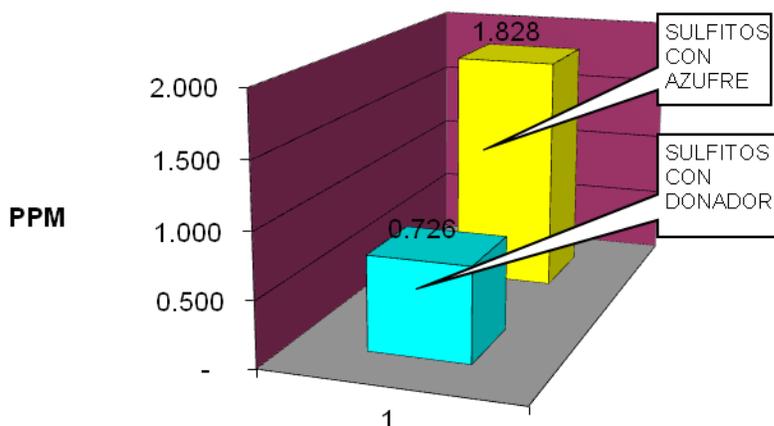
Figura 26. Consumo de azufre en kg por tonelada de caña molida



Fuente: elaboración propia.

Se logró eliminar el uso de azufre.

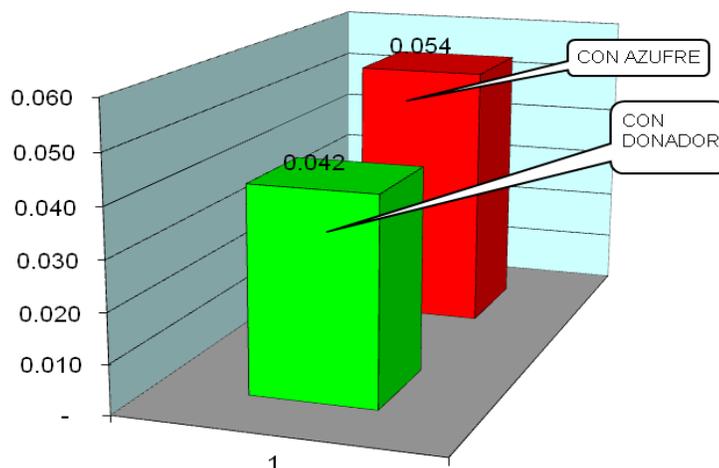
Figura 27. **Sulfitos remanentes con azufre y con donador de SO₂**



Fuente: elaboración propia.

Se disminuyó en un 60 % el contenido de sulfitos remanentes en el azúcar.

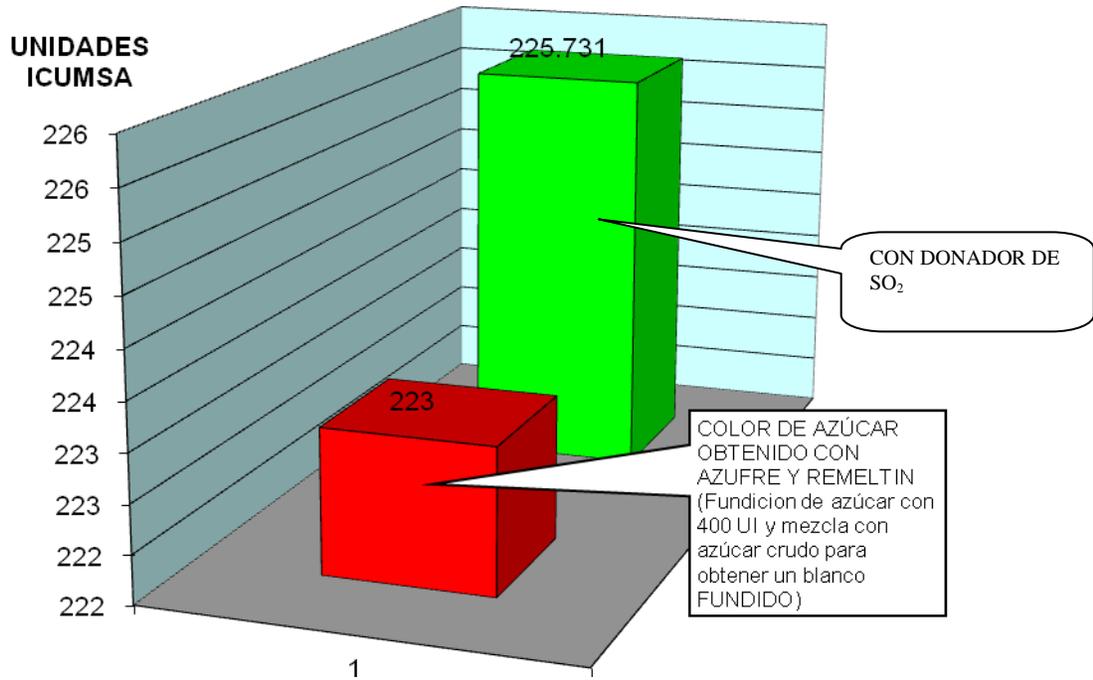
Figura 28. **Cenizas remanentes con azufre y con donador de SO₂**



Fuente: elaboración propia.

Se disminuyeron en un 22 % las cenizas remanentes en el azúcar.

