

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERA DE ALIMENTOS**



**EVALUACIÓN DEL AUMENTO DE COLOR EN AZÚCAR DE  
CAÑA DURANTE EL ALMACENAMIENTO EN BODEGAS  
DE UN INGENIO AZUCARERO**

**PRESENTADO POR:**

**Bárbara Maricela Méndez Cornejo**

**PARA OPTAR AL TITULO DE:**

**INGENIERA QUÍMICO**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, ABRIL 2019**

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR:

**M.Sc. ROGER ARMANDO ARIAS**

SECRETARIO GENERAL:

**M.Sc. CRISTÓBAL HERNÁN RÍOS BENÍTEZ**

**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**

DECANO:

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL**

SECRETARIO:

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS**

DIRECTORA:

**Dra. TANIA TORRES RIVERA**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERA QUÍMICO**

Título:

**EVALUACIÓN DEL AUMENTO DE COLOR EN AZÚCAR DE  
CAÑA DURANTE EL ALMACENAMIENTO EN BODEGAS  
DE UN INGENIO AZUCARERO**

Presentado por:

**Bárbara Maricela Méndez Cornejo**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesora:

Inga. DELMY DEL CARMEN RICO PEÑA

San Salvador, abril 2019

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesora:

**INGA. DELMY DEL CARMEN RICO PEÑA**

## **AGRADECIMIENTOS GENERALES**

Agradezco grandemente a Ingenio El Ángel S.A. de C.V. por haberme permitido realizar esta investigación y dar la facilidad de ejecutar todos los procedimientos requeridos para llevar a cabo y poder culminar este trabajo de graduación.

Doy las gracias principalmente al Ingeniero Enzo Graniello por la confianza al aprobar la realización de este trabajo, a Ingeniera Cony de Pastore por compartir mucho de su conocimiento y dar el espacio y tiempo necesario en la realización de las actividades correspondientes de laboratorio para la elaboración de este trabajo, a Juan Medina por la disponibilidad de su personal para el monitoreo de las muestras en las bodegas de almacenamiento y a todo el personal de laboratorio que de manera directa o indirecta brindaron su colaboración para la ejecución de los análisis de cada uno de los tipos de azúcares monitoreados.

Mi más sincero agradecimiento a todo el personal tanto operativo, administrativo y técnico de dicho ingenio que siempre tuvieron una sonrisa y buena disposición para apoyar cada actividad que se efectuó para poder culminar este trabajo de investigación.

Agradezco a mi asesora de tesis, ingeniera Delmy Rico Peña por ser una de las mejores profesoras de la escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos, por transmitirnos entusiasmo en las materias impartidas y por mostrarnos en las visitas técnicas un poco de la realidad a la que nos enfrentaremos como ingenieros.

En general mis agradecimientos al personal docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador y especialmente al personal de la escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos, por el esfuerzo puesto en cada clase, cada laboratorio y cada discusión, que nos da las bases para desarrollarnos como profesionales en la vida laboral.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por las oportunidades que a lo largo de mi vida ha ido poniendo en mi camino, por todos esos eventos tanto malos como buenos que desde mis primeros años fueron forjando mi carácter, y que con la guía de mis padres se fue modelando de tal manera que me ha permitido llegar a este punto crucial, en el que, gracias a la perseverancia, llego al final de una meta.

Comparto mis más gratos recuerdos de la época de universidad con aquellos amigos con los que inicié los estudios, agradezco a cada uno de esos compañeros y amigos que en todo momento brindaron un apoyo, una casa donde estudiar, una palabra de aliento, una comida compartida, un desvelo de estudio y también en muchas ocasiones momentos simples de risas y complicidad, a Joaquín, Wilson, Manuel y a tantos otros que siempre estuvieron ahí.

Y en esta etapa de vida laboral, no puedo dejar de agradecer el haberme encontrado con personas que en todo momento me han brindado apoyo, palabras de aliento y compartido sus conocimientos, especialmente a Eduardo García que, sin vos, sé que todo esto me habría sido más difícil. Gracias a Chamba, Darío, Arriola, Wanqui, Wendy y en especial a Irving que además de ser mi primo se convirtió en un gran amigo y consejero.

