



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

**DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE DEGRADACIÓN DEL COLOR DEL AZÚCAR  
ALMACENADA EN LAS BODEGAS DEL INGENIO TRINIDAD Y SU RELACIÓN CON LA  
CANTIDAD DE COMPUESTOS FENÓLICOS PRESENTES**

**Byron Alesky Obregón Castañeda**

Asesorado por el Ing. Estuardo Edmundo Monroy Benitez

Guatemala, noviembre de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE DEGRADACIÓN DEL COLOR DEL AZÚCAR  
ALMACENADA EN LAS BODEGAS DEL INGENIO TRINIDAD Y SU RELACIÓN CON LA  
CANTIDAD DE COMPUESTOS FENÓLICOS PRESENTES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**BYRON ALESKY OBREGÓN CASTAÑEDA**

ASESORADO POR EL ING. ESTUARDO EDMUNDO MONROY BENITEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

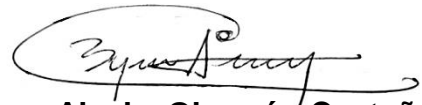
DECANO	Ing. Angel Roberto Sic García
EXAMINADORA	Inga. Lorena Victoria Pineda Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl de León de Paz
EXAMINADORA	Inga. Adela María Marroquín González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

**DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE DEGRADACIÓN DEL COLOR DEL AZÚCAR  
ALMACENADA EN LAS BODEGAS DEL INGENIO TRINIDAD Y SU RELACIÓN CON LA  
CANTIDAD DE COMPUESTOS FENÓLICOS PRESENTES**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 29 de octubre de 2013.



**Byron Alesky Obregón Castañeda**

Guatemala, 27 de febrero de 2015

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez  
Director Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
USAC  
Presente

Por este medio yo, Estuardo Edmundo Monroy Benítez, en calidad de asesor técnico, hago constar que apruebo el informe final de EPS de seis meses, titulado "DETERMINACION DE LA VELOCIDAD DE DEGRADACION DEL COLOR DEL AZÚCAR ALMACENADA EN LAS BODEGAS DEL INGENIO TRINIDAD Y SU RELACION CON LA CANTIDAD DE COMPUESTOS FENOLICOS PRESENTES" presentado por el estudiante Byron Alesky Obregón Castañeda , quien se identifica con carné no. 9713430.

Sin otro particular,



Estuardo Monroy Benítez  
Ingeniero Químico  
Colegiado No. 446

---

Estuardo Edmundo Monroy Benítez  
Colegiado: 446  
e-mail: ingmonroy1@yahoo.com  
Tel: 57748672



Guatemala, 04 de agosto de 2015.  
Ref.EPS.DOC.507.08.15.

Ing. Silvio José Rodríguez Serrano  
Director Unidad de EPS  
Facultad de Ingeniería  
Usac.

Ing. Rodríguez Serrano:

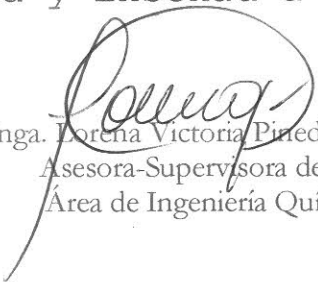
Por este medio atentamente le informo que como Asesora-Supervisora de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), del estudiante universitario **Byron Alesky Obregon Castañeda** de la Carrera de Ingeniería Química, con carné No. **9713430**, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **“DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE DEGRADACIÓN DEL COLOR DEL AZÚCAR ALMACENADA EN LAS BODEGAS DEL INGENIO TRINIDAD Y SU RELACIÓN CON LA CANTIDAD DE COMPUESTOS FENÓLICOS PRESENTES”**.

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

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

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



c.c. Archivo  
LVPC/ra



Guatemala, 04 de agosto de 2015.  
Ref.EPS.D.381.08.15.

Ing. Victor Manuel Monzón Valdéz  
Director Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
Presente

Estimado Ingeniero Monzón Valdéz.

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado **"DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE DEGRADACIÓN DEL COLOR DEL AZÚCAR ALMACENADA EN LAS BODEGAS DEL INGENIO TRINIDAD Y SU RELACIÓN CON LA CANTIDAD DE COMPUESTOS FENÓLICOS PRESENTES"** que fue desarrollado por el estudiante universitario Byron Alesky Obregon Castañeda, quien fue debidamente asesorado y supervisado por el Ingeniero **Inga. Lorena Victoria Pineda Cabrera.**

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

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,  
"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Silvio José Rodríguez Serrano  
Director Unidad de EPS

SJRS/ra





Guatemala, 05 de octubre de 2015.  
Ref. EIQ.TG-IF.068.2015.

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

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **009-2014** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

**INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN  
-Modalidad Ejercicio Profesional Supervisado-**

Solicitado por el estudiante universitario: **Byron Alesky Obregón Castañeda**.  
Identificado con número de carné: **97-13430**.  
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

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

**DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE DEGRADACIÓN DEL COLOR DEL  
AZÚCAR ALMACENADA EN LAS BODEGAS DEL INGENIO TRINIDAD Y SU  
RELACIÓN CON LA CANTIDAD DE COMPUESTOS FENÓLICOS PRESENTES**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Estuardo Edmundo Monroy Benítez**.

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"



Inga. Mercedes Esther Roquel Chacón  
COORDINADORA DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación

C.c.: archivo







Ref.EIQ.TG.160.2015

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Ejercicio Profesional Supervisado (**EPS final**) del estudiante **BYRON ALESKY OBREGÓN CASTAÑEDA** titulado: **“DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE DEGRADACIÓN DEL COLOR DEL AZÚCAR ALMACENADA EN LAS BODEGAS DEL INGENIO TRINIDAD Y SU RELACIÓN CON LA CANTIDAD DE COMPUESTOS FENÓLICOS PRESENTES”** Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

*“Id y Enseñad a Todos”*

  
Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, noviembre de 2015

Cc: Archivo  
VMMV/ale





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE DEGRADACIÓN DEL COLOR DEL AZÚCAR ALMACENADA EN LAS BODEGAS DEL INGENIO TRINIDAD Y SU RELACIÓN CON LA CANTIDAD DE COMPUESTOS FENÓLICOS PRESENTES**, presentado por el estudiante universitario: **Byron Alesky Obregón Castañeda**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano



Guatemala, noviembre de 2015

/cc

## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Porque ha hecho que cada fracaso, sea un paso hacia el éxito y cada golpe un paso hacia la felicidad.
- Mis padres** Neftalí Obregón de León y Julieta Castañeda Barrios, que han dado todo lo que hay en sus manos porque yo alcance mis metas y logre mis triunfos que también son de ellos.
- Mi esposa** Claudia Lucía Roca Berreondo, el amor de mi vida, que siempre ha sido mi constante inspiración, y el mayor motivo que tengo para luchar ante todas las adversidades.
- Mis hijos** Carmen Lucía y Martín Alejandro Obregón Roca, que son mi fuente inagotable de alegría y energías para enfrentar la vida con decisión.
- Mis hermanos** Jeffrey y Jennifer Obregón Castañeda, que hacen que el camino de mi vida sea más fácil de transitar.
- Mis abuelos** Porque sus vidas de esfuerzo y humildad han sido más que un ejemplo de vida.

**Mis tíos y primos**

Porque todas y cada una de sus vidas han marcado positivamente la mía.

**Mis suegros y cuñados**

Porque nunca faltan sus palabras de ánimo y cariño en los momentos justos.

**Mis sobrinos**

Que su sola existencia es un motivo más para esforzarse al máximo cada día.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

### **Mi patria Guatemala**

Porque a pesar de las dificultades que he afrontado en este bello país, ha forjado en mí un ciudadano con deseos de salir adelante, sin dejar a nadie atrás.

### **Universidad de San Carlos de Guatemala y Facultad de Ingeniería**

Por enseñarme más que solo ingeniería, porque allí aprendí que las cosas más importantes de la vida no se encuentra en los libros.

### **Mis amigos de la vida**

Por estar allí en todo momento, a mi lado, física y moralmente.

### **Mis amigos de la Universidad**

Porque con sus consejos y compañía me han demostrado que el que camina solo avanza más despacio.

### **Mis compañeros de trabajo**

Por mostrarme siempre su más sincero interés y brindarme su apoyo incondicional en este tiempo de convivencia laboral.

### **Mis compañeras de EPS**

Alejandra Peláez, Lourdes Castillo y Nancy de Castro, que con su empuje, colaboración y entusiasmo me impulsaron a concluir con esta fase de estudios.

**Ingeniero Estuardo  
Monroy**

Por su apoyo incondicional, asesoría certera y palabras de ánimo en todo este proceso educativo.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	III
LISTA DE SÍMBOLOS .....	V
GLOSARIO .....	VII
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN.....	XV
1. ANTECEDENTES .....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Caña de azúcar .....	3
2.2. Carbohidratos .....	6
2.3. Sacarosa .....	8
2.4. Compuestos fenólicos o fenoles.....	10
2.5. Colorantes de la caña de azúcar en el procesamiento del azúcar.....	11
2.6. Espectrofotometría .....	23
2.7. Almacenaje de azúcar .....	25
2.8. Formación de color en el azúcar .....	27
3. DISEÑO METODOLÓGICO.....	29
3.1. Variables.....	29
3.2. Delimitación del campo de estudio .....	29
3.3. Recursos humanos.....	30
3.4. Recursos materiales .....	30

3.5.	Técnica cuantitativa y cualitativa .....	31
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información .....	31
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de información ....	32
3.8.	Análisis estadístico.....	35
3.8.1.	Media aritmética .....	35
3.8.2.	Desviación estándar .....	35
3.8.3.	Comparación de dos medias mediante <i>t</i> de Student.....	36
4.	RESULTADOS.....	39
4.1.	Velocidad de degradación del color del azúcar en relación a la cantidad de compuestos fenólicos.....	39
4.2.	Color de producción del azúcar en relación a la cantidad de compuestos fenólicos.....	41
4.3.	Velocidad de degradación en relación al color inicial de producción.....	43
4.4.	Velocidad de degradación según lugar de almacenaje y época del año.....	45
4.5.	Análisis estadístico.....	46
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	47
6.	LOGROS OBTENIDOS.....	51
	CONCLUSIONES.....	53
	RECOMENDACIONES .....	55
	BIBLIOGRAFÍA.....	57
	APÉNDICES.....	59



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Fórmula molecular de la sacarosa .....	8
2.	Descomposición térmica de las antocianinas presentes en la caña de azúcar .....	14
3.	Fenoles típicos .....	15
4.	Reacciones básicas del empardamiento enzimático.....	15
5.	Reacción básica de caramelización en los azúcares .....	16
6.	Reacciones típicas de Maillard.....	17
7.	Degradación de <i>strecker</i> y formación de compuestos dicarbonílicos a partir de azúcares.....	18
8.	Recolección y ordenamiento de la información .....	32
9.	Gráfico de velocidad de degradación <i>versus</i> concentración de compuestos fenólicos.....	41
10.	Gráfico de color de producción <i>versus</i> concentración de compuestos fenólicos.....	43
11.	Gráfico de velocidad de degradación <i>versus</i> color de producción .....	45

### TABLAS

I.	Composición general de los tallos de la caña de azúcar y de los jugos.....	4
II.	Compuestos fenólicos de mayor relevancia en el azúcar .....	13

III.	Distribución de material colorante presente en la caña de azúcar, de alto y bajo peso molecular .....	20
IV.	Promedio de lectura de color (ICUMSA a 420 nm) .....	21
V.	Efectos de los cogollos y hojas en el color y fenoles en jugos de caña. (Estudio realizado para la variedad de caña MZC74-275, Colombia).....	21
VI.	Relación entre el valor indicador (VI) y el tipo de colorante en los azúcares de caña de azúcar.....	22
VII.	Transferencia de impurezas .....	23
VIII.	Variables del proceso .....	29
IX.	Datos para la elaboración de la curva de calibración.....	33
X.	Datos para la verificación de la curva de calibración .....	33
XI.	Datos para toma de valores de absorbancia y determinación de concentración de fenoles .....	34
XII.	Datos para la determinación de concentración de fenoles y color.....	34
XIII.	Valores críticos de la distribución $t$ .....	38
XIV.	Relación entre compuestos fenólicos y velocidad de degradación del azúcar .....	39
XV.	Relación entre compuestos fenólicos y color de producción .....	42
XVI.	Relación entre velocidad de degradación y color de producción .....	44
XVII.	Velocidad de degradación según ambiente y época del año .....	45
XVIII.	Contraste de significación ( $t$ de Student) entre épocas y ambiente de almacenaje .....	46
XIX.	Coefficientes de correlación entre las variables estudiadas .....	46

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>A</b>	Absorbancia
<b>Cp</b>	Canal Point
<b>P</b>	Fósforo
<b>Brix</b>	Grados Brix (°Brix)
<b>Ha</b>	Hipótesis alternativa
<b>Ho</b>	Hipótesis nula
<b>PO<sub>4</sub></b>	Ion fosfato
<b>HPO<sub>4</sub><sup>-2</sup></b>	Ion fosfato secundario
<b>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub></b>	Ion ortofosfato primario
<b>Ppm</b>	Partes por millón (mg/L)
<b>T</b>	Transmitancia



## GLOSARIO

<b>Absorbancia</b>	Cantidad de intensidad de luz que absorbe una solución.
<b>Ácido fosfórico</b>	Ácido inorgánico, relativamente débil utilizado para la clarificación de jugo de caña en la producción de azúcar.
<b>Azúcar reductor</b>	Azúcar que posee un grupo carbonilo, capaz de reaccionar reduciendo otra sustancia.
<b>°Brix</b>	Medida de los sólidos disueltos en azúcar, jugo, licor o jarabe utilizando un refractómetro.
<b>Clarificación</b>	Separación por sedimentación de los sólidos suspendidos en soluciones de azúcar turbias.
<b>Cogollo</b>	American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para Ensayos y Materiales).
<b>Encalamiento</b>	Adición de la lechada de cal en la clarificación de jugo de caña.
<b>Estrato altitudinal</b>	Nivel dependiente de la altitud, distancia vertical al nivel cero, para el que se suele tomar el nivel medio del mar.