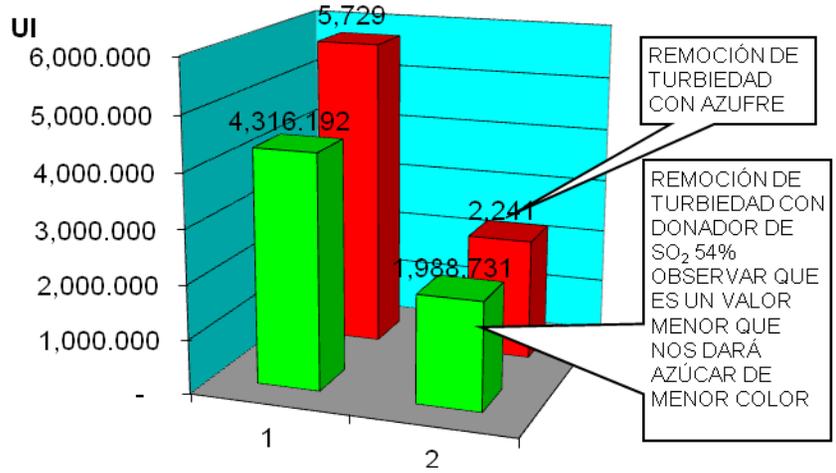
Figura 29. **Color del azúcar con azufre y con donador de SO₂**



Fuente: elaboración propia.

Se mantuvieron los colores del azúcar, sin la necesidad de hacer reproceso, lo que se denomina blanco directo.

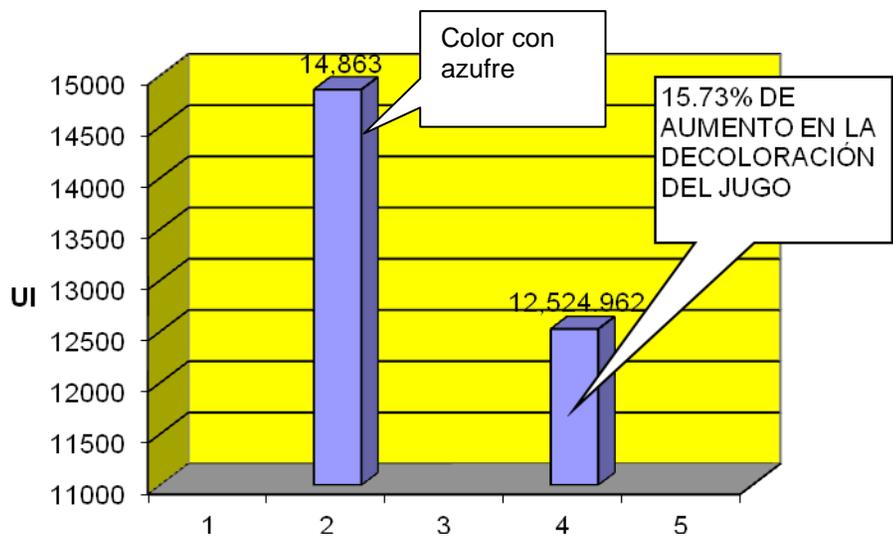
Figura 30. **Turbiedad en la meladura con azufre y con donador de SO₂**



Fuente: elaboración propia.

Se obtuvo una importante reducción de la turbiedad.

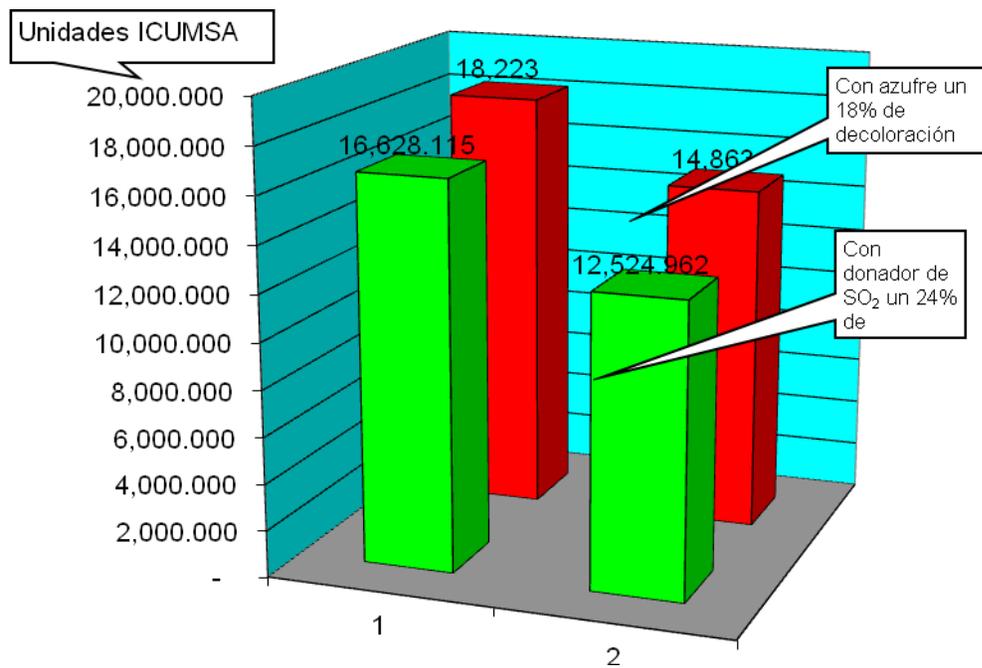
Figura 31. **Color del jugo clarificado sulfitado con azufre y con donador SO₂**



Fuente: elaboración propia.