***“Hay hombres que luchan un día y son buenos  
Hay otros que luchan un año y son mejores  
Hay otros que luchan muchos años y son muy buenos  
Pero hay los que luchan toda la vida... Esos son los imprescindibles”  
Bertolt Brecht***

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mis padres Martín Oporto y Marisela Zimmermann, por ser esa piedra angular en mi vida, la que me ha sostenido en todo momento y que me ha enseñado que la educación académica se tiene que complementar con la educación espiritual, emocional y social, esos principios con los que me criaron y el apoyo para el estudio son motivos por los que les estaré eternamente agradecida. A mi hermano, Martín Méndez por ser mi amigo y llenar mis días de luz con su manera de cantar y demostrar su cariño, te quiero mucho hermano. Además, se lo dedico a mi familia en general por brindar todo el cariño y calor de hogar que me ayudó para poder finalizar este camino.

# Resumen

---

Se realizó la evaluación del aumento de color de azúcar de caña (sacarosa) almacenada en las bodegas de un ingenio azucarero en El Salvador, respecto a las condiciones ambientales (Temperatura y Humedad Relativa), que se tienen particularmente en cada bodega; además de las características de construcción de la bodegas; en donde se almacena indistintamente los 4 tipos de azúcar analizadas: azúcar cruda ensacada, azúcar blanca sulfitada, azúcar blanco superior y azúcar refinada. Se analizó el aumento del color del azúcar en un año de almacenaje por tipo de producto en bodega.

La investigación bibliográfica da una guía de cuáles son los aspectos relevantes en la cosecha de la caña de azúcar que influyen en el aumento de color del producto almacenado; desde la naturaleza de la caña de azúcar donde se encuentran sustancias coloreadas que pueden generar color en el producto final, y durante el procesos productivo, la etapa crítica de eliminación de color es la clarificación de jugo, la cual se realiza con la ayuda de la adición de cal ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), que remueve compuestos coloreados de naturaleza insoluble, también se pueden utilizar otro tipo de productos químicos como el ácido fosfórico y el dióxido de azufre, los cuales junto con la cal propician la formación de compuestos como el fosfato tricálcico y el sulfito de calcio, respectivamente, que precipitan fácilmente con la ayuda de floculante. En la evaporación se deben manejar los parámetros indicados para evitar la descomposición de la sacarosa y la transformación de los no-azúcares que continúan presentes. En la cristalización la principal reacción que se puede presentar es la reacción de Maillard, que implica la reacción de aminoácidos y azúcares reductores produciendo melanoidinas, que son compuestos de colores muy oscuros. Durante el almacenamiento el tiempo que el azúcar permanece almacenada es crítico, ya que, junto con las condiciones ambientales y estructurales de las bodegas, se puede incrementar el desarrollo de color en el azúcar. Las condiciones ambientales que deben tenerse según (Rein, 2012) son: temperatura menor de 38°C y humedad relativa menor de 60%.

El color del azúcar al momento de la producción fue tomado como valor de color inicial, para determinar si existe una incidencia de éste en el aumento de color, con las temperaturas y humedad relativa de las bodegas en el almacenamiento. Resultando un comportamiento variable dependiendo del tipo de azúcar que se analizó; los porcentajes de aumento respecto al color inicial fueron: para azúcar blanca sulfitada se alcanzó un 129.22% de aumento con color inicial de 154 UI, para la muestra de la bodega 6, que fue la bodega con mayor temperatura registrada con promedio anual de 31.31°C, para azúcar blanco superior se alcanzó 141.38% para la muestra almacenada en la bodega 6 respecto al color inicial de 29 UI, para azúcar cruda ensacada se alcanzó 101.09% para la muestra almacenada en la bodega 5 respecto al color inicial de 737 UI, y para azúcar refinada se alcanzó el 371.43% para la muestra almacenada en la bodega 5 respecto a su color inicial de 7 UI, la bodega 5 presentó un promedio anual de temperatura de 29.90°C.

Para el azúcar blanco sulfitada, blanca superior y refinada se mantuvo su condición de color dentro del parámetro establecido dentro de la Norma Salvadoreña Obligatoria NSO 67.20.01:03 Azúcares. Especificaciones. La cual establece un máximo de color para azúcar blanca sulfitada de 500 UI y el máximo obtenido fue de 375 UI (B5E5); para azúcar blanco superior de 300 UI y el máximo obtenido fue de 188 UI (B3E1); para azúcar refinada de 80 UI y el máximo obtenido fue de 66 UI, cumpliendo los parámetros establecidos. El azúcar cruda ensacada no está contemplada dentro de la normativa salvadoreña, por lo que sus características de calidad son establecidas por los clientes, para el ingenio en estudio el rango de valores máximos a cumplir son entre 1,500 y 1,800 UI, y el máximo valor de color obtenido fue de 1,884 UI (B4E4) el cual si incumpliría con los parámetros del cliente.