<b>Floculante</b>	Polielectrólito en solución añadido al jugo para promover la clarificación.
<b>Floculación</b>	Formación de floculo en la clarificación.
<b>Floculo</b>	Grumo de materia orgánica formado por agregación de sólidos en suspensión.
<b>Fosfato</b>	Ion poliatómico de fórmula empírica $\text{PO}_4^{-3}$ .
<b>Fosforilación</b>	Transporte de energía.
<b>Fotosíntesis</b>	Conversión de materia inorgánica en orgánica mediante la luz.
<b>Longitud de onda</b>	Distancia que hay entre dos crestas (los puntos más altos) consecutivas en una onda.
<b>Luz monocromática</b>	Luz compuesta por componentes de un mismo color.
<b>5S</b>	Proyecciones de las células epidérmicas de la raíz que juegan un papel crítico en la toma de agua y nutrientes.
<b>Pol</b>	Contenido de sacarosa aparente expresado como porcentaje de masa, medido a partir de la rotación óptica de luz polarizada al pasar por una solución azucarada.

<b>Micorrizas</b>	Son asociaciones entre ciertos hongos beneficiosos del suelo y la inmensa mayoría de las plantas.
<b>Nudos</b>	Zonas del tallo desde donde nacen las hojas.
<b>Sacarosa</b>	El compuesto químico puro $C_{12}H_{22}O_{11}$ que es conocido como azúcar blanco. Generalmente es medido mediante polarización en caso de soluciones puras y con GC o HPLC en caso de soluciones de baja pureza. El nombre químico es P-n-Fructofuranosila-D-glucopiranosido.
<b>Talpetate</b>	Terreno sólido, compacto y arcilloso, estratificado en capas como petates.
<b>Validación del método</b>	Confirmación mediante el examen y la obtención de evidencias objetivas que aseguran el cumplimiento de una serie de requerimientos particularmente definidos para aplicaciones concretas.
<b>Zafra</b>	Temporada en la que se recolecta la caña de azúcar y se produce azúcar.





## RESUMEN

La determinación de la velocidad de degradación del color del azúcar almacenado en la bodega del Ingenio Trinidad, y su relación con la cantidad de compuesto fenólicos presentes en el azúcar analizado, es el objetivo principal de la presente investigación. Veinte muestras de azúcar blanca estándar serán analizadas bajo condiciones controladas de laboratorio en un rango de temperatura ambiente de 20 °C – 25 °C y una humedad relativa no mayor a 70 % y monitoreadas durante un periodo de seis meses.

Se analizarán mediante el método de determinación de color en solución de azúcares crudos, azúcares morenos y jarabes coloreados a pH 7.0 (GS1/3-7 2011) de ICUMSA (International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis). Será cada 15 días para determinar la degradación que sufre a través del tiempo.

En condiciones ambientales normales de almacenaje y a su vez, almacenada bajo condiciones controladas de humedad y temperatura. Así también comparando dicha velocidad de degradación de color con la cantidad de compuestos fenólicos totales presentes en las muestras en observación al inicio del estudio, mediante el método analítico de Folin-Ciocalteu. Este se basa en la oxidación de los compuestos del reactivo Folin-Ciocalteu en reacción con los compuestos fenólicos disueltos en la solución estudiada.

Se determina su absorbancia por espectrofotometría, así como la cuantificación de compuestos basada en una curva de calibración del método realizada anteriormente con ácido caféico grado reactivo. Cada una de las

muestras analizadas presentará una diferente velocidad de degradación de color, así como diversas concentraciones de compuestos fenólicos y se determinaría si existe relación entre dichas variables utilizando métodos estadísticos adecuados.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Determinar la velocidad de degradación del color del azúcar almacenado en las bodegas del Ingenio Trinidad y su relación con la cantidad de compuestos fenólicos presentes.

### **Específicos**

1. Determinar la cantidad de compuestos fenólicos en algunas muestras de azúcar producida durante la zafra 2013 – 2014.
2. Determinar el color inicial en el azúcar y su incremento cada 15 días en condiciones controladas y en condiciones normales de almacenaje.
3. Realizar el análisis estadístico comparativo entre el color inicial de una muestra de azúcar y la cantidad de fenoles presentes en la misma.
4. Realizar un análisis estadístico para determinar la relación entre el color inicial de la muestra y la presencia de compuestos fenólicos en la misma.

## Hipótesis

### Hipótesis Científica

Existe relación entre la cantidad de compuestos fenólicos y la velocidad de degradación del color del azúcar en condiciones ambientales normales y controladas de almacenaje.

### Hipótesis Estadística

- Hipótesis Nula (H0)  
Existe relación directa entre la cantidad de compuestos fenólicos y la velocidad de degradación del color del azúcar, en condiciones ambientales normales y en condiciones ambientales controladas de almacenaje.
- Hipótesis Alternativa (H1)  
No existe relación directa entre la cantidad de compuestos fenólicos y la velocidad de degradación del color del azúcar en condiciones ambientales normales y en condiciones ambientales controladas de almacenaje.

## INTRODUCCIÓN

El cultivo de la caña de azúcar es uno de los más antiguos en Guatemala, el cual data del 1536, y cuyas principales áreas de producción eran Amatitlán, Escuintla, Guazacapán y Alta Verapaz. En aquella época el cultivo de la caña de azúcar ayudó a introducir el uso de la tecnología para su procesamiento, así también mejoramiento de la infraestructura de comunicación y transporte necesaria. Esto para sacar el producto a los centros de distribución y consumo, ayudando así al avance de los primeros años de la conquista de Guatemala.

Actualmente, la agroindustria azucarera es una de las principales generadoras de divisas del país. Con 13 ingenios operando, el sector azucarero contribuye en el desarrollo de casi 50 municipios y más de un millón de personas, siendo así una parte importante en el progreso del país.

Con un incremento en la producción de más del 5 % en la última zafra se ubica como el cuarto productor a nivel latinoamericano, y con un incremento en la exportación de un 10 % en la última temporada, para ser el segundo exportador de América Latina y quinto a nivel mundial.

Todo esto hace que los requerimientos de calidad tanto nacionales como internacionales sean cada día más exigentes, por ejemplo: polarización, humedad, cenizas, color, entre otros, son los parámetros de calidad medidos y exigidos por los clientes. Debido a la dinámica de la industria en la cual se producen solo 6 meses del año, los productores se ven en la necesidad de almacenar el azúcar para consumo interno en bodegas a espera de requerimiento de la comercializadora.

El azúcar almacenado sufre cambios en algunas de sus características (incremento de humedad y color) debido a muchos factores, los cuales pueden ser, la calidad de la caña, variaciones en el proceso de producción y condiciones ambientales del lugar de almacenamiento.

## 1. ANTECEDENTES

Debido a que en Guatemala están muy marcadas la época lluviosa con la época seca, la agroindustria azucarera debe reducir su periodo de fabricación a los 6 meses en los cuales no existe precipitación fluvial, esto hace que el almacenaje de azúcar en la época de invierno se convierta en un proceso de logística complejo, ya que es necesario evitar que por diferentes motivos el color del azúcar alcance niveles de rechazo por parte de la empresa comercializadora para azúcar blanco local.

Existen muchos factores que hacen que el azúcar incremente su color a través del tiempo a determinadas condiciones de almacenaje.

En la investigación de Nguyen & Doherty (2011, Australia) *Phenolics in sugar cane juice: potential degradation by hydrogen peroxide and Fenton's reagent* determina que los compuestos fenólicos son responsables de gran parte de la coloración del azúcar. Todo esto realizando reacciones que destruyen dichos compuestos y determinando por inspección visual del color del jugo de caña, luego de la reacción, es mucho más claro. Siendo algunos de los compuestos fenólicos principales en el jugo de caña, los ácidos p-cumárico, Vanílico, 2,3-dihidroxibenzoico, gálico y 3,4-dihidroxibenzoico.

En el estudio de Payet, Cheong y Smadja (2006, Francia) *Comparison of the concentrations of phenolic constituents in cane sugar manufacturing products with their antioxidant activities*, es utiliza el método analítico de Folin-Ciocalteu. Esto como una de las alternativas para determinar la cantidad total de fenoles en 7 productos azucarados tales como, jugos claros, jarabes, masas,

mieles A, B y C y azúcar. Determinando que entre estos materiales, el azúcar presenta los contenidos más bajos de compuestos fenólicos.

El estudio de Zossi, Cárdenas, Sorol y Sastre (2010, Argentina) *La influencia de compuestos azúcares y no azúcares en la calidad industrial de caña de azúcar en Tucumán (R. Argentina)*, determina la concentración de compuestos azúcares y no azúcares en jugo de caña. Estos últimos son los que influyen en la formación del color y otros que inciden en el proceso industrial de producción de azúcar blanco directo. La determinación de los compuestos fenólicos se realizó de acuerdo a la metodología propuesta por Clarke et al. (método de Folin-Ciocalteu).

La investigación de Barrientos (2005, Guatemala) *Incidencia de las variables climatológicas (humedad y temperatura) en el deterioro del color del azúcar guatemalteco* concluye que la degradación del color del azúcar tiene una relación directa con el porcentaje de humedad. Así como con la temperatura del lugar de almacenaje, aunque en este estudio no se determina si existe algún compuesto que incremente la velocidad de degradación de la misma.



## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Caña de azúcar

Es una planta herbácea de gran tamaño que se cultiva en países tropicales y subtropicales. Es un híbrido complejo de varias especies, derivadas principalmente del *Saccharum officinarum* y otras especies de *Saccharum*. La caña se propaga vegetativamente sembrando trozos de sus tallos. La nueva planta o retoño crece a partir de los cogollos o yemas de los nudos del tallo, asegurando así una descendencia uniforme. En el proceso de reproducción de la caña se desarrollan y ensayan continuamente nuevas variedades en búsqueda de nuevas y mejores plantas. Dicho procedimiento es un factor fundamental para el mejoramiento en la productividad en la industria de la caña de azúcar.

La producción de caña varía significativamente de un área a otra, dependiendo de la variedad, utilizando factores climáticos, disponibilidad del agua, prácticas de cultivo y duración del periodo de crecimiento. La duración del cultivo varía entre ocho meses en Luisiana, Estados Unidos y cerca de dos años en Hawái. La caña producida puede estar en 50 t/ha bajo condiciones desfavorables y cifras próximas a 200 t/ha bajo condiciones excepcionales con largos periodos de crecimiento. La producción del azúcar varía de 5 a 25 t/ha.

Generalmente no se requiere volver a sembrar caña luego de cada cosecha, sino que se deja crecer de nuevo para producir la siguiente denominada rebrote. La producción de caña se reduce después de varias socas

llegando a un punto en que se debe arar y sembrar caña nuevamente esto es renovación. Generalmente la caña se cosecha durante invierno y la duración de la temporada de molienda o zafra es determinada por condiciones meteorológicas, principalmente la lluvia. En algunos países como Colombia, Perú y Hawái la caña puede ser procesada prácticamente durante todo el año.

El principal objetivo al procesar la caña es recobrar el azúcar. Que en su estado pura se conoce con el nombre químico de sacarosa.

- Principales constituyentes químicos de la caña de azúcar

La composición general de los tallos de la caña de azúcar y de los jugos se describe a continuación:

Tabla I. **Composición general de los tallos de la caña de azúcar y de los jugos**

<b>Constituyente químico en los tallos</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Agua	70-73
Sólidos	27-30
Sólidos solubles (brix)	15-17
Fibra (seca)	12-15
<b>Constituyente químico en los jugos</b>	<b>Porcentaje (% base brix)</b>
Azúcares	
Sacarosa	70-90
Glucosa	2-4
Fructosa	2-4
Sales	27-30
Inorgánicas	15-17
Orgánicas	12-15
Ácidos Orgánicos	1-3
Aminoácidos	1,5-5,5
Otros no azúcares	1,5-2,5

Fuente: LARRAHONDO, Jesús Eliécer. *Composición y características químicas de la caña de Azúcar*. p. 24.

En promedio los porcentajes de agua (expresados como humedad porcentaje de caña) oscilan entre 70 % y 73 %, encontrándose en algunas ocasiones valores inferiores al 70 % debido a prácticas de agotamiento y estrés hídrico, o ambos (deficiencia de agua o riegos).

Por tanto, los porcentajes de materia seca (sólidos solubles e insolubles) pueden encontrarse entre 27 % y 30 %, de los cuales cerca de 15 % a 17 % corresponden a los denominados sólidos solubles (brix % caña). Además las variedades de caña de azúcar pueden exhibir niveles de fibra (fibra % caña) de 12 % a 15 %, bajo condiciones de un procesamiento de caña limpia, o sea, excepta de impurezas o materia extraña de carácter mineral (tierras, arenas, y otras). Así, la materia extraña constituida por cogollos y otro material extraño como hojas y tierra, afecta los niveles brix (sólidos totales solubles), pureza y fibra.

El incremento de materia extraña conduce a caídas en la pureza e incrementos en el porcentaje de fibra de caña, de la caña cosechada.

Los principales constituyentes químicos de los jugos de la caña de azúcar son los azúcares (sacarosa, glucosa, fructosa), sales orgánicas e inorgánicas, ácidos orgánicos, aminoácidos y otros no azúcares, como material colorante (polifenoles, clorofila, y otros). Los niveles de sacarosa en los jugos, expresados como pureza (en porcentaje base brix), oscilan en la caña madura entre 70 % a 90 % de los sólidos totales solubles (brix en porcentaje jugo). Los azúcares reductores (glucosa y fructosa) se encuentran en los jugos entre 2 % y 4 % (en porcentaje, base brix). Otros no azúcares, como sales y ácidos orgánicos alcanzan porcentajes (base brix) entre el 1 % y 6 %.