Se logró una reducción de color entre el jugo mixto y el jugo sulfitado superior a la obtenida con el azufre

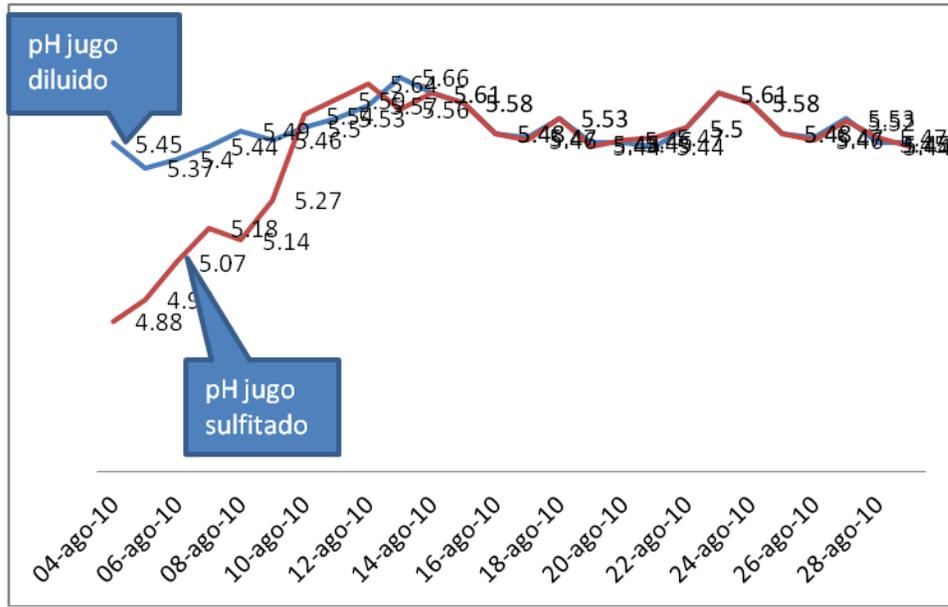
Figura 32. **Color del jugo diluido y el jugo claro sulfitado con azufre y con el donador de SO₂**



Fuente: elaboración propia.

Se logró una decoloración adecuada del jugo mixto.

Figura 33. Comportamiento del pH del jugo sulfitado con el donador de SO₂



Fuente: elaboración propia.

Se logró llevar el pH del jugo sulfitado, al pH del jugo mixto original, logrando un delta pH de cero.

4.2.1. Análisis matemático de la correlación de las variables estudiadas

En la siguiente tabla se presentan los resultados de las variables azufre y cal.

Tabla V. **Variable independiente azufre, dependiente cal**

Resumen del procesamiento de las variables

	Variables		
	Dependiente	Independiente	
	Sulfitos azúcar blanco	Azufre kg	
Número de valores positivos	23	18	
Número de ceros	0	0	
Número de valores negativos	0	0	
Número de valores perdidos	Perdidos definidos por el usuario	3	8
	Perdidos del sistema	0	0

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Modelo y estimaciones de los parámetros, sulfitos azúcar blanco y azufre en kg**

Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros					
Variable dependiente: sulfitos azúcar blanco					
Ecuación	Resumen del modelo				
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.
Lineal	.315	5.991	1	13	.029
Cuadrático	.450	4.904	2	12	.028
Cúbico	.457	3.082	3	11	.072
Crecimiento	.496	12.797	1	13	.003
Exponencial	.496	12.797	1	13	.003

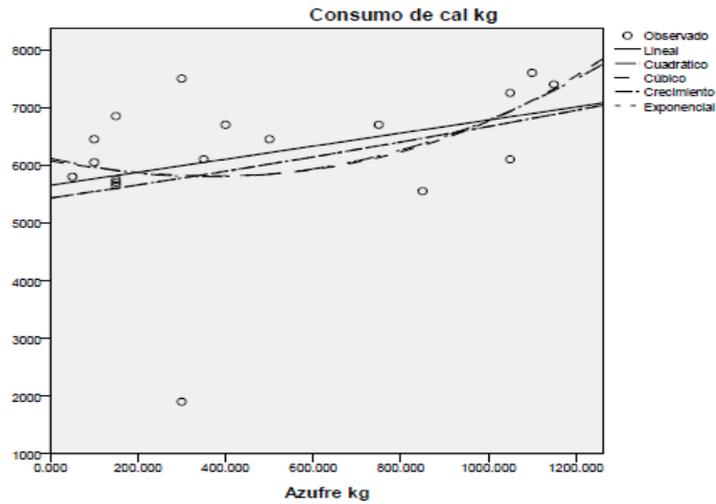
La variable independiente es azufre kg.

Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros				
Variable dependiente: sulfitos azúcar blanco				
Ecuación	Estimaciones de los parámetros			
	Constante	b1	b2	b3
Lineal	.287	.001		
Cuadrático	-.556	.006	-3.820E-6	
Cúbico	-.319	.004	1.406E-6	-2.995E-9
Crecimiento	-1.710	.002		
Exponencial	.181	.002		

La variable independiente es azufre kg.

Fuente: elaboración propia.

Figura 34. Consumo de cal y azufre por kilogramo



Fuente: elaboración propia.

4.2.2. Variable independiente azufre; dependiente sulfitos

A continuación puede apreciarse el resumen de las variables azufre y sulfitos.

Tabla VII. Resumen procesamiento de las variables

		Variables	
		Dependiente	Independiente
		Sulfitos azucar blanco	Azufre kg
Número de valores positivos		23	18
Número de ceros		0	0
Número de valores negativos		0	0
Número de valores perdidos	Perdidos definidos por el usuario	3	8
	Perdidos del sistema	0	0

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. Estimaciones de los parámetros cenizas y consumo de cal

Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: cenizas azúcar blanco

Ecuación	Resumen del modelo				
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.
Lineal	.152	3.776	1	21	.066
Cuadrático	.481	9.279	2	20	.001
Cúbico	.494	6.179	3	19	.004
Crecimiento	.136	3.314	1	21	.083
Exponencial	.136	3.314	1	21	.083

La variable independiente es consumo de cal kg.

Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

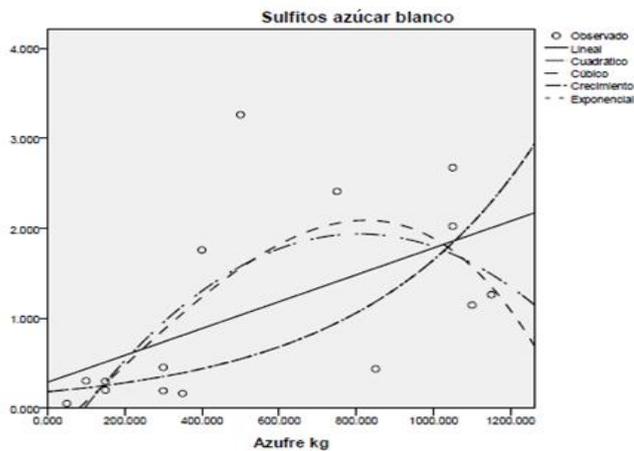
Variable dependiente: cenizas azúcar blanco

Ecuación	Estimaciones de los parámetros			
	Constante	b1	b2	b3
Lineal	.030	2.719E-6		
Cuadrático	.070	-1.523E-5	1.815E-9	
Cúbico	.028	1.872E-5	-5.686E-9	4.969E-13
Crecimiento	-3.395	5.285E-5		
Exponencial	.034	5.285E-5		

La variable independiente es consumo de cal kg.

Fuente: elaboración propia.

Figura 35. Sulfitos azúcar blanco



Fuente: elaboración propia.

4.2.3. Variable independiente cal; dependiente las cenizas

En la tabla siguiente se incluye los resultados de las variables cenizas y consumo de cal y un resumen del modelo y estimaciones de los parámetros.

Tabla IX. **Variabes cenizas y consumo de cal**

Resumen del procesamiento de las variables

		Variables	
		Dependiente	Independiente
		Cenizas azúcar blanco	Consumo de cal kg
Número de valores positivos		23	26
Número de ceros		0	0
Número de valores negativos		0	0
Número de valores perdidos	Perdidos definidos por el usuario	3	0
	Perdidos del sistema	0	0

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Estimaciones de los parámetros cenizas y consumo de cal**

Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: cenizas azúcar blanco

Ecuación	Resumen del modelo				
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.
Lineal	.152	3.776	1	21	.066
Cuadrático	.481	9.279	2	20	.001
Cúbico	.494	6.179	3	19	.004
Crecimiento	.136	3.314	1	21	.083
Exponencial	.136	3.314	1	21	.083

La variable independiente es consumo de cal kg.

Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

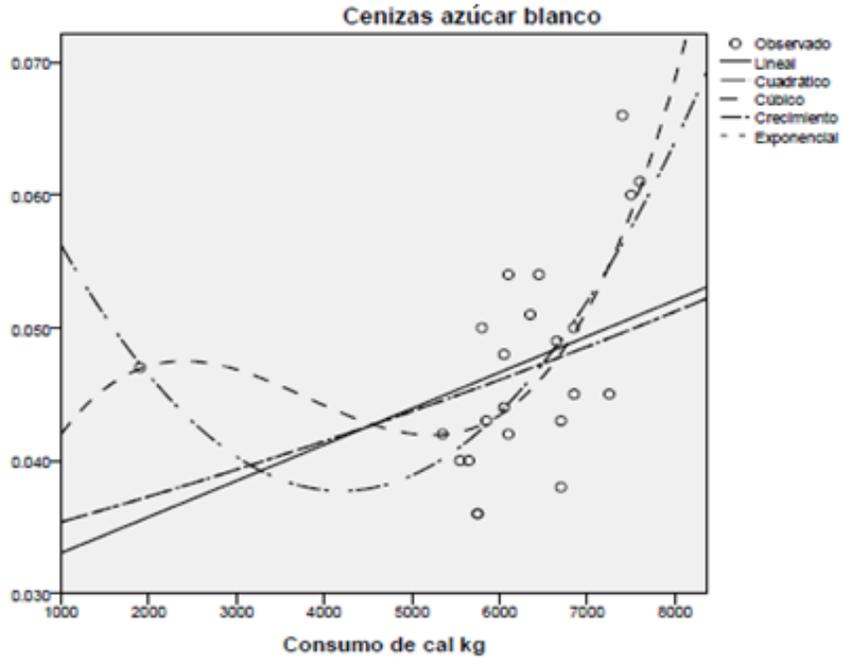
Variable dependiente: cenizas azúcar blanco

Ecuación	Estimaciones de los parámetros			
	Constante	b1	b2	b3
Lineal	.030	2.719E-6		
Cuadrático	.070	-1.523E-5	1.815E-9	
Cúbico	.028	1.872E-5	-5.686E-9	4.969E-13
Crecimiento	-3.395	5.285E-5		
Exponencial	.034	5.285E-5		

La variable independiente es consumo de cal kg.

Fuente: elaboración propia.

Figura 36. Cenizas azúcar blanco



Fuente: elaboración propia.

4.2.4. Variable independiente color jugo claro; dependiente color de azúcar

En la siguiente tabla se presentan los resultados del color de jugo clarificado.

Tabla XI. **Color azúcar y color jugo clarificado**

Resumen del procesamiento de las variables

	Variables	
	Dependiente	Independiente
	Color azúcar	Color jugo clarificado
Número de valores positivos	23	28
Número de ceros	0	0
Número de valores negativos	0	0
Número de valores perdidos	valores perdidos definidos por el usuario	
	3	0
	valores perdidos del sistema	
	0	0

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Resumen del modelo color azúcar**

Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: **color azúcar**

Ecuación	Resumen del modelo				
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.
Lineal	.014	.308	1	21	.585
Cuadrático	.050	.528	2	20	.598
Cúbico	.050	.528	2	20	.598
Crecimiento	.021	.457	1	21	.508
Exponencial	.021	.457	1	21	.508