Las características estructurales y ambientales de cada bodega en estudio, demostraron que las condiciones en cada bodega pueden variar a pesar de pertenecer a la misma zona geográfica; en el período de estudio, se obtuvo una diferencia, en promedio de 2.49°C entre la temperatura más baja 28.12°C B4 y la más alta 30.62°C B6, y de 11.99% entre la humedad relativa más baja 57.90% B6 y la más alta 69.89% B4. Pero, aun así, es notoria la misma tendencia en el comportamiento de las condiciones generales del ambiente.

# Índice General

	Pág.
Objetivos .....	1
Introducción .....	2
1.0 Contexto de la caña de azúcar en El Salvador, procesamiento y factores importantes para la fabricación de azúcar.....	3
1.1 Aspectos botánicos de la caña de azúcar .....	3
1.1.1 Morfología de la caña de azúcar .....	4
1.1.2 Siembra, mantenimiento y cosecha del cultivo de la caña de azúcar.....	6
1.2 Estructura molecular y propiedades físicas de la sacarosa .....	7
1.3 Constituyentes de la caña de azúcar .....	8
1.4 La agroindustria azucarera en El Salvador. ....	9
1.5 Color en el azúcar .....	12
1.5.1 Descomposición de la sacarosa en el proceso productivo y su efecto en el desarrollo del color en el azúcar de caña. ....	13
1.5.2 Color y no-azúcares coloreados .....	15
1.5.3 No-azúcares coloreados existentes originalmente en la caña. ....	15
1.5.4 No-azúcares de la caña que pueden desarrollar un color.....	17
1.5.5 No-azúcares coloreados obtenidos de los productos de descomposición del azúcar.....	18
1.5.6 Separación del color durante la fabricación del azúcar de caña.....	21
1.5.7 Desarrollo del color en el cultivo y cosecha de la caña de azúcar .....	25
1.5.8 Desarrollo y separación del color durante el tratamiento de jugo y clarificación .....	28
1.5.9 Evaporación y desarrollo del color en el azúcar.....	30
1.5.10 Cristalización del azúcar y desarrollo de color .....	31
1.5.11 Centrifugación del azúcar.....	32
1.5.12 Almacenamiento del azúcar .....	32
1.5.13 Formación de color en el azúcar en la refinería.....	35
1.5.14 Problemática del aumento de color en azúcar almacenada .....	35
2.0 Desarrollo experimental del monitoreo de color en muestras de azúcar y de condiciones ambientales en bodegas de almacenamiento. ....	38
2.1 Caracterización estructural de las bodegas en estudio utilizadas para almacenamiento de azúcar.....	38
2.1.1 Caracterización física de la BODEGA 3 .....	40

	Pág.
2.1.2 Caracterización física de la BODEGA 4 .....	42
2.1.3 Caracterización física de la BODEGA 5 .....	43
2.1.4 Caracterización física de la BODEGA 6 .....	46
2.2 Enfoque metodológico de la investigación para la evaluación del color en azúcar durante su almacenamiento. ....	49
2.2.1 Aplicación de un muestreo probabilístico aleatorio – estratificado, para el estudio realizado.....	50
2.3 Fase experimental .....	52
2.3.1 Monitoreo de variables ambientales en bodegas de azúcar en estudio .....	52
2.3.2 Caracterización de condiciones ambientales de bodegas de almacenamiento de azúcar.....	52
2.3.3 Monitoreo de muestras de azúcar en el ingenio en estudio .....	55
3.0 Análisis de resultados del aumento de color en azúcar almacenada en bodegas .....	62
3.1 Resultados de azúcar cruda ensacada.....	63
3.2 Resultados de azúcar blanca sulfitada .....	69
3.2.1 <i>Resultados obtenidos en azúcar blanca sulfitada almacenada en bodega 4.....</i>	<i>69</i>
3.2.2 <i>Resultados obtenidos en azúcar blanca sulfitada almacenada en bodega 5.....</i>	<i>74</i>
3.2.3 <i>Resultados obtenidos en azúcar blanca sulfitada almacenada en bodega 6.....</i>	<i>78</i>
3.3 Resultados de azúcar producida en refinería.....	82
3.3.1 <i>Resultados obtenidos en azúcar blanco superior almacenada en bodega 3 y almacenada en bodega 6 .....</i>	<i>82</i>
3.3.2 <i>Resultados obtenidos en azúcar refinada almacenada en bodega 5 y bodega 6. ....</i>	<i>88</i>
3.4 Análisis estadístico (ANOVA) para las diferencias de cambios de color de azúcar almacenada en bodegas. ....	94
3.4.1 Análisis de correlación entre color de azúcar y tiempo de almacenaje.....	99
Referencias Bibliográficas .....	109
ANEXOS .....	111
Anexo A – Planos de ubicación y distribución de bodegas del ingenio en estudio .....	112
Anexo B – Repetibilidad y Reproducibilidad del análisis de color para muestras de azúcar crudo y azúcar Blanca y Refinada (ICUMSA, 2015).....	115