Los sólidos solubles comprenden la sacarosa y las no-sacarosas. La razón porcentual entre la sacarosa y el brix de la caña o jugo se conoce como pureza de la caña o del jugo, respectivamente. El contenido aparente de sacarosa, expresado como un porcentaje en peso y determinado mediante un método polarimétrico, se denomina pol. Los sólidos solubles diferentes de la sacarosa, incluyen los azúcares reductores (AR) como la glucosa, la fructosa y otros compuestos orgánicos e inorgánicos solubles en el agua. Estos usualmente se denominan no-Pol o no-sacarosas, los cuales porcentualmente resultan de la diferencia entre el brix y el pol.

## **2.2. Carbohidratos**

Los carbohidratos, hidratos de carbono o sacáridos son moléculas orgánicas compuestas por carbono, hidrógeno y oxígeno. Son solubles en agua y se clasifican de acuerdo a la cantidad de carbonos o por el grupo funcional que tienen adherido. Son la forma biológica primaria de almacenamiento y consumo de energía. Otras biomoléculas son las grasas y, en menor medida, las proteínas.

Las plantas sintetizan los glúcidos o carbohidratos gracias a la intervención del pigmento llamado clorofila que produce monosacáridos a partir de la energía solar y de su capacidad de captación osmótica de sus propios nutrientes. Por esta razón, los vegetales reciben el nombre de autótrofos puesto que son capaces de transformar materiales inorgánicos en recursos orgánicos.

Los disacáridos son glúcidos formados por dos moléculas de monosacáridos y, por tanto, al hidrolizarse producen dos monosacáridos libres. Los dos monosacáridos se unen mediante un enlace covalente conocido como enlace glucosídico, tras una reacción de deshidratación que implica la pérdida

de un átomo de hidrógeno de un monosacárido y un grupo hidroxilo del otro monosacárido. Esto con la consecuente formación de una molécula de  $H_2O$ , de manera que la fórmula de los disacáridos no modificados es  $C_{12}H_{22}O_{11}$

Los glúcidos más simples, los monosacáridos, están formados por una sola molécula; no pueden ser hidrolizados a glúcidos más pequeños. La fórmula química general de un monosacárido no modificado es  $(CH_2O)_n$ , donde  $n$  es cualquier número igual o mayor a tres. Los monosacáridos poseen siempre un grupo carbonilo en uno de sus átomos de carbono y grupos hidroxilo en el resto, por lo que pueden considerarse polialcoholes.

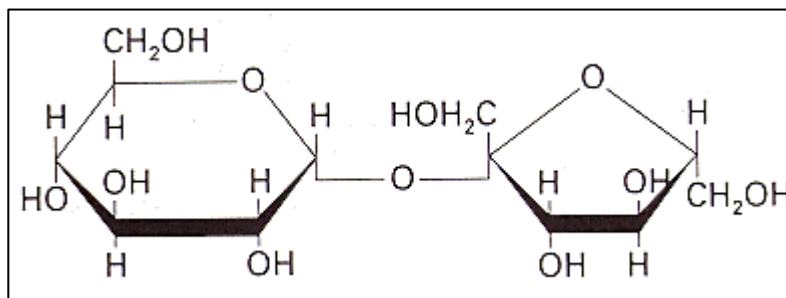
Los carbohidratos complejos están hechos de moléculas de azúcar que se extienden juntas en complejas cadenas largas. Dichos carbohidratos se encuentran en alimentos tales como guisantes, fríjoles, granos enteros y hortalizas. Tanto los carbohidratos complejos como los carbohidratos simples se convierten en glucosa en el cuerpo y son usados como energía. La glucosa es usada en las células del cuerpo y del cerebro y la que no se utiliza se almacena en el hígado y los músculos como glucógeno para su uso posterior.

Los oligosacáridos están compuestos por entre tres y nueve moléculas de monosacáridos que al hidrolizarse se liberan. No obstante, la definición de cuán largo debe ser un glúcido para ser considerado oligo o polisacárido, varía según los autores. Según el número de monosacáridos de la cadena se tienen los trisacáridos (como la rafinosa), tetrasacárido (estaquiosa), pentasacáridos, entre otros.

### 2.3. Sacarosa

Conocido como el azúcar de mesa es un disacárido de glucosa y fructosa. Se sintetiza en plantas, pero no en animales superiores. No contiene ningún átomo de carbono anomérico libre, puesto que los carbonos anoméricos de sus dos unidades monosacáridos constituyentes se hallan unidos entre sí covalentemente mediante un enlace O-glucosídico. Por esta razón, la sacarosa no es un azúcar reductor y tampoco posee un extremo reductor.

Figura 1. **Fórmula molecular de la sacarosa**



Fuente: *Fórmula molecular de la sacarosa*. Meade y Chen, 1977. p. 352.

La sacarosa es un producto intermedio principal de la fotosíntesis, en muchas plantas constituye la forma principal de transporte de azúcar desde las hojas a otras partes de la planta. En las semillas germinadas de plantas, las grasas y proteínas almacenadas se convierten en sacarosa para su transporte a partir de la planta en desarrollo.

Los disacáridos no pueden entrar directamente en la ruta glucolítica, desde luego no pueden entrar en las células sin haber sido previamente hidrolizados a monosacáridos extracelularmente. En los vertebrados, los disacáridos ingeridos se han de hidrolizar, primero, por enzimas unidos a la

superficie externa de las células epiteliales que cubren el intestino delgado para dar sus unidades monosacáridas.

Los monosacáridos así formados se transportan al interior de las células que tapizan el intestino, desde las que pasan a la sangre siendo transportados a hígado. Allí son fosforilados y canalizados hacia la secuencia glucolítica.

La mayor parte de las triosas fosfato generadas por fijación del  $\text{CO}_2$  en las plantas se convierte en sacarosa o almidón. La sacarosa puede haber sido seleccionada durante la evolución como forma de transporte del carbono debido a que su unión poco usual. Esto une el C-1 anomérico de la glucosa al C-2 anomérico de la fructosa, no es hidrolizada por amilasas u otras enzimas que escinden glúcidos comunes.

La sacarosa se sintetiza en el citosol, empezando con la dihidroxiacetona fosfato y gliceraldehído - 3 - fosfato exportadas del cloroplasto. Después de la condensación a fructosa-1,6-bisfosfato (por la aldolasa), la hidrólisis por la fructosa-1,6-bisfosfatasa forma fructosa-6-fosfato. La sacarosa-6-fosfatasa cataliza la reacción de la fructosa-6-fosfato con UDP-glucosa (glucosa activada) para formar sacarosa-6-fosfato. Finalmente, la sacarosa-6-fosfatasa elimina el grupo fosfato haciendo que esté disponible para su exportación desde la célula a otros tejidos.

La comunicación y coordinación entre síntesis de sacarosa en el citosol y fijación de carbono y síntesis de almidón en el cloroplasto están mediadas por el sistema de cotransporte antiparalelo Pi-triosas fosfato. Si la síntesis de sacarosa es demasiado rápida, el transporte del exceso de Pi al cloroplasto dará lugar a la eliminación de demasiada triosa fosfato. Esto tiene un efecto deletéreo sobre la velocidad de fijación de carbono porque se sintetizan cinco

de cada seis moléculas de triosa fosfato, producidas en el ciclo de Calvin para regenerar la ribulosa-1,5-bisfosfato y completar el ciclo. Si la síntesis de sacarosa es demasiado lenta, habrá una insuficiencia de Pi en el cloroplasto para la síntesis de triosa fosfato.

La síntesis de sacarosa está regulada principalmente en tres pasos, los catalizados por la fructosa-1,6-bisfosfatasa, sacarosa-6-fosfato sintasa y sacarosa fosfato fosfatasa. Cuando la luz incide por primera vez sobre la hoja por la mañana, aumentan los niveles de triosa fosfato en el citosol (provenientes de la fijación de carbono en el cloroplasto). Las triosas fosfato inhiben la actividad de la fosfofructoquinasa-2 disminuyendo los niveles de fructosa-2,6-bisfosfato.

Esto libera la inhibición de la fructosa-1,6-bisfosfatasa, permitiendo la síntesis de fructosa-6-fosfato y así de otras hexosas fosfato, incluida la glucosa-6-fosfato. La glucosa-6-fosfato es un activador alostérico de la sacarosa-6-fosfato sintasa. La sacarosa fosfato fosfatasa cataliza el paso final en la síntesis de sacarosa a medida que dispone de sustrato.

#### **2.4. Compuestos fenólicos o fenoles**

Los fenoles son derivados hidroxilados de carburos aromáticos. Es una amplia familia que posee más de 4 500 miembros. Dentro del grupo de los fenoles están los ácidos fenólicos y la amplia familia de los flavonoides, entre otros. Los compuestos más simples son unidades individuales de fenol que se encuentran de forma abundante en las hierbas culinarias; todos ellos tienen una larga historia de utilización como conservantes de los alimentos.



Las coloraciones azul, azulgrana y violeta que se observan en las bayas, uvas y berenjena púrpura se deben a su contenido fenólico. Los arándanos, por ejemplo, tienen una concentración elevada de antocianidinas fenólicas y son de color rojo. Una de las características principales de los fenoles es la protección a las plantas del daño por oxidación.

## **2.5. Colorantes de la caña de azúcar en el procesamiento del azúcar**

Los colorantes en productos de la caña de azúcar, como el azúcar comercial (azúcar crudo, azúcar blanco), incluyen pigmentos vegetales o colorantes de origen vegetal, y un gran número de sustancias producidas u originadas durante el proceso azucarero. El color es un parámetro importante que define la calidad de los azúcares (crudo, blanco). En condiciones normales de procesamiento, el color del azúcar crudo está determinado por el color o contenido de colorantes que entran con la caña.

El color de azúcar crudo es cerca del 6 % del color de la meladura y en refinería se ha establecido que el color del azúcar depende del color de los licores de refinería. Existen dos fuentes u orígenes de los colorantes en el azúcar: los presentes en la planta (origen vegetal o natural) y los producidos durante el procesamiento fabril. Los pigmentos vegetales (verdes y amarillos) como la clorofila, carotenos y xantofilas son extraídos de la caña y están presentes en los jugos, y la mayoría de ellos son removidos o destruidos durante la clarificación.

En general, los colorantes del azúcar, responsables del color de los azúcares crudos y blancos, consisten de cuatro grupos:

- Colorantes de origen vegetal: compuestos de carácter fenólico, polifenoles y flavonoides.
- Caramelos: resultan de la degradación térmica de la sacarosa, glucosa o fructosa.
- Melanoidinas: resultan de la reacción entre la glucosa con compuestos aminonitrogenados.
- Productos de degradación alcalina de la fructosa y glucosa.

Los compuestos de naturaleza fenólica presentes en los jugos pueden ser sencillos o de bajo peso molecular, o de estructura mas compleja como los flavonoides, los cuales pueden existir en forma libre o como glicosidos, unidos a moléculas de azucares. Algunos de los fenoles son incoloros dentro de la planta, pero se oxidan o reaccionan con aminas produciendo sustancias coloreadas.<sup>1</sup>

Según estudios realizados, se determinó que los niveles de precursores de color (amino-nitrógenos y fenoles) o materiales pigmentados en los jugos, se relaciona con la variedad o con un déficit o estrés de la humedad, y pueden incrementar el contenido de los cuerpos coloreados, especialmente de amino-nitrógenos.

Muchos de los compuestos fenólicos en las plantas son responsables de la pigmentación de flores y frutas, con importantes agentes antioxidantes, componentes del sabor. Estos forman partes de la estructura de la lignina y le confieren a los cultivos o vegetales resistencia al ataque de plagas o insectos causantes de diversas enfermedades de las plantas.

---

<sup>1</sup> MEADE, G. P. y CHEN, J.C.P. *A new filtration system for gum analysis in raw sugar.* p. 52.

Los compuestos fenólicos de mayor relevancia en el azúcar se describen en el siguiente cuadro:

Tabla II. **Compuestos fenólicos de mayor relevancia en el azúcar**

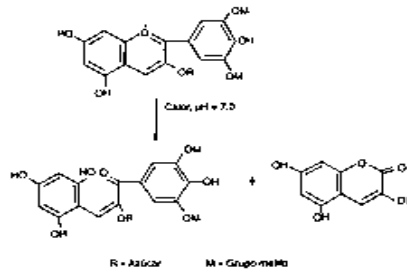
<b>Ácido Ferulico</b>	<b>Ácido Quínico</b>
<b>Ácido Cafeico</b>	<b>Ácido 3-hidroxibenzoico</b>
<b>Ácido Clorogénico</b>	<b>Ácido Vinílico</b>
<b>Ácido p-hidroxibenzoico</b>	<b>Vanillín</b>

Fuente: LARRAHONDO, Jesús Eliécer. *Composición y características químicas de la caña de Azúcar*. p. 25.

Otros compuestos más complejos responsables del color, como los flavonoides, en la caña de azúcar son: las antocianinas, los flavonoles y las flavonas.

Los flavonoides tienen una alta solubilidad en agua y se extraen de los tallos en la etapa de trituración. El grupo de antocianinas está constituido por pigmentos catiónicos cuyo color se torna oscuro cuando el pH disminuye, pero se descompone fácilmente a pH 7,0, originando un glicósido de coumarina incoloro.

Figura 2. **Descomposición térmica de las antocianinas presentes en la caña de azúcar**



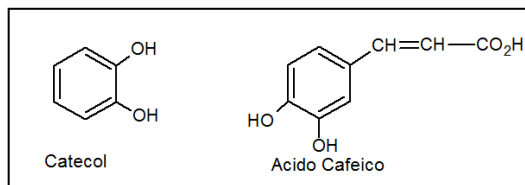
Fuente: SMITH y PATON. *Descomposición térmica de las antocianinas presentes en la caña de azúcar*. p. 332.