La variable independiente es **color jugo clarificado**

Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

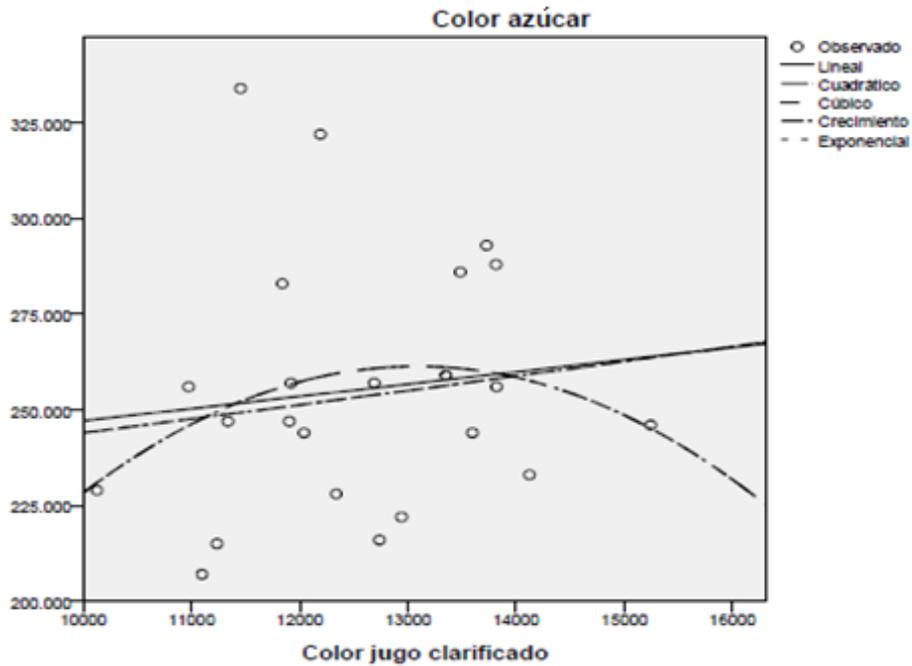
Variable dependiente: **color azúcar**

Ecuación	Estimaciones de los parámetros			
	Constante	b1	b2	b3
Lineal	215.155	.003		
Cuadrático	-334.378	.091	-3.480E-6	
Cúbico	-334.378	.091	-3.480E-6	.000
Crecimiento	5.350	1.472E-5		
Exponencial	210.601	1.472E-5		

La variable independiente es **color jugo clarificado**

Fuente: elaboración propia.

Figura 37. **Color azúcar y jugo clarificado**



Fuente: elaboración propia.

**4.2.5. Variable independiente color de meladura clarificada;
dependiente color del azúcar**

A continuación se presentan los resultados en forma tabular y gráfica, del análisis de las variables color de meladura y color del azúcar.

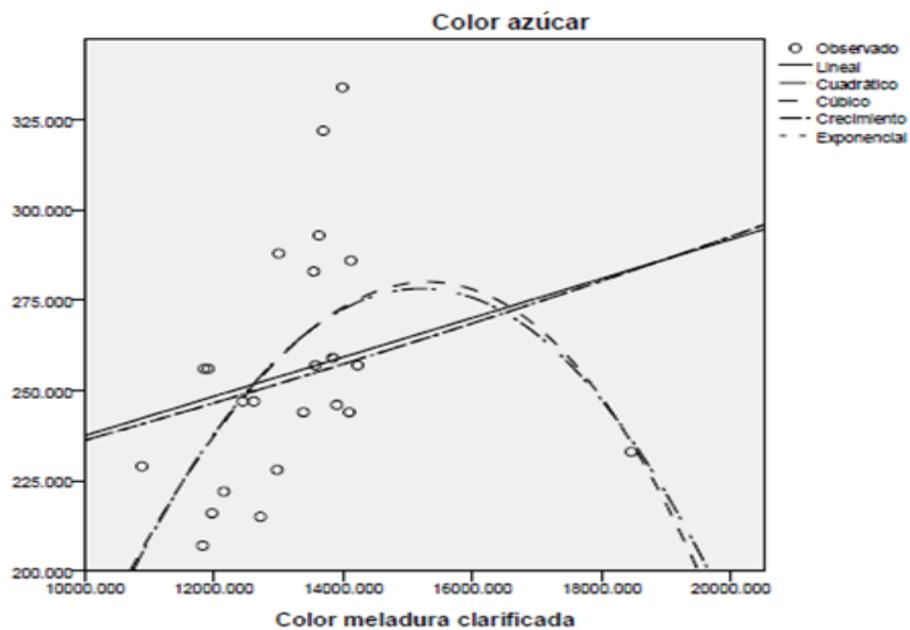
Tabla XIII. **Resultados sobre color azúcar y meladura clarificada**

Resumen del procesamiento de las variables

	Variables	
	Dependiente	Independiente
	Color azúcar	Color meladura clarificada
Número de valores positivos	23	26
Número de ceros	0	0
Número de valores negativos	0	0
Número de valores perdidos definidos por el usuario	3	0
valores perdidos del sistema	0	0

Fuente: elaboración propia.

Figura 38. **Color azúcar y meladura clarificada**



Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Durante los 26 días que duró la aplicación base de este caso de estudio, se pudo observar que el consumo de cal pasó de 0.88 kilogramos por tonelada de caña molida, a 0.71 kilos por TCM; lo que da una reducción de 0.17 kilos por tonelada de caña; eso equivale a una reducción del 19.31%.

A partir del treceavo día de iniciada la aplicación, se logró reducir la dosis de azufre totalmente; se inició con una dosis de 0.11 kilos por tonelada de caña, hasta eliminarlo totalmente.

También puede apreciarse que se logró una decoloración mayor en el jugo claro, que la que se obtiene en la sulfitación tradicional con azufre, ya que se pasó de un promedio de 18.4% durante los doce meses anteriores, a una decoloración porcentual en promedio del 21.38%; lo que representa un aumento en la efectividad de esta variable del 16.19 %; el mayor porcentaje de decoloración que se logró fue de un 44%, lo que representa un aumento de eficiencia del 139%.

La turbiedad mostró en el jugo una leve mejoría, comparando los promedios, antes y después de la sustitución; aunque en este punto no se buscó tanto una disminución en este rubro, sino principalmente en los colores, es importante anotar que el valor de la turbidez, siendo básicamente el mismo, al aplicar la sulfitación alternativa, funciona igual que la sulfitación con azufre elemental.