Las flavonas derivadas del tricino, el luteolino y el apigenino constituyen otra clase de flavonoides de importancia en la caña de azúcar. Estos compuestos son colorantes de carácter ligeramente ácido y existe en forma no ionizada a pH bajo. En general, la contribución de los flavonoides al color del jugo se incrementa rápidamente entre pH 7,0 y 9,0.

Casi todo el color de origen vegetal es también resultado de la actividad enzimática, donde enzimas importantes como el polifenol oxidasas y otras, producen compuestos intensamente coloreados. Este proceso se denomina empardamiento enzimático.

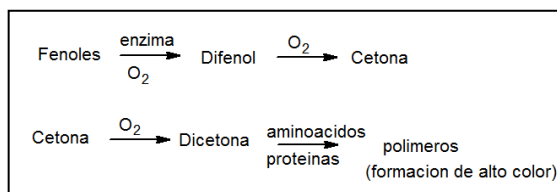
El empardamiento enzimático es un proceso, mediante el cual compuestos fenólicos pueden ser incoloros, se oxidan para producir otros compuestos coloreados. La rápida oxidación o empardamiento de trozos de manzanas o papas cuando se exponen al aire, es un ejemplo de empardamiento enzimático. Este proceso catalizado por enzimas se puede describir en forma simplificada como sigue:

Figura 3. **Fenoles típicos**



Fuente: SMITH y PATON. *Fenoles típicos*. 1985. p. 150.

Figura 4. **Reacciones básicas del empardamiento enzimático**



Fuente: SMITH y PATON. *Reacciones básicas del empardamiento enzimático*. p. 310.

Estas reacciones oxidativas son realizadas, como se mencionó, por enzimas denominadas fenolasas o polifenol oxidasa. Estos compuestos facilitan la transformación de compuestos fenólicos en quinonas (dicetonas), las cuales son coloreadas.

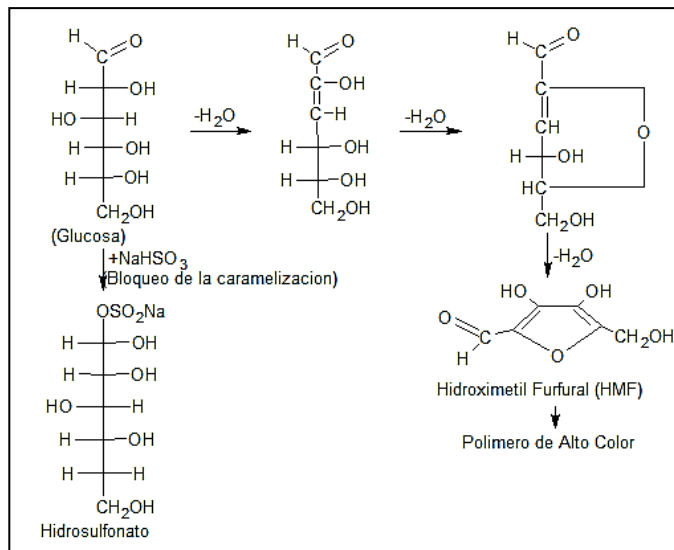
Por otro lado, varios polifenoles pueden formar complejos con Fe(III), los cuales originan los colores verdes o pardos intensos. Las fenolasas están ampliamente distribuidas en las frutas y vegetales. En las cañas, las fenolasas muestran una actividad óptima en pH de 4,5 a 7,5: ellas se conocen, reaccionan con el ácido clorogenico y el ácido cafeico o sus derivados de carácter fenolico. Las fenolasas también pueden ser muy estables, porque considerable actividad ha sido detectada después de un calentamiento de jugos a 70 °C durante 15 minutos.

Generalmente, la inactivación de las fenolasas ocurre después de un calentamiento durante 10 minutos a 80 °C. El bióxido de azufre ( $SO_2$ ) y sulfitos en solución acuosa pueden actuar también como inhibidores. Por otra parte, el empardamiento no enzimático y formación de color en el procesamiento azucarero puede dividirse en dos grandes grupos:

- Caramelización: donde los azúcares se deshidratan durante una serie de etapas del proceso fabril.
- Reacciones entre los azúcares (como la glucosa) y los aminoácidos (como las reacciones de Maillard).

Durante la caramelización, sucede una serie de deshidrataciones, que conducen a la formación de polímeros de alto color. Un sistema simplificado de esta serie de reacciones se muestra a continuación:

Figura 5. **Reacción básica de caramelización en los azúcares**



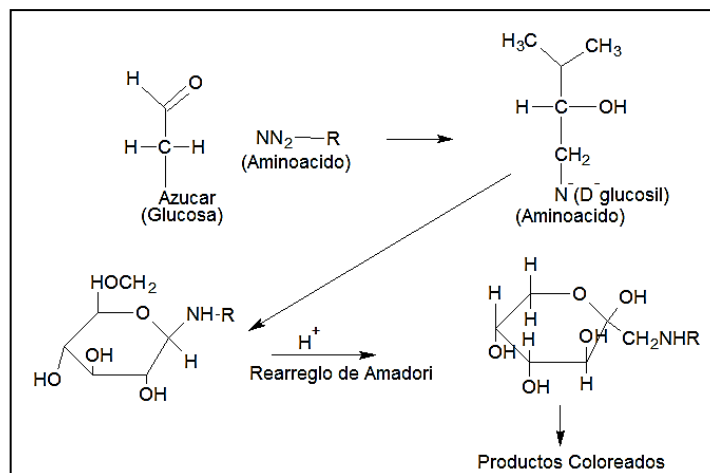
Fuente: SMITH y PATON. *Reacciones básicas de caramelización*. p. 310.

Puede observarse que durante la caramelización el azúcar original es la glucosa y fructosa, o ambos, y el producto final es el hidroximetilfurfural (HMF). Este se polimeriza para dar productos altamente coloreados.

Es posible, que la glucosa sea bloqueada por la acción del bisulfito de sodio. Esto puede contribuir a reducir las reacciones de deshidratación y formación de color caramelo durante el proceso fabril (etapas de calentamiento, evaporación y agotamiento). Se toma en cuenta la baja reactividad hacia las reacciones de deshidratación del producto de sulfito formado con las unidades de glucosa y otros azúcares denominados hidrosulfonatos.

En las reacciones entre azúcares, como glucosa y aminoácidos, se denomina reacciones de Maillard, la etapa inicial consiste en una adición del grupo amino de los aminoácidos al grupo carbonilo de los azucare para formar N-(D-Glucosil) aminoácidos, los cuales se convierten también en compuestos formadores de color

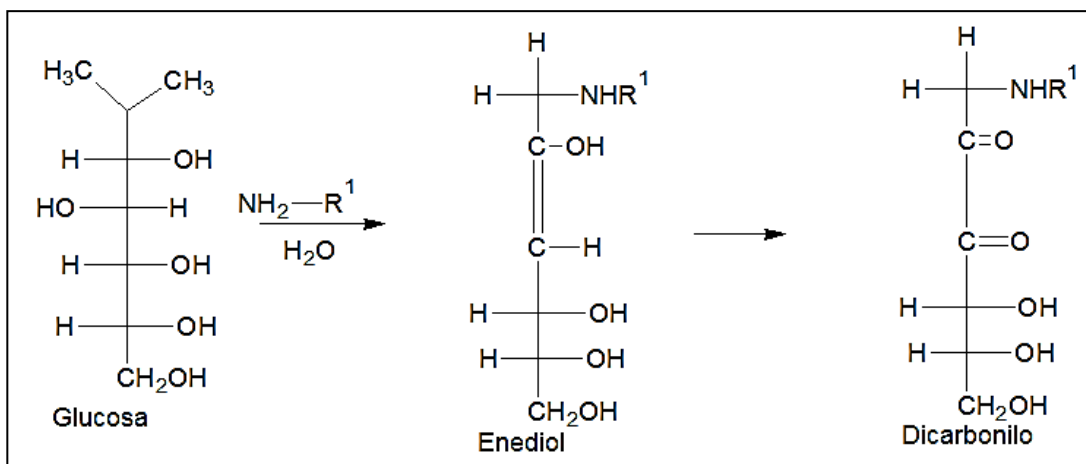
Figura 6. Reacciones típicas de Maillard



Fuente: SMITH y PATON. *Reacciones típicas de Millard*. p. 300.

La degradación de Strecker es otra vía de transformación de los azúcares y formación de color. La fructosa y glucosa reaccionan para formar compuestos dicarbonílicos, los cuales a su vez inician la degradación de los aminoácidos, para generar aldehídos y aminoacetonas. Estos conducen a la formación de varios productos precursores o formadores de color.

Figura 7. **Degradación de *strecker* y formación de compuestos dicarbonílicos a partir de azúcares**



Fuente: SMITH y PATON. *Degradación de strecker y forma*. p. 310.

Generalmente, estas reacciones son exotérmicas y están acompañadas por descensos o caídas del pH. Como ha sido el caso de las anteriores reacciones típicas de la caramelización, el (SO<sub>2</sub>) y sulfitos pueden inhibir o bloquear la formación de color, mediante la producción de compuestos de adición: carbonilhidrosulfitos. Se ha sugerido también, que las reacciones de empardamiento son inhibidas mediante la acción de los sulfitos vía formación de radicales libres.



- Compuestos fenólicos y problemas asociados con el color del azúcar

Los compuestos fenólicos en los azúcares y materiales del proceso fabril, realzan y contribuyen al color. Estos compuestos forman parte de los colorantes de origen enzimático y no enzimático, mediante reacciones de condensación de los grupos fenólicos (grupo OH) con aldehídos (función característica de aldosas, como la glucosa) y aminas. Igualmente, los fenoles forman complejos de alto color, mediante uniones con átomos de hierro (FeIII) y cobre Cu(II). Además, los fenoles establecen enlaces con algunos polisacáridos (reticulación) que contribuyen a un incremento del color.

Durante las reacciones de Maillard se pierde cerca de 40 % de glucosa; las masas del proceso fabril se expanden asociadas con derrames, elevación de la temperatura, caídas en el agotamiento y dificultades en la centrifugación. Estas reacciones normalmente ocurren en materiales de baja pureza y alto brix promovidas por altas temperaturas. En tanques de almacenamiento de mieles, a veces, se colapsan y se observa un alto color. En enfriamiento de las mieles finales (por debajo de 40 °C) y la adición de hidrosulfitos (200-400 mg/kg) a las masas han sido utilizados como mecanismo de control, una vez se inician las reacciones de Maillard.

El alto color de los azúcares, como un problema del proceso fabril, puede indicar pérdidas de azúcar, ser un problema para la refinación, elevar los costos de remoción en la refinería y estar asociado con problemas de sabor, formación de *floc* y generación de complejos con otros elementos. Igualmente, se ha encontrado que un alto color puede estar relacionado con pH bajos durante el proceso de elaboración e incrementos, en el color, durante el almacenamiento del azúcar.

El material colorante, de origen natural y el formado durante el proceso fabril, especialmente de alto peso molecular (>12.000 Da), mediante generación de complejos con otros compuestos como polisacáridos e iones de hierro y calcio, tiene una alta tendencia a transferirse al cristal de azúcar. Esto representa la mayoría del color del azúcar crudo (66 % en un rango de 43,0 a 83,5 % del material colorante).

La distribución del material colorante presente en la caña de azúcar, de alto y bajo peso molecular (menor de 5 000 Da), presente en tallos, hojas y cogollos se observa a continuación:

**Tabla III. Distribución de material colorante presente en la caña de azúcar, de alto y bajo peso molecular**

	Tallo %	Hojas y cogollos (%)
Componentes de alto peso molecular (>5000)	30	70
Componentes de bajo peso molecular (<5000)	62	38

Fuente: elaboración propia.

Los datos de los componentes del color, indican que los de alto peso molecular (mayor de 5 000 Da) son mayores en las hojas y cogollos. Esto indica la importancia de procesar la caña limpia o con un bajo contenido de materia extraña vegetal (hojas y cogollos) para obtener un azúcar comercial de bajo color.

Material extraño como cogollos y hojas tiene una alta incidencia en los niveles de color debido a colorantes o precursores de color como los fenoles.

Tabla IV. **Promedio de lectura de color (ICUMSA a 420 nm)**

Materiales	Color ICUMSA
Entrenudos	5,500
Nudos	20,700
Banda de raíces	28,900
Tallo limpio	13,400
Cogollos	139,700
Material extraño (hojas)	640,000

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Efectos de los cogollos y hojas en el color y fenoles en jugos de caña. (Estudio realizado para la variedad de caña MZC74-275, Colombia)**

% cogollos y hojas	Color (ICUMSA *10 <sup>3</sup> )	Fenoles (mg/L)
0	7,4	473
1	7,6	476
5	8,4	488

Fuente: elaboración propia.

Estos constituyentes, de origen natural, afectan la calidad final del azúcar en relación con su color. El cogollo de la caña de azúcar contribuye no solo al incremento del color de los jugos de caña limpia (tallos libres de cogollos). También que es posible encontrar en el cogollo incrementos hasta de 60 % en el nivel de polisacáridos solubles, lo cual podría afectar principalmente la evaporación y cristalización del azúcar comercial. Esto enfatiza la importancia de una altura de corte adecuada durante de cosecha, y la remoción de la materia extraña, especialmente cogollos, con la finalidad de proporcionar a las fábricas caña una mejor calidad.

El posible origen o mayor procedencia del color de los azúcares ha sido informado por el Instituto de Investigaciones del Proceso Azucarero de New Orleans, mediante la determinación del denominado valor indicador (VI). Este indicador se fundamenta en las determinaciones de absorbancia (color) de soluciones (5 %) de azúcar a pH 9,0 y pH 4,0. Esto es consecuencia de las diferentes estructuras de las moléculas que contribuyen al color y su sensibilidad al pH, el cual es utilizado además, como una forma de diferenciar entre los tipos de colorantes presentes en el azúcar final.

El indicador (VI) se expresa como:

$$VI = \frac{\text{Absorbancia a pH 9.0 (color)}}{\text{Absorbancia a pH 4.0 (color)}}$$

Siendo la absorbancia medida a 420 nm utilizando la misma celda y concentración.

La relación entre el valor indicador (VI) y el tipo de colorante en los azúcares de caña de azúcar está presentada como sigue:

Tabla VI. **Relación entre el valor indicador (VI) y el tipo de colorante en los azúcares de caña de azúcar**

Tipo de Colorante	VI
Melanoidina	1,0-1,2
Caramelo	1,2-1,5
P. Degradación Alcalina	1,5-3,2
Flavonoides y C. Fenolicos	5-14

Fuente: elaboración propia.

La transferencia de impurezas, como el color y otros compuestos descritos, del jugo a los azúcares crudos se resume a continuación:

Tabla VII. **Transferencia de impurezas**

Constituyente	% en los azúcares
Color	10-20
Almidones	30-50
Dextranas	30-50
Cenizas	5-15
Polisacáridos	20-30

Fuente: elaboración propia.

La mayor transferencia a los cristales de azúcar, durante la etapa de cristalización, corresponde a los almidones.

## 2.6. Espectrofotometría

Se refiere a la medición de la cantidad de energía radiante que absorbe un sistema químico en función de la longitud de onda de la radiación, y a las mediciones a una determinada longitud de onda.

La teoría ondulatoria de la luz propone la idea de que un haz de luz es un flujo de cuantos de energía llamados fotones. La luz de una cierta longitud de onda está asociada con los fotones, cada uno de los cuales posee una cantidad definida de energía.

- Principios de la espectrofotometría: todas las sustancias son capaces de absorber energía radiante. La absorción de las radiaciones ultravioletas, visibles e infrarrojas depende de la estructura de las moléculas, y es

característica para cada sustancia química. Cuando la luz atraviesa una sustancia, parte de la energía es absorbida.

La espectrofotometría ultravioleta-visible usa haces de radiación de espectro electromagnético, en el rango UV de 80 a 400 nm, principalmente de 200 a 400 nm y en el de la luz visible de 400 a 800 nm. Por ello es de gran utilidad para caracterizar los materiales en la región ultravioleta y visible del espectro.

Las aplicaciones principales de la espectrofotometría son:

- Determinar la cantidad de concentración en una solución de algún compuesto.
- Determinación de estructuras moleculares.
- La identificación de unidades estructurales específicas, ya que estas tienen distintos tipos de absorbancia (grupos funcionales o isomerías).
- Determinación de fenoles totales por el método de Folin-Ciocalteu: el ensayo colorimétrico Folin-Ciocalteu ha sido utilizado durante muchos años como una medida del contenido de compuestos fenólicos totales en productos naturales. El método de Folin-Ciocalteu se basa en la capacidad de los fenoles para reaccionar con agentes oxidantes.

Los compuestos fenólicos oxidan al reactivo de Folin-Ciocalteu. Este reactivo contiene una mezcla de ácido fosfowolfrámico ( $H_3PW_{12}O_{40}$ ) y de ácido fosfomolibdico ( $H_3PMo_{12}O_{40}$ ). En medio básico, que se reducen por oxidación de los fenoles originando óxidos de wolframio ( $W_8O_{23}$ ) y de molibdeno ( $Mo_8O_{23}$ ). Estos pueden observarse a través de la coloración

azul generada por la oxidación, dicha coloración es proporcional a la concentración de compuestos fenólicos presentes.<sup>2</sup> .

## 2.7. Almacenaje de azúcar

Se proporcionan una lista guía de sentido común para almacenar azúcar empacada:<sup>3</sup>

- Conservar el azúcar a una temperatura inferior a 38 °C.
- Mantener una humedad relativa por debajo de 60 %.
- Mantener la altura de las estibas a un mínimo que sea práctico.
- Almacenar el azúcar separado de otros productos para evitar que pueda tomar humedad, olores, entre otras.
- Mantener inventarios limitados con alta rotación.
- Empacar para embarques directos tanto como sea posible.
- En regiones húmedas utilizar calor o aire acondicionado para controlar los cambios de humedad relativa y temperatura.
- Empacar únicamente el azúcar acondicionado con embalajes resistentes a la humedad.

Ciertamente este último numeral es el ideal, pero frecuentemente no es una solución económica. Un punto adicional que debe recordarse es la certeza de que las estibas estén secas. Thames Refinery, en Londres, seca toda estiba húmeda (o aquellas nuevas- la madera “verde” contiene altos niveles de

---

<sup>2</sup> KUSKOSKI, Martha. et al. Universidad de Sevilla, Departamento de Química Analítica y Departamento de Bioquímica, Bromatología y Toxicología, Facultad de Farmacia, C/ García González núm. 2, 41012 – Sevilla.

<sup>3</sup> CHEN, J. C. P.; CHOU, Chung-Chi, 1993. *Cane sugar handbook: a manual for cane sugar manufacturers and their chemists*. p. 115.

humedad) antes de su uso. Algunas veces se utiliza una barrera contra humedad entre los sacos de azúcar y la estiba.

Las bodegas para azúcar ensacada debieran construirse de ladrillo con techos cerrados (para excluir la acción tanto de la intemperie como de las aves) y pisos de madera o concreto. Para cálculos de la capacidad,<sup>4</sup> sugiere una densidad bruta de 800 kg de azúcar por m<sup>3</sup> de estiba (no incluye pasillos entre estibas), mientras<sup>5</sup> estima 500 kg de azúcar por m<sup>3</sup> de volumen total de bodega.

Aunque los sistemas de acondicionamiento de aire son deseables, no son utilizados universalmente. El sistema de acondicionamiento debiera funcionar de forma intermitente (únicamente durante los períodos de HR ambiente alta). No es necesario un control estricto de HR - el requerimiento mínimo es mantenerla temperatura de la bodega unos grados por arriba del ambiente, con un mínimo de 16 °C y asegurar buena circulación de aire entre las estibas.

Al almacenar azúcar refinado ensacado, se recomienda proporcionar a los costados de la estiba una forma cónica de 20° para sacos de arpillera y 7,5° para bolsas de papel.<sup>6</sup> Para plástico (polietileno o tejido de PVC), una práctica común es retroceder el equivalente de la mitad del ancho de un saco por capa o hilera de sacos y entrelazarlos tanto como sea posible.

El uso de bastidores para el almacenaje de azúcar paletizado, si bien es caro, es altamente recomendable. Mantiene el producto limpio, reduce en gran medida el daño (bolsas rasgadas por las esquinas de las tarimas u operación

---

<sup>4</sup> E., Hugot. *Manual para ingenieros azucareros*. p. 87.

<sup>5</sup> P., van der Poel; SCHIWECK, H.; SCHWARTZ, T. *Tecnología de Azúcar. Fabricación remolacha y de caña*. p. 200.

<sup>6</sup> E., Hugot. *Manual para ingenieros azucareros*. p. 88.



descuidada del montacargas), incrementa la seguridad en el apilado de altura y mejora la flexibilidad en el acceso y movimiento del producto.

## 2.8. Formación de color en el azúcar

Cuando se almacena por períodos largos, el azúcar refinado experimenta un incremento gradual en el color. La velocidad a la que esto ocurre depende en gran parte de la temperatura de almacenaje. Recolectó información del incremento de color de cuatro localidades y obtuvo un rango entre 5 % por mes a 20 °C y 80 % por mes a 60 °C. Experiencias en otros lugares indican que las cifras de Chapman están en el lado alto.<sup>7</sup> Estudios en Sudáfrica han mostrado incrementos de color entre 10 % y 100 % en un período de un año. Se reportan un incremento de menos de 4UI en 9 meses, pero mencionan que debería utilizarse enfriamiento de aire si el ambiente se encuentra a más de 30 °C.<sup>8</sup>

En Sudáfrica se ha encontrado que el incremento de color es más rápido durante el primer mes de almacenaje, después del cual la velocidad se reduce. Esto puede ser consecuencia de almacenar azúcar no acondicionada o acondicionada inadecuadamente, la cual experimenta altas velocidades en el incremento de color mientras se acondiciona.<sup>9</sup> Se reporta un incremento lineal de color con el tiempo.<sup>10</sup> Se encontró que la velocidad de deformación de color se incrementa logarítmicamente con la temperatura.

---

<sup>7</sup> CHAPMAN, Sydney. *La teoría matemática de los gases no uniformes: un relato de la teoría cinética de la viscosidad, la conducción térmica, y la difusión de los gases*. p. 255.

<sup>8</sup> P., van der Poel; SCHIWECK, H.; SCHWARTZ, T. *Tecnología de Azúcar. Fabricación de la remolacha y de la caña*. p. 135.

<sup>9</sup> Muro et al. 1974.

<sup>10</sup> Mancilla, C. G.; E. Z. Blanco; S. L. Pérez; C. R. Castrejón y T. M. Rosas. *Propiedades de las soluciones*. Universidad del Valle de México. p. 7.

Chapman recomienda almacenar por debajo de 20 °C para minimizar la formación de color, mientras que <sup>11</sup>sugieren almacenar por debajo de 30 °C, y además recomiendan que el azúcar ingresando al almacenaje debiera estar por debajo de 45 °C. de <sup>7</sup>realizó pruebas en las que encontró que hasta 35 °C el oscurecimiento era despreciable. Los azúcares difieren en su susceptibilidad al incremento de color y en su sensibilidad a la temperatura - comentan que el azúcar de remolacha y de caña pueden comportarse de forma diferente. Cheng et al. (1983) encontró que “el desarrollo de color fue más marcado en azúcar fabricado con un proceso de carbonatación que por un proceso de sulfitación.”<sup>12</sup> afirma que el incremento de color depende del contenido de invertidos, del pH de la película de jarabe y del contenido de SO del azúcar.<sup>13</sup>

Otros factores que afectan el desarrollo de color en el almacenaje son la ceniza y la humedad. La humedad y el aire son necesarios para muchas reacciones de formación de color. Una prueba realizada en Sudáfrica midió el incremento de color en muestras de azúcar idénticas almacenadas bajo condiciones similares, excepto que la mitad de las muestras fueron empacadas en bolsas plásticas (impermeables) y la otra mitad en bolsas de papel. El azúcar empacado en bolsas plásticas incrementó su color de 32 a 44 UI en un período de tiempo de once meses, mientras que el azúcar empacado en bolsas de papel incrementó su color de 32 a 68 UI en el mismo período.

---

<sup>11</sup> Clarke et al. 1992.

<sup>12</sup> Clarke et al. y Chapman.

<sup>13</sup> Van der.

### 3. DISEÑO METODOLÓGICO

#### 3.1. Variables

Las variables que influyen directamente o indirectamente en el proceso de determinación del color de azúcar y cuantificación de fenoles totales.

Tabla VIII. Variables del proceso

Variable	Unidad	Dependiente	Independiente	Constante	No Constante
Color	Unidades ICUMSA	X			X
Concentración de fenoles	Ppm	X			X
Absorbancia	Abs	X			X
pH	pH	X			X
Concentración de sólidos disueltos	Brix	X			X
Condiciones ambientales bodega	oC, %		X		X
Condiciones ambientales laboratorio	oC, %		X		X
Muestreo			X	X	

Fuente: elaboración propia.

#### 3.2. Delimitación del campo de estudio

El proyecto de investigación se llevó a cabo en el laboratorio del Ingenio Trinidad, Masagua, Escuintla. Se realizaron los ensayos analíticos de color y compuestos fenólicos, y las muestras se almacenaron en la bodega de azúcar blanco del mismo ingenio, para proceder a analizar quincenalmente color Icumsa.

### 3.3. Recursos humanos

Investigador: Byron Alesky Obregón Castañeda

Asesor: Ing. Qco. Estuardo Edmundo Monroy Benitez

### 3.4. Recursos materiales

- Equipo
  - Espectrofotómetro Schott Uviline
  - Medidor de pH Thermo Scientific
  - Balanza analítica Satorius
  - Refractómetro Rudolph Reserch Analitical
  - Agitador magnético IKA
  - Bomba de vacío
  - Baño ultrasónico
  
- Cristalería
  - Pipetas serológicas, 5 ml, 10 ml
  - Balones aforados, 100 ml
  - *Beakers* 250 ml, 100 ml
  - Tubo de ensayo
  - Perilla de succión
  - Espátula
  - Quita zato
  
- Reactivos y consumibles
  - Reactivo de Folin-Ciocalteu
  - Ácido cafeico
  - Hidróxido de sodio, 0,1 N