Se determinó una reducción del 11% en la turbiedad del azúcar final, un 22% en las cenizas residuales y un 60% en el residual de sulfitos.

Con este procedimiento se obtuvo un valor de azúcar directo promedio durante los días de observación de 225 unidades de color; valor idéntico al obtenido por el ingenio durante los 11 meses anteriores; el blanco que se obtuvo es directo, o sea del proceso al envasado y luego a la comercialización, sin pasar por ningún otro reproceso.

CONCLUSIONES

1. Al utilizar el donador de SO_2 alternativo, es posible efectuar una sulfitación efectiva, eliminando el uso de azufre elemental y el equipo relacionado, tanto en jugo como en meladura.
2. Al utilizar el donador de SO_2 alternativo, el pH del jugo no disminuye, lo que implica una reducción importante en consumo de cal, que conlleva una mejora técnica en el proceso de clarificación de jugo.
3. Se obtuvo una reducción en el color y turbidez tanto en jugo como en meladura, comprobándose un efecto significativo, más en la turbidez de la meladura que en la disminución de su color.
4. Existe una correlación directa moderada entre el color del azúcar final y el color del jugo clarificado,
5. Se determinó una correlación inversa entre la demanda de cal hidratada y el requerimiento de donador de azufre alternativo, utilizado para la sulfitación.
6. Existe una disminución proporcional entre el valor de sulfitos remanentes en el azúcar blanco, como consecuencia del uso del donador de SO_2 alternativo.
7. Existe una correlación directa entre la disminución del color de la meladura clarificada por el uso del donador de SO_2 alternativo y la reducción del color del azúcar final.

8. El impacto que tiene el uso de la sulfitación alternativa propuesta, en los residuales de cenizas y sulfitos es notable, lo que aporta una mejoría en la calidad del azúcar final, reflejándose en el cumplimiento de las normas internacionales de elementos remanentes.

RECOMENDACIONES

1. Es conveniente el diagnóstico inicial de laboratorio, para fijar la dosis del donador de SO₂ alternativo y establecer el pH de operación tanto en el jugo como en la meladura.
2. Se debe evaluar el impacto ambiental que el uso de azufre elemental tiene sobre el manejo del donador de SO₂ alternativo.
3. Es necesario realizar un estudio comparativo con el donador de SO₂, en el área de azúcar refinado.
4. Se propone iniciar un proceso de divulgación de este método a todo el mundo azucarero, por medio de revistas especializadas, foros, congresos y ferias internacionales, ya que el impacto financiero y ecológico es impresionante.
5. Es importante fortalecer la propiedad intelectual de esta aplicación.

BIBLIOGRAFÍA

1. BATULE, Eduardo. *La clarificación del jugo de la caña y la meladura*. El Salvador: Serie azucarera 15, 2004. 172 p.
2. CENICAÑA. *Proceso de obtención de azúcar*. [en línea]. <www.cenicana.org/pop_up/.../diagrama_obtencion.ph>. [Consulta: febrero de 2013].
3. GIL GONZÁLEZ, Ana Belén; VEGA CRUZ, Pastora Isabel. *Diseño y simulación de una torre de sulfitación*. España: Gredos, 2002. 37 p.
4. HUGOT-JENKINS. *Manual del azucarero*. [en línea]. <<http://avibert.blogspot.com/2010/03/handbook-of-cane-sugar-engineering-by->> [Consulta: febrero de 2013].
5. MOLANES LÓPEZ, Elisa María. *Regresión múltiple*. [en línea]. <<http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/emolanes/esp/archivos/EstII/Reg-multiple.pdf>> [Consulta: noviembre de 2012].
6. MORALES CUÉLLAR, Carlos Roberto. *Análisis del porcentaje de remoción de turbidez como un indicador de la eficiencia de los clarificadores de jugo tipo Dorr de ingenio San Diego*. Trabajo de graduación de Ing. Química, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Guatemala, 2005. 92 p.

7. PINEDA PÉREZ, Alfredo. *Métodos de control y cálculos técnicos utilizados en los ingenios azucareros y en las destilerías de alcohol*. [s.e.]. El Salvador: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 1988. 128 p.
8. PITA FERNÁNDEZ S; PÉRTEGA DÍAZ, S. *Relaciones entre variables cuantitativas*. [en línea]. <http://www.fisterra.com/mbe/investiga/var_cuantitativas/var_cuantitativas> [Consulta: febrero de 2013].
9. REVOLLAR, S. et al. *Diseño integrado de la planta de sulfitación en un ingenio azucarero*. [en línea]. <<http://eventos.saber.ula.ve/eventos/getFile.py/access?contribId=217&sessionId=66&resId=0&materialId=paper&confId=47>> [Consulta: enero de 2013].
10. SPENCER MADE, George; MEADE, P. *Manual del azúcar de caña*. 9a ed. Barcelona: Montaner y Simón, 1967. 940 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. **Datos experimentales donador de SO₂, color, turbiedad y remoción**