- Ácido clorhídrico, 0,01 N
- Membranas 0,45 micras
- Agua desmineralizada

### **3.5. Técnica cuantitativa y cualitativa**

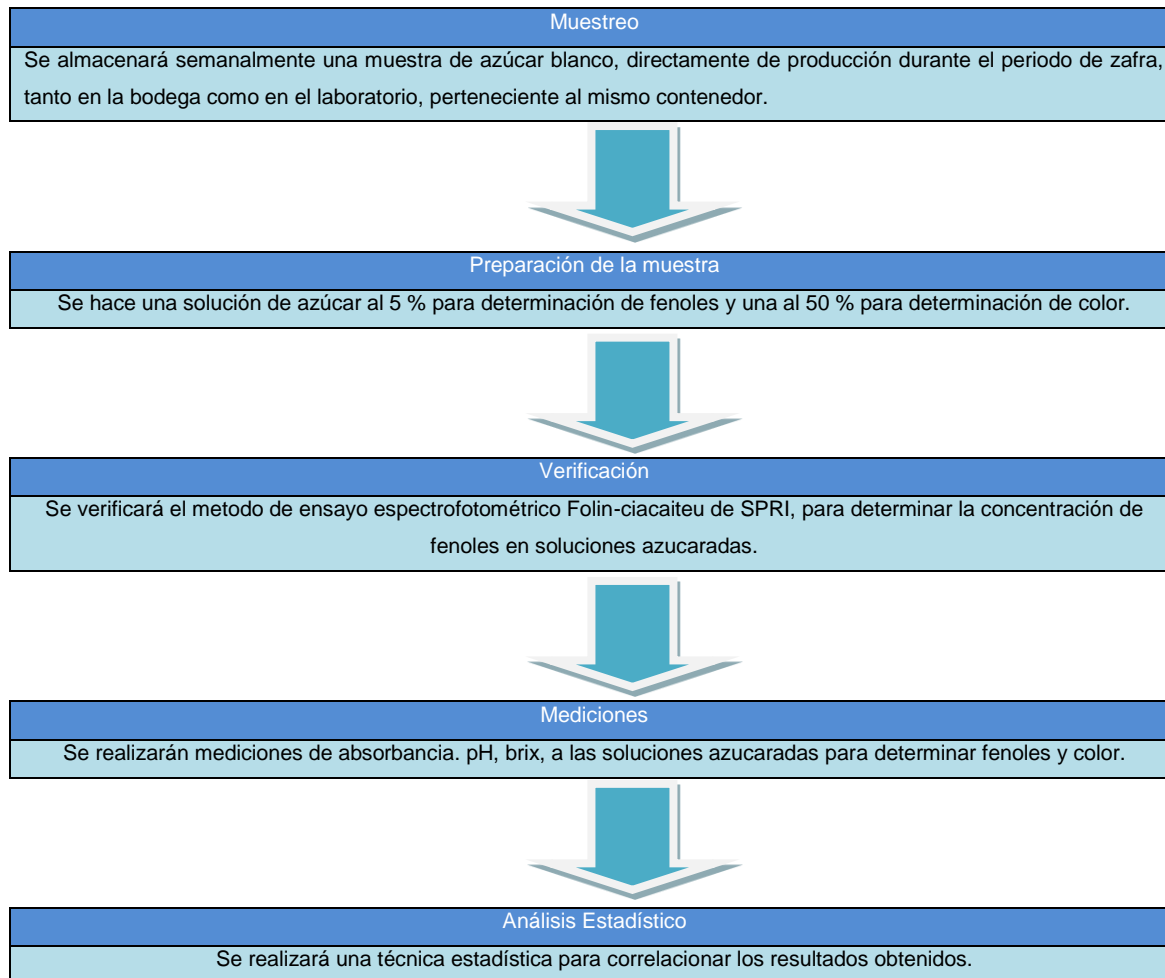
El proyecto, en su desarrollo, utilizará técnicas cuantitativas y cualitativas para la determinación de datos propios de las variables. Así como técnicas de observación y control:

- Medición de color de soluciones azucaradas para determinar el color que presenta la muestra en el momento de su análisis.
- Medición de concentración de fenoles en solución de ácido cafeico para realizar la curva de calibración.
- Medición de concentración de fenol en azúcar blanco.
- Medición de pH en solución de azúcar blanco.
- Factor de dilución de azúcar para realizar el método analítico de Folin-Ciocalteu.

### **3.6. Recolección y ordenamiento de la información**

A continuación se explicará la recolección y ordenamiento de la información de datos.

Figura 8. **Recolección y ordenamiento de la información**



Fuente: elaboración propia.

### 3.7. **Tabulación, ordenamiento y procesamiento de información**

Los datos obtenidos durante el proceso de investigación serán recopilados y ordenados en tablas como las siguientes.

Tabla IX. **Datos para la elaboración de la curva de calibración**

Absorbancia	Concentración (ppm)
	0
	1
	2
	3
	4
	5
	6
	7
	8
	9

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Datos para la verificación de la curva de calibración**

	Corrida 1		Corrida 2		Corrida 1	
	Absorbancia	Concentración	Absorbancia	Concentración	Absorbancia	Concentración
Repetición 1						
Repetición 2						
Repetición 3						
Media						
Desviación Estándar						
Coficiente de Variación						

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Datos para toma de valores de absorbancia y determinación de concentración de fenoles**

Número de muestra	Identificación de la muestra	.Absorbancia	Concentración	Concentración Real
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Datos para la determinación de concentración de fenoles y color**

Núm.	DÍA				
	Código	48962	48962	48963	48962
	Muestra	MA1B0L	MA1B10	MA1B20	MA1BOL
	Fecha	Color			Fenoles
1	18/11/2013	245	245	279	
2	02/12/2013	239	245	258	
3	16/12/2013	246	238	264	
4	30/12-2013	236	240	271	
5	13/01/2014				
6	27-01-2014				
7	10-02-2014				
8	24/02/2014				
9	10/03/2014				
10	24/03/2014				

Fuente: elaboración propia.



### 3.8. Análisis estadístico

Es un componente del análisis de datos. En el contexto de la inteligencia de negocios (BI), el análisis estadístico requiere recoger y escudriñar cada muestra de datos individual en una serie de artículos desde los cuales se puede extraer las muestras.

#### 3.8.1. Media aritmética

Esta se calcula con la siguiente ecuación:

$$\bar{x} = \frac{\sum_i x_i}{n} \quad \text{[Ecuación 4]}$$

Donde:

–

$\bar{x}$  = media aritmética

$n$  = número de datos

$i$  = valor  $i$ ésimo

#### 3.8.2. Desviación estándar

Esta, para el grupo de datos obtenidos durante la investigación se determinará a partir de la siguiente ecuación.

$$s = \sqrt{\sum_i \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad \text{[Ecuación 5]}$$

Donde:

$S$  = desviación estándar

–

$X$  = media aritmética

$n$  = número de datos

$i$  = valor  $i$ ésimo

### 3.8.3. Comparación de dos medias mediante $t$ de Student

Esta prueba se realizó para determinar si hay diferencia significativa entre la cantidad de fenoles presentes en la muestra y la velocidad de degradación en la misma para aceptar o rechazar la hipótesis.

Esta prueba estadística es utilizada para distinguir si la diferencia entre las cantidades medidas se puede atribuir a errores aleatorios o si la diferencia es significativa. En este caso se tendrá dos medias muestrales  $\bar{x}_1$  y  $\bar{x}_2$ .

Se calcula el estadístico  $t$ , mediante la siguiente ecuación:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad \text{[Ecuación 6]}$$

Donde:

$t$ : Valor de  $t$  calculada

$\bar{x}$ : Media

$n$ : Número de muestras

$s$ : Desviación estándar

El valor de  $t$  calculada por este estadístico es contrastado posteriormente utilizando el valor crítico de  $t$  mostrado en la tabla VII. Este valor depende del nivel de significancia y de los grados de libertad. Los grados de libertad son calculados mediante la siguiente ecuación:

$$G.L. = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{s_1^4}{n_1^2(n_1-1)} + \frac{s_2^4}{n_2^2(n_2-1)}} \quad [\text{Ecuación 7}]$$

Donde:

$G.L.$ : Grados de libertad

$n$ : Número de muestras

$s$ : Desviación estándar

Los grados de libertad se aproximan al entero siguiente.

El criterio de decisión sobre los valores de  $t$  calculado y críticos, son los siguientes:

- Si  $t_{cal} < t_{crit}$  entonces las medias no tienen diferencia significativa
- Si  $t_{cal} > t_{crit}$  entonces las medias tienen diferencia significativa

Tabla XIII. Valores críticos de la distribución  $t$

<i>Valor de <math>t</math> para un intervalo de confianza de</i>	<i>90%</i>	<i>95%</i>	<i>98%</i>	<i>99%</i>
<i>Valor crítico de <math> t </math> para valores de <math>P</math> de número</i>	<i>0.10</i>	<i>0.05</i>	<i>0.02</i>	<i>0.01</i>
<i>de grados de libertad</i>				
1	6.31	12.71	31.82	63.66
2	2.92	4.30	6.96	9.92
3	2.35	3.18	4.54	5.84
4	2.13	2.78	3.75	4.60
5	2.02	2.57	3.36	4.03
6	1.94	2.45	3.14	3.71
7	1.89	2.36	3.00	3.50
8	1.86	2.31	2.90	3.36
9	1.83	2.26	2.82	3.25
10	1.81	2.23	2.76	3.17
12	1.78	2.18	2.68	3.05
14	1.76	2.14	2.62	2.98
16	1.75	2.12	2.58	2.92
18	1.73	2.10	2.55	2.88
20	1.72	2.09	2.53	2.85
30	1.70	2.04	2.46	2.75
50	1.68	2.01	2.40	2.68
$\infty$	1.64	1.96	2.33	2.58

Fuente: MILLER & MILLER. *Estadística y Quimiometría para Química Analítica*. p. 136.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Velocidad de degradación del color del azúcar en relación a la cantidad de compuestos fenólicos

Los datos siguientes muestran la relación que existe entre la concentración de compuestos fenólicos en las muestras de azúcar analizada y la velocidad con que se degrada su color y el coeficiente de correlación que existe entre ambas variables.

Tabla XIV. **Relación entre compuestos fenólicos y velocidad de degradación del azúcar**

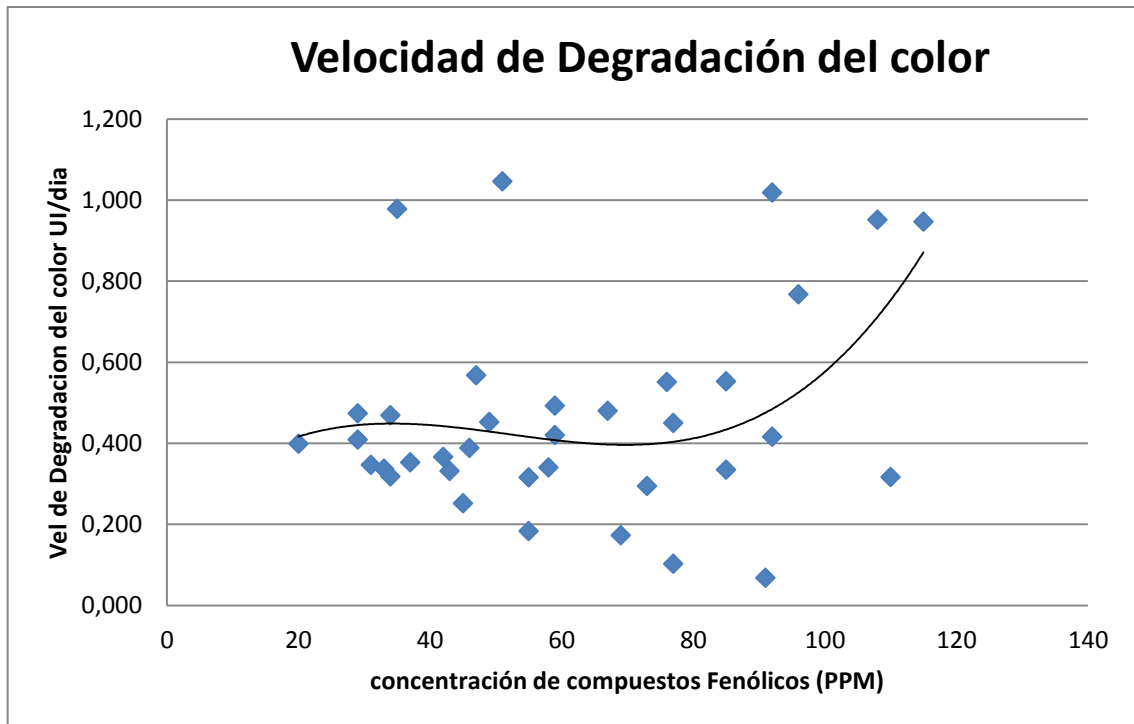
Compuestos Fenólicos (PPM)	Velocidad de Degradación UI/día
2,0	0,398
2,9	0,474
2,9	0,410
3,1	0,347
3,3	0,338
3,4	0,318
34	0,469
35	0,979
37	0,353
42	0,367
43	0,332
45	0,252
46	0,389
47	0,568
49	0,452
51	1,046
55	0,316

Continuación de la tabla XIV.

55	0,184
58	0,341
59	0,493
59	0,420
67	0,480
69	0,173
73	0,295
76	0,552
77	0,102
77	0,451
85	0,553
85	0,335
91	0,068
92	1,019
92	0,416
96	0,768
108	0,951
110	0,317
115	0,946

Fuente: elaboración propia.

Figura 9. **Gráfico de velocidad de degradación versus concentración de compuestos fenólicos**



Fuente: elaboración propia.

#### 4.2. **Color de producción del azúcar en relación a la cantidad de compuestos fenólicos**

Los siguientes datos corresponden a la relación entre el color de producción de azúcar analizada y la cantidad de compuestos fenólicos que contiene la misma.

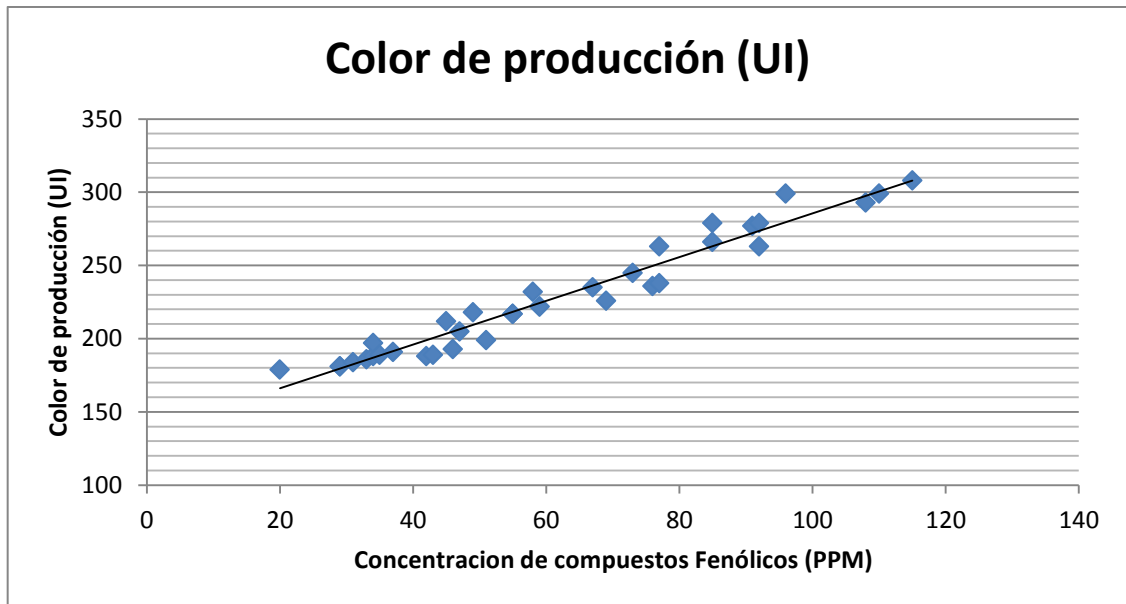
Tabla XV. **Relación entre compuestos fenólicos y color de producción**

Compuestos Fenólicos (PPM)	Color de producción (UI)
20	179
29	181
29	181
31	184
33	186
34	188
34	197
35	189
37	191
42	188
43	189
45	212
46	193
47	205
49	218
51	199
55	217
55	217
58	232
59	222
59	222
67	235
69	226
73	245
76	236
77	263
77	238
85	279
85	266
91	277
92	279
92	263
96	299
108	293
110	299
115	308

Fuente: elaboración propia.



Figura 10. **Gráfico de color de producción versus concentración de compuestos fenólicos**



Fuente: elaboración propia

#### 4.3. **Velocidad de degradación en relación al color inicial de producción**

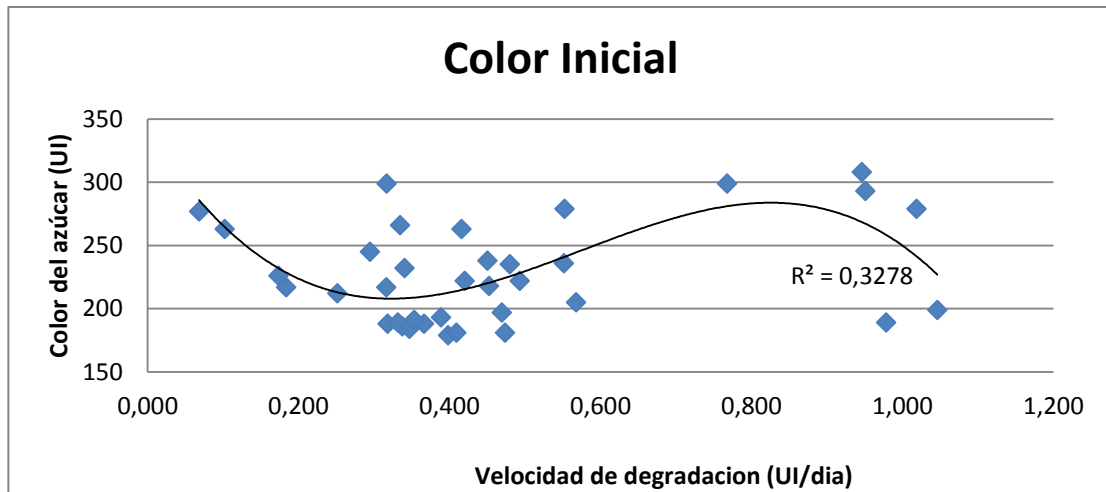
Los siguientes datos presentan la correlación que existe entre la velocidad de degradación del color del azúcar con el color inicial de la misma muestra.

Tabla XVI. **Relación entre velocidad de degradación y color de producción**

Velocidad de Degradación UI/día	Color Inicial
0,398	179
0,474	181
0,410	181
0,347	184
0,338	186
0,318	188
0,367	188
0,979	189
0,332	189
0,353	191
0,389	193
0,469	197
1,046	199
0,568	205
0,252	212
0,316	217
0,184	217
0,452	218
0,493	222
0,420	222
0,173	226
0,341	232
0,480	235
0,552	236
0,451	238
0,295	245
0,102	263
0,416	263
0,335	266
0,068	277
1,019	279
0,553	279
0,951	293
0,317	299
0,768	299
0,946	308

Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Gráfico de velocidad de degradación versus color de producción**



Fuente: elaboración propia.

#### 4.4. **Velocidad de degradación según lugar de almacenaje y época del año**

Los datos de velocidad de degradación se calcularon para 2 épocas distintas del año en dos bodegas diferentes. Además del almacenamiento a condiciones de humedad y temperatura controladas en el laboratorio.

Tabla XVII. **Velocidad de degradación según ambiente y época del año**

Ambiente de almacenaje	Velocidad de Degradación UI/día	Velocidad de degradación Época Seca UI/día	Velocidad de degradación Época lluviosa UI/día
Bodega 10	0,460	0,459	0,451
Bodega 20	0,466	0,398	0,470
Laboratorio	0,145	NA	NA

Fuente: elaboración propia.

#### 4.5. Análisis estadístico

A continuación se presenta la tabla de contraste de significación (*t* de Student) entre épocas y ambiente de almacenaje.

Tabla XVIII. **Contraste de significación (*t* de Student) entre épocas y ambiente de almacenaje**

Velocidad de Degradación	T Crítica	T Calculada	Resumen	Conclusión
Bodega 10, Época seca y Lluviosa	2,06	0,08	$T_{\text{calc}} < T_{\text{crit}}$ ( $H_0$ es rechazada)	No hay diferencia estadísticamente significativa entre ambas épocas.
Bodega 20, Época seca y Lluviosa	2,07	0,73	$T_{\text{calc}} < T_{\text{crit}}$ ( $H_0$ es rechazada)	No hay diferencia estadísticamente significativa entre ambas épocas.
Bodega 10 y Bodega 20	2,03	0,08	$T_{\text{calc}} < T_{\text{crit}}$ ( $H_0$ es rechazada)	No hay diferencia estadísticamente significativa entre ambos ambientes
Laboratorio y Bodega 10	2,08	4,65	$T_{\text{calc}} > T_{\text{crit}}$ ( $H_0$ es aceptada)	Si hay diferencia estadísticamente significativa entre ambos ambientes.
Laboratorio y Bodega 20	2,08	5,13	$T_{\text{calc}} > T_{\text{crit}}$ ( $H_0$ es aceptada)	Si hay diferencia estadísticamente significativa entre ambos ambientes.

Fuente: elaboración propia.

Coeficientes de correlación de las líneas de tendencia entre parejas de las 3 variables estudiadas, concentración de compuestos fenólicos, velocidad de degradación del color y color inicial de producción

Tabla XIX. **Coeficientes de correlación entre las variables estudiadas**

Variabes	Ecuación de la línea de tendencia	Coefficiente de correlación de la línea de tendencia	Conclusión
Compuestos fenólicos vs Velocidad de degradación	$y = 2E-06x^3 - 0,0004x^2 + 0,0168x + 0,2079$	$R^2 = 0,1659$	No existe correlación entre las variables.
Compuestos fenólicos vs Color de producción	$y = 1,4937x + 136,22$	$R^2 = 0,9528$	Si existe correlación entre las variables.
Color de Producción vs Velocidad de degradación	$y = -1195x^3 + 2057,8x^2 - 954,77x + 341,92$	$R^2 = 0,3278$	No existe correlación entre las variables.

Fuente: elaboración propia.

## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El estudio realizado se fundamentó en el muestreo de 36 muestras de azúcar almacenadas en 2 diferentes bodegas y 18 almacenadas ambientales en condiciones controladas en el laboratorio. Todas analizadas en un periodo máximo de 10 meses analizando todas las muestras cada 14 días para determinar una tendencia en la degradación del color y poderla correlacionar con la cantidad de compuestos fenólicos totales presentes en las mismas, las cuales se analizaron al inicio del estudio de cada muestra. Los resultados se obtuvieron mediante comparación de medias y correlación de resultados.

El objetivo principal del estudio era encontrar una correlación entre los compuestos fenólicos presentes y la velocidad con que la muestra de azúcar se deteriora o aumenta en condiciones normales de almacenaje. En la tabla XIV están tabulados dichos datos y graficados en la figura 8, al calcular un coeficiente de correlación,  $R^2=0,1659$ . Se pudo determinar que no existe una correlación suficientemente alta para asegurar que existe una relación entre ambas variables. Es por ello que se pudo determinar que los compuestos fenólicos no influyen en la velocidad de degradación del color.

Así también se realizó una comparación entre el color inicial de producción de cada una de las muestras con la velocidad de degradación, (tabla XVI, figura 10). Se determina que el color inicial de la muestra tampoco influye en su degradación, ya que su coeficiente de correlación es de 0,3278 como se muestra en la tabla XIX.

No obstante si se pudo observar que existe una relación directa entre los colores iniciales de producción de las muestras con la concentración de compuestos fenólicos totales en las mismas. Esto dice que entre más compuestos fenólicos hay presentes en una muestra más será el color detectado en el análisis (tabla XV, figura 9). Los compuestos fenólicos son responsables de la pigmentación oscura del azúcar.

Para determinar que otras variables pueden afectar la velocidad con la que una muestra se degrada, se hicieron comparaciones entre muestras almacenadas en diversos ambientes, y entre dos diferentes épocas del año. Se toma en cuenta que la temperatura y humedad ambiental incide en las condiciones de almacenaje del azúcar en el ingenio trinidad, ya que las bodegas de producto terminado, no cuentan con un sistema de control de parámetros ambientales que aseguren que las muestras no se deteriorarán por efecto de las mismas.

Al hacer una comparación de la velocidad de degradación del azúcar entre dos variables ambientales, época seca y época húmeda, para ambas bodegas, se observa, como se indica en la tabla XVIII, que no existe diferencia estadísticamente significativa, determinada por la técnica estadística *t* de Student. Aunque si existe diferencia numérica, entre ambas velocidades, se puede atribuir a la incertidumbre del muestreo o del análisis, ya que dicha diferencia es muy pequeña.

De igual manera al hacer una comparación de la velocidad de degradación del azúcar en ambas bodegas sin tomar en cuenta la época, utilizando la misma técnica estadística, se determina que no hay diferencia estadísticamente significativa, como se aprecia en la tabla XVIII. Esto indica que a pesar de que

el diseño de ambas bodegas es diferente, las condiciones del ambiente generan casi el mismo efecto en la degradación de color para las 2 bodegas.

No obstante al hacer una comparación estadística de la velocidad de degradación entre el azúcar almacenada en ambas bodegas y el azúcar almacenada en condiciones controladas de humedad y temperatura en el laboratorio, si se pudo determinar, una diferencia estadísticamente significativa. Esto con un 99 % de intervalo de confianza, por lo que se establece que la velocidad de degradación está influida directamente por el alto contenido de humedad del ambiente (mayor de 60 %) y una temperatura alta del mismo (mayor a 30 °C). Esto que en el laboratorio los parámetros máximos de humedad y temperatura ambiental no exceden los 60 % y 30 °C respectivamente.





## 6. LOGROS OBTENIDOS

1. Se logró confirmar que la medición de compuestos fenólicos totales en muestras de azúcar no son determinantes para definir la logística y tiempo de almacenamiento, así como la fecha de despacho del azúcar producida, con base en la probable velocidad de degradación del color de la misma.
2. Aportar parámetros de condiciones ambientales para la mejora de las actuales de las bodegas destinadas al almacenaje del azúcar producida, para disminuir la velocidad con la que el producto final se degrada en color, a través del tiempo.
3. Aportar información para la determinación del uso eficiente de las bodegas, según el tiempo estimado de almacenamiento y el color inicial de producción.



## CONCLUSIONES

1. No existe correlación entre la velocidad de degradación del color del azúcar y la concentración de compuestos fenólicos totales presentes en la misma.
2. No existe diferencia significativa de velocidades de degradación del color del azúcar entre muestras almacenadas en ambas bodegas.
3. Si existe diferencia significativa de velocidades de degradación del color del azúcar, entre muestras almacenadas en ambas bodegas y las muestras almacenadas en el laboratorio.
4. No existe diferencia significativa de velocidades de degradación del color del azúcar, entre muestras almacenadas analizadas en la época seca y la época lluviosa.
5. La velocidad de degradación del color del azúcar disminuye considerablemente al almacenar bajo condiciones ambientales bajas de humedad relativa y temperatura.



## RECOMENDACIONES

1. Almacenar el azúcar tomando en cuenta el color inicial de producción y la velocidad de degradación del color a manera que cuando el azúcar esté cerca a su límite máximo de color permitido por el cliente, esta se encuentre aún en parámetros aceptables y en un lugar de fácil despacho.
2. Hacer un análisis de costo de readecuación de las bodegas de azúcar para disminuir el impacto de las condiciones ambientales y compararlo con gastos de logística, gastos de almacenamiento externo y gastos por devoluciones por reclamos.
3. Hacer pruebas con químicos en el proceso para disminuir la cantidad de compuestos fenólicos presentes en el azúcar y así mejorar el color inicial de producción de la misma.



## BIBLIOGRAFÍA

1. CENGICAÑA. *El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala*. Guatemala: Artemis Edinter, 2012. 512 p.
2. CONCEJO EDITORIAL MNCN. *Determinación colorimétrica de compuestos fenólicos en agua mediante el reactivo de Folin-Ciocalteu*. [en línea] <<http://www.mncn.csic.es/>> [Consulta: 28 de agosto de 2013].
3. LARRAHONDO, Jesús Eliécer. *Composición y características químicas de la caña de azúcar*. Colombia: Universidad del Valle, 2012. 110 p.
4. MEDEIROS, Fernando. *Proceso de fabricación de azúcar*. 3a ed. Universitaria de UFPE. 2011. 447 p.
5. OROZCO VÁSQUEZ, Héctor. et al. *Catálogo de variedades promisorias de caña de azúcar de la agroindustria azucarera guatemalteca*. Guatemala, Cengicaña, 2004. 40 p.
6. PORTA, Antonio. *Fabricación del azúcar*. España: Salvat, 1955. 809 p.
7. REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. Alemania: Bartens, 2012. 880 p.
8. SPENCER, Guilfor; MEADE, George. *Manual del azúcar de caña*. 9a ed. España: Montaner y Simón, 1967. 940 p.