FECHA	COLOR CAÑA MOLIDA	COLOR CAL Kg	TURBIEDAD Kg.cal/Ton caña molida	REMOCIÓN AZUFRE Kg	Azúfre/Ton caña molida
Acumulado 01/01 al 03/08	1,432,214.793	1,265,470	0.88	155,310	0.11
04-Ago-10	8,232	6,100	0.74	1,050	0.13
05-Ago-10	9,356	7,400	0.79	1,150	0.12
06-Ago-10	9,203	7,600	0.83	1,100	0.12
07-Ago-10	9,363	7,250	0.77	1,050	0.11
08-Ago-10	8,286	5,550	0.67	850	0.10
09-Ago-10	9,640	6,700	0.70	750	0.08
10-Ago-10	9,182	6,450	0.70	500	0.05
11-Ago-10	9,100	6,700	0.74	400	0.04
12-Ago-10	5,650	5,650	1.00	150	0.03
13-Ago-10	8,851	5,800	0.66	50	0.01
14-Ago-10	9,260	6,850	0.74	-	-
15-Ago-10	8,872	5,750	0.65	150	0.02
16-Ago-10	5,073	1,900	0.37	300	0.06
17-Ago-10	5,376	6,450	1.20	100	0.02
18-Ago-10	9,539	5,700	0.60	150	0.02
19-Ago-10	9,875	6,850	0.69	150	0.02
20-Ago-10	9,730	6,650	0.68	-	-
21-Ago-10	9,717	7,500	0.77	300	0.03
22-Ago-10	9,721	6,050	0.62	100	0.01
23-Ago-10	9,956	6,850	0.69	-	-
24-Ago-10	9,019	6,100	0.68	350	0.04
25-Ago-10	9,283	6,350	0.68	-	-
26-Ago-10	9,338	6,050	0.65	-	-
27-Ago-10	9,612	5,750	0.60	-	-
28-Ago-10	8,092	5,350	0.66	-	-

Continuación del apéndice 1.

29-Ago-10	9,335	5,850	0.63	-	-
30-Ago-10	-	-	-	-	-
31-Ago-10	-	-	-	-	-
Promedio en la aplicación	8,794.654	6,200.000	0.712	481	0.02

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Datos experimentales donador de SO₂, jugo diluido y clarificado

	JUGO DILUIDO	JUGO CLARIFICADO	JUGO CLARIFICADO	DE COLOR
FECHA	UI	UI	UI	JUGO %
Promedio del 01-01 al 03-08	18,223	14,863	2,833	18.4
04-Ago-10	18,211	13,727	3,169	24.6
05-Ago-10	18,195	13,816	2,351	24.1
06-Ago-10	18,184	15,246	3,093	16.2
07-Ago-10	18,166	12,338	3,535	32.1
08-Ago-10	18,174	14,124	3,251	22.3
09-Ago-10	18,158	12,942	2,596	28.7
10-Ago-10	18,144	11,904	2,690	34.4
11-Ago-10	18,127	11,097	2,719	38.8
12-Ago-10	18,114	12,737	2,814	29.7
13-Ago-10	18,102	11,235	2,693	37.9
14-Ago-10	18,071	10,127	3,853	44.0
15-Ago-10	18,048	11,920	3,456	34.0
16-Ago-10	18,041	13,821	2,777	23.4
17-Ago-10	13,751	12,796	3,604	6.9
18-Ago-10	14,782	12,715	3,388	14.0
19-Ago-10	14,968	12,149	2,447	18.8
20-Ago-10	13,585	11,455	3,002	15.7

Continuación de apéndice 1.

21-Ago-10	15,178	12,191	2,877	19.7
22-Ago-10	16,034	13,351	2,849	16.7
23-Ago-10	15,744	13,484	2,810	14.4
24-Ago-10	16,928	12,690	1,698	25.0
25-Ago-10	14,079	11,336	1,991	19.5
26-Ago-10	14,305	10,972	2,067	23.3
27-Ago-10	15,828	13,596	3,154	14.1
28-Ago-10	16,355	12,041	2,346	26.4
29-Ago-10	15,059	11,839	2,214	21.4
30-Ago-10	-	-	-	-
31-Ago-10	-	-	-	-
Promedio durante la aplicación	16,628.115	12,524.962	2,824.769	24.0 %

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Datos experimentales donador de SO₂, todos los aspectos**

COLOR MELADURA	TURBIEDAD MELADURA	COLOR MELADURA	REMOCIÓN DE COLOR	TURBIEDAD MELADURA	COLOR AZÚCAR	TURBIEDAD AZÚCAR	CENIZAS AZÚCAR	SULFITOS AZÚCAR
SIN CLARIF. UI	SIN CLARIF. UI	CLARIF. UI	MELADURA	CLARIF. UI	UI	UI		
15,886	5,729	14,725	7.31	2,241	223	73	0.054	1.828
15,523	3,416	13,624	12.23	2,270	293	85	0.054	2.674
14,081	2,972	13,003	7.66	1,757	288	105	0.066	1.261
14,523	3,172	13,901	4.28	2,003	246	77	0.061	1.145
15,075	5,289	12,977	13.92	1,982	228	80	0.045	2.022
17,486	6,557	18,458	-5.56	2,277	233	79	0.040	0.435

Continuación de apéndice 3.

14,858	4,757	12,152	18.21	2,347	222	69	0.043	2.409
14,498	4,598	12,445	14.16	1,839	247	68	0.054	3.261
13,085	3,226	11,825	9.63	1,769	207	56	0.038	1.758
13,744	3,069	11,969	12.91	1,514	216	60	0.040	0.200
12,805	3,191	12,719	0.67	2,862	215	50	0.050	0.050
12,131	4,946	10,885	10.27	2,105	229	74	0.045	0.391
14,386	3,931	13,573	5.65	2,687	257	73	0.036	0.298
15,779	5,500	11,850	24.90	2,232	256	72	0.047	0.192
16,025	4,660	15,333	4.32	2,542	225	0	0	0
14,690	4,107	14,661	0.20	2,153	220	0	0	0
14,743	4,737	14,323	2.85	1,933	215	0	0	0
14,561	5,590	13,987	3.94	2,236	334	88	0.049	0.351
14,417	4,222	13,690	5.04	2,433	322	107	0.060	0.452
15,060	4,944	13,840	8.10	1,618	259	91	0.048	0.302
13,912	3,662	12,616	9.32	1,818	247	68	0.051	0.080
12,941	3,633	11,915	7.93	1,549	256	63	0.044	0.158
14,682	5,087	14,092	4.02	1,651	244	66	0.036	0.399
14,359	5,126	13,385	6.78	1,527	244	63	0.042	0.220

Continuación de apéndice 3.