## **APÉNDICES**



**Apéndice 1: Procedimiento de muestreo y análisis de color de azúcar blanco y compuestos fenólicos en azúcar blanco.**

**Muestreo:**

Las muestras serán almacenadas semanalmente, tomando un Jumbo (contenedor con aprox. 22 quintales) y separándolo del azúcar que se destinará para despacho, así como tomando una muestra de 10 Kg y almacenándola en el laboratorio en un recipiente plástico con tapadera de rosca. El calendario de almacenaje es el siguiente:

**Tabla I. Calendario de almacenaje de azúcar blanco para pruebas de degradación de color**

Id	Día	Fecha
MA1B10	Lunes	18-nov
MA2B10	Martes	26-nov
MA3B10	Miércoles	04-dic
MA4B10	Jueves	12-dic
MA5B10	Viernes	20-dic
MA6B10	Lunes	23-dic
MA7B10	Martes	31-dic
MA8B10	Miércoles	08-ene
MA9B10	Jueves	16-ene
MA10B10	Viernes	24-ene
MA11B10	Lunes	27-ene
MA12B10	Martes	04-feb
MA13B10	Miércoles	<u>12-feb</u>
MA14B10	Jueves	<u>20-feb</u>

Fuente: elaboración propia.

El análisis se realizará exactamente cada dos semanas para no sobrecargar de análisis un día de la semana en específico.

**Determinación de color en solución de azúcares morenos y jarabes coloreados a pH 7,0 GS1/3-7 2011 ICUMSA**

Este método se aplica a la determinación del color en solución del azúcar crudo, azúcar blanco de plantación, azúcares morenos y jarabes coloreados, su fundamento consiste en disolver el azúcar en agua, se regula el pH de la solución a 7,0 y se filtra por un filtro de membrana para eliminar la turbidez. Se mide la absorbancia de la solución filtrada a una longitud de onda de 420 nm y se calcula el color de la solución. Se seleccionan la concentración de la solución y la longitud de la celda de cuarzo para obtener una transmitancia preferentemente en el rango comprendido entre 20 y 80 %.

Equipo y cristalería:

- Balanza analítica
- Equipo de Filtración
- Plancha de Agitación
- Refractómetro
- Medidor de pH
- Beakers plásticos o de vidrio de 100 ml
- Micro pipeta
- Agitadores magnéticos
- Celda de Cuarzo de 50 mm

Reactivos e Insumos:

- Agua desmineralizada

- Acido Clorhídrico 0/01 N
- Hidróxido de Sodio 0,01 N
- Filtros membrana de .45 micrones.

#### Procedimiento

- Homogenizar la muestra de azúcar cuidadosamente, tarar un beaker, pesar 50 gr de azúcar y 50 gr de agua desmineralizada
- Disolver y mezclar agitando la solución a temperatura ambiente hasta completar la disolución de la muestra.
- Ajustar la solución a pH 7,0 añadiendo ácido clorhídrico 0,01 N o solución de hidróxido de sodio 0,01 N con una micro pipeta, agitando continuamente con un agitador magnético.
- Dejar estabilizar la muestra aproximadamente por 1 minuto y después retirar el electrodo del medidor de pH.
- Filtrar la solución de la muestra al vacío a través de un filtro membrana de nitrato de celulosa con tamaño de poro de 0,45 micrómetros.
- Recibir el filtrado en un tubo y pasarlo por el baño ultrasónico por 5 minutos.
- Determinar la absorbancia de la solución utilizando agua desmineralizada como cero.
- Medir el brix añadiendo muestra de la solución al prisma del refractómetro y anotar en el registro.
- El calculo del color está definido por la formula. Color ICUMSA:  $(1\ 000 \cdot Abs) / (5 \cdot (RDS \cdot Densidad) / 100\ 000)$

### **Análisis de compuestos fenólicos:**

Los compuestos fenólicos totales se determinarán por el método de Folin-Ciocalteu. El reactivo de Folin-Ciocalteu es una mezcla de ácido de coloración amarilla (forfowolfrámico y fosfomolibdico). Estos compuestos se reducen al interaccionar con los compuestos fenólicos, dando origen a óxidos de coloración azul (óxidos de wolframio y molibdeno), los cuales exhiben una amplia absorción de luz, con un máximo a 765 nm. La intensidad de la absorción de luz a esa longitud de onda, es proporcional a la concentración de compuestos fenólicos.

#### Equipo y cristalería:

- Balones aforados de 50 ml. Clase A.
- Pipetas serológicas de 5 ml.
- Tubos de ensayo.
- Espectrofotómetro UV-VIS

#### Reactivos e insumos:

- Ácido cafeico.
- Solución de hidróxido de sodio 2M
- Reactivo de Folin - Ciocalteu
- Agua Destilada

#### Procedimiento:

- Pesar 50 gr de azúcar en un beacker de 250 ml. Y agregar 50 gr de agua destilada.
- Agitar hasta disolver completamente

- Tomar 0,5 ml de solución anterior en un tubo de ensayo y adicionar 0,4 ml del reactivo de Folin, mas 0,8 ml de la solución NaOH 2M. Agitar la solución durante 5 minutos.
- Leer la solución en un espectrofotómetro a 650 nm, utilizando como blanco agua destilada.

Nota:

Los tubos de ensayo deben estar limpios y totalmente secos; de lo contrario se forma un precipitado blanco. Por esta razón el blanco se hace únicamente con agua destilada. También es muy importante hacer la lectura a los cinco minutos, pues después de este tiempo se forma un precipitado, lo que ocasiona lecturas falsas.

### **Elaboración de Curva de Calibración:**

Preparación de solución de ácido cafeico.

Pesar 0,1 gr de ácido caféico y aforar a 100 ml con agua destilada (1 000 mg/L).

A partir de esta primera solución preparar una solución de 100 mg/L tomando 10 mL. de la misma y aforar a 100 mL.

A partir de la segunda solución, preparar soluciones de las siguientes concentraciones en mg/L: 0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11 y 12. Para cada una de las soluciones, tomar 4 ml de cada una y colocar los tubos de ensayo y adicioar 0,4 ml del reactivo de Folin, mas 0,8 ml de la solución de NaOH 2M. Agitar la solución durante 5 minutos.

Leer la solución en un espectrofotómetro a 650nm, utilizando como blanco agua destilada.

Realizar la curva de calibración para obtener el modelo matemático para el cálculo de compuestos fenólicos azúcar.

#### Plan de Análisis de Resultados

Los resultados que se obtendrán en base a la metodología establecida radican en la determinación del color del azúcar y se degradación a través del tiempo, así también como la concentración de compuestos fenólicos iniciales y para el análisis de los resultados se realizaran los pasos siguientes.

- Determinación de color de azúcar blanco:

La determinación de color será realizada por el método de color en soluciones azucaradas a pH 7 de ICUMSA (International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis) utilizando la tabla núm. 7 se determina la cantidad de agua y azúcar a utilizar en el análisis así como la longitud de la cubeta de medición espectrométrica.

Tabla II. **Determinación de peso de agua y azúcar y longitud de la cubeta según color de azúcar esperado**

Alícuotas de azúcar y de agua y Longitud de cubeta para la medición de color.			
ICUMSA Rango de color	Alícuota de azúcar/jarabe G	Alícuota de Agua g	Longitud de Cubeta (b), cm
250-500	50 ± 0,1	50 ± 0,1	2*
250-500	30 ± 0,1	70 ± 0,1	5*
500-2000	30 ± 0,1	70 ± 0,1	1
2000-7000	10 ± 0,1	90 ± 0,1	1
7000-13000	5 ± 0,1	95 ± 0,1	1

NOTA: Puede emplearse un mínimo de 30% w/w. si la filtración al 50% w/w resulta difícil.

Fuente: elaboración propia.



Al obtener datos de Materia seca refractométrica se calcula la densidad de la solución y luego la concentración según la siguiente fórmula:

$$C = \frac{RDS * \rho}{10^5}$$

Donde:

*C* = Concentración de la solución

*RDS* = Materia seca refractométrica (brix)

*p* = Densidad de la solución

Para luego calcular el color con la siguiente fórmula:

$$\text{Color ICUMSA} = \frac{1\,000 * \text{ABS}}{bc}$$

Donde:

ABS = absorbancia de la muestra

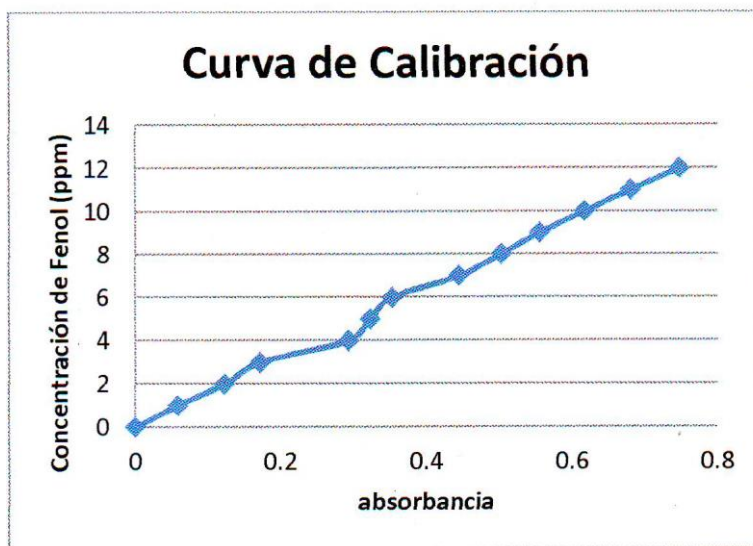
*b* = tamaño de la cubeta en cm.

*c* = concentración de la solución

- Determinación de Curva de Calibración:

La curva de calibración será obtenida en base a la determinación de la absorbancia de soluciones de concentración conocida de ácido Cafeico en un rango de 0-12ppm.

Figura 1. **Curva de calibración**



Fuente: Instituto "Sugar Processing Research Institute", Inc. New Orleans, La 70179, U.S.A.

A partir de dicha curva, se obtendrá un modelo matemático de la forma:

$$y = mx + b$$

Donde:

y = concentración de fenol

m = pendiente

x = absorbancia de la solución

- **Determinación de Compuestos Fenólicos en Azúcar Blanco.**

Con el modelo matemático obtenido de la curva de calibración, se podrá determinar la concentración de compuestos fenólicos en la solución azúcar blanco por medio de la medición de la absorbancia de cada solución a analizar.

La determinación de la concentración total de fenol en jugo se determinará como sigue:

Figura 2. **Fórmula de determinación de la concentración total de fenol en jugo**

$$C_T = C_{AB} * f_d$$

Donde

$C_T$  = concentración total de compuestos fenólicos en jugo de caña

$C_{AB}$  = concentración de compuestos fenólicos en Azúcar blanco.

$f_d$  = factor de dilución del azúcar.

- Error relativo del método Folin-Ciocalteu

El error porcentual relativo del método empleado será determinado por medio de los valores de concentración obtenidos durante la verificación del mismo. El error está dado por:

Figura 3. **Fórmula de error porcentual**

$$E\% = \left| \frac{D_T - D_E}{D_T} \right| * 100$$

Donde:

$E\%$  = error porcentual

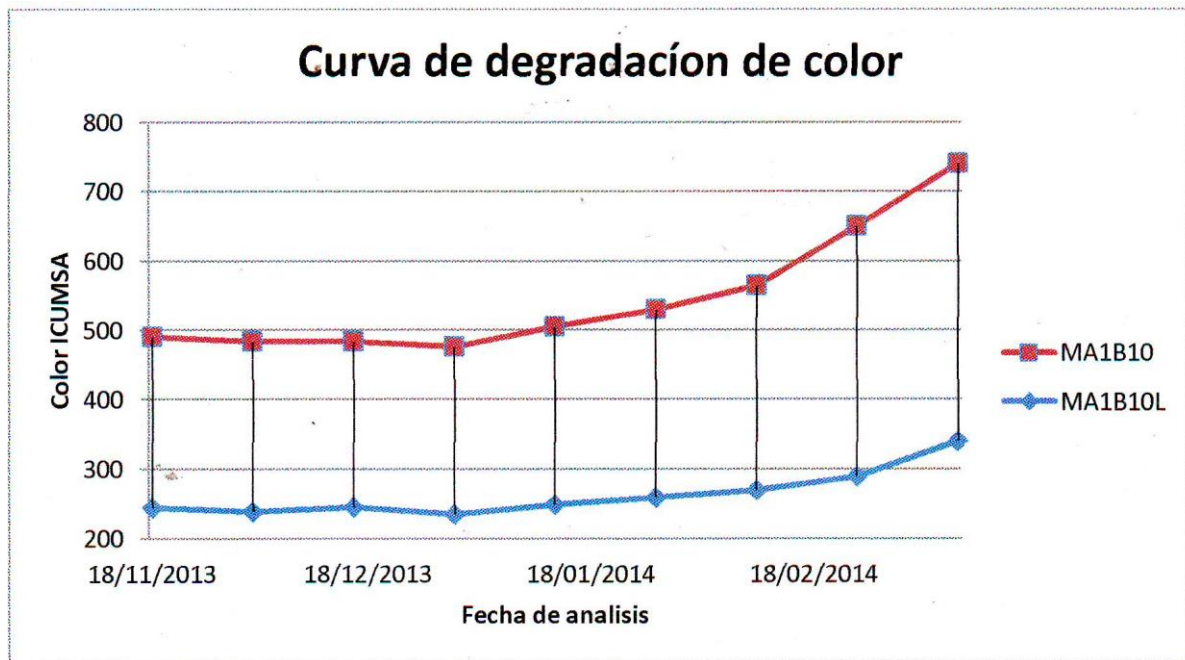
$D_T$  = dato teórico

$D_E$  = dato experimental

- Análisis Gráfico

El cual mostrará la línea de tendencia de la degradación del azúcar a través del tiempo de almacenaje.

Figura 4. Curva de degradación de color



Fuente: elaboración propia.