13,620	3,027	13,542	0.57	1,335	283	61	0.043	0.462
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
14,431.692	4,316.192	13,427.346	6.970	1,988.731	225.731	65.154	0.042	0.726

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Datos experimentales donador de SO₂, pH, turbiedad, cenizas y sulfitos

FECHA	pH JUGO MIXTO	pH JUGO SULFITADO	DELTA PH	TURBIEDAD DEL AZÚCAR UI	CENIZAS AZÚCAR	SULFITOS AZÚCAR
03-Ago-10	5.4	4.8	0.6	73	0.054	1.828
04-Ago-10	5.45	4.88	0.57	85	0.054	2.674
05-Ago-10	5.37	4.95	0.42	105	0.066	1.261
06-Ago-10	5.4	5.07	0.33	77	0.061	1.145
07-Ago-10	5.44	5.18	0.26	80	0.045	2.022
08-Ago-10	5.49	5.14	0.35	79	0.040	0.435
09-Ago-10	5.46	5.27	0.19	69	0.043	2.409
10-Ago-10	5.5	5.54	-0.04	68	0.054	3.261
11-Ago-10	5.53	5.59	-0.06	56	0.038	1.758
12-Ago-10	5.57	5.64	-0.07	60	0.040	0.200
13-Ago-10	5.66	5.56	0.1	50	0.050	0.050
14-Ago-10	5.61	5.61	0	74	0.045	0.391
15-Ago-10	5.58	5.58	0	73	0.036	0.298
16-Ago-10	5.48	5.48	0	72	0.047	0.192
17-Ago-10	5.47	5.46	0.01	0	0	0
18-Ago-10	5.53	5.53	0	0	0	0
19-Ago-10	5.45	5.44	0.01	0	0	0
20-Ago-10	5.45	5.46	-0.01	88	0.049	0.351

Continuación del apéndice 4.

21-Ago-10	5.44	5.47	-0.03	107	0.060	0.452
22-Ago-10	5.5	5.5	0	91	0.048	0.302
23-Ago-10	5.61	5.61	0	80	0.050	0.201
24-Ago-10	5.58	5.58	0	59	0.042	0.162
25-Ago-10	5.48	5.48	0	68	0.051	0.080
26-Ago-10	5.47	5.46	0.01	63	0.044	0.158
27-Ago-10	5.53	5.52	0.01	66	0.036	0.399
28-Ago-10	5.45	5.47	-0.02	63	0.042	0.220
29-Ago-10	5.45	5.44	0.01	61	0.043	0.462
30-Ago-10						
31-Ago-10						
Promedio durante aplicación	5.45	5.40	0.05	65.154	0.042	0.726

Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Tabla de requisitos académicos

TABLA DE REQUISITOS ACADÉMICOS
Química 3
Química 4
Análisis cuantitativo
Físicoquímica 1
Termodinámica 3
Ingeniería química 2
Ingeniería química 3
Ingeniería química 4
Ingeniería química 5
Cinética de procesos químicos
Diseño de plantas
Ingeniería azucarera
Estadística aplicada 1
Estadística aplicada 2

Fuente: Escuela de Ingeniería Química.

Anexo 2. Especificaciones de calidad para el azúcar

- ESPECIFICACIONES DE CALIDAD PARA EL AZÚCAR...

ESPECIFICACIONES DE AZUCAR OBLIGATORIAS PARA COMERCIALIZAR											
MERCADO NACIONAL											
PARAMETRO	UNIDAD	LIMITE	REFINO		SUPERIOR/CRISTAL		BLANCO ESTANDAR		MORENA SV		METODOLOGIA
			SV	CV	SV	CV	SV	CV	TOLVA A TOLVA	PARA ALMACENAR	
COLOR	UI	MAX	45	60	61 - 200	61 - 200	201 - 300	201 - 350	600 - 1200	500 - 600	Oficial ICUMSA
HUMEDAD	%	MAX	0.04	0.04	0.06	0.06	0.08	0.08	0.12	0.12	Oficial ICUMSA
CENIZAS	%	MAX	0.035	0.035	0.080	0.08	0.095	0.095	0.150	0.150	Oficial ICUMSA
POLARIZACION	%	MIN	99.8	99.8	99.6	99.6	99.5	99.5	98.0	98.0	Oficial ICUMSA
VITAMINA A	ppm	RANGO	NA	15 ± 5	NA	15 ± 5	NA	15 ± 5	NA	NA	Oficial INCAP
SOLIDOS INSOLUBLES	ppm	MAX	15	75	150	150	200	200	NA	NA	Oficial ICUMSA
SULFITOS	ppm	MAX	10	10	10	10	10	10	10	10	Oficial ICUMSA
MICROBIOLOGIA											
MESOFILOS	UFC/10g	MAX	200	200	200	200	200	200	200	200	Oficial ICUMSA
MOHOS	UFC/10g	MAX	10	10	10	10	10	10	10	10	Oficial ICUMSA
LEVADURAS	UFC/10g	MAX	10	10	10	10	10	10	10	10	Oficial ICUMSA

SV: Destino para su fortificación en centros de empaque.

CV: Con Vitamina

NA: No Aplica

Importante:

(1) Estas especificaciones son las recomendadas para **COMERCIALIZACIÓN**

Es necesario que el ingenio defina metas internas de fabricación que les permita cumplir con las mismas, considerando los factores ambientales y de proceso que contribuyan a la degradación del azúcar con el tiempo.

(2) Estos parámetros se ajustan a necesidades actuales del mercado. Sin embargo, se deberán revisar y ajustar al momento de que el cliente o las situaciones contractuales con el mismo lo requieran.

Fuente www.atagua.org.gt. Consulta: febrero de 2013.