## Índice de Figuras

<u>Figura</u>	Pág.
Figura 1.1	7
Figura 1.2	25
Figura 1.3	33
Figura 2.1	40
Figura 2.2	41
Figura 2.3	41
Figura 2.4	42
Figura 2.5	43
Figura 2.6	45
Figura 2.7	45
Figura 2.8	46
Figura 2.9	47
Figura 2.10	48
Figura 2.11	48
Figura 2.12	55
Figura 2.13	55
Figura 2.14	57
Figura 2.15	57
Figura 2.16	58
Figura 3.1	66
Figura 3.2	66

<u>Figura</u>	Pág.
Figura 3.3	Gráfico obtenido para aumento de color (UI) en azúcar cruda ensacada en el tiempo y humedad relativa (%) promedio en Bodega 4..... 68
Figura 3.4	Gráfico obtenido para aumento de color (UI) en azúcar cruda ensacada en el tiempo y humedad relativa (%) promedio en Bodega 5..... 69
Figura 3.5	Gráfico obtenido para aumento de color (UI) en azúcar blanca sulfitada en el tiempo y temperatura (°C) promedio en Bodega 4. .... 72
Figura 3.6	Gráfico obtenido para aumento de color (UI) en azúcar blanca sulfitada en el tiempo y humedad relativa (%) promedio en Bodega 4..... 73
Figura 3.7	Gráfico obtenido para aumento de color (UI) en azúcar blanca sulfitada en el tiempo y temperatura (°C) promedio en Bodega 5. .... 76
Figura 3.8	Gráfico obtenido para aumento de color (UI) en azúcar blanca sulfitada en el tiempo y humedad relativa (%) promedio en Bodega 5..... 77
Figura 3.9	Gráfico obtenido para aumento de color (UI) en azúcar blanca sulfitada en el tiempo y temperatura (°C) promedio en Bodega 6. .... 80
Figura 3.10	Gráfico obtenido para aumento de color (UI) en azúcar blanca sulfitada en el tiempo y humedad relativa (%) promedio en Bodega 6..... 81
Figura 3.11	Gráfico obtenido para aumento de color (UI) en azúcar blanca superior en el tiempo y temperatura (°C) promedio en Bodega 3. .... 85
Figura 3.12	Gráfico obtenido para aumento de color (UI) en azúcar blanca superior en el tiempo y temperatura (°C) promedio en Bodega 6. .... 85
Figura 3.13	Gráfico obtenido para aumento de color (UI) en azúcar blanca superior en el tiempo y humedad relativa (%) promedio en Bodega 3..... 87
Figura 3.14	Gráfico obtenido para aumento de color (UI) en azúcar blanca superior en el tiempo y humedad relativa (%) promedio en Bodega 6..... 88
Figura 3.15	Gráfico obtenido para aumento de color (UI) en azúcar refinada en el tiempo y temperatura (°C) promedio en Bodega 5. .... 91
Figura 3.16	Gráfico obtenido para aumento de color (UI) en azúcar refinada en el tiempo y temperatura (°C) promedio en Bodega 6. .... 91
Figura 3.17	Gráfico obtenido para aumento de color (UI) en azúcar refinada en el tiempo y humedad relativa (%) promedio en Bodega 5..... 93
Figura 3.18	Gráfico obtenido para aumento de color (UI) en azúcar refinada en el tiempo y humedad relativa (%) promedio en Bodega 6..... 94

## Índice de Tablas

<u>Tabla</u>	Pág.
Tabla 1.1	8
<i>Composición típica de la caña (en kg/100kg de caña) entregada a fábricas de azúcar en diferentes países (Rein, 2012).</i>	
Tabla 1.2	11
<i>Tipos de Azúcar de caña producidas en El Salvador y sus factores de calidad (CONACYT, 2003).</i>	
Tabla 1.3	18
<i>Composición de los No-Azúcares en el jugo crudo de caña de azúcar (Honig, 1969).</i>	
Tabla 1.4	20
<i>Características de diferentes grupos de colorantes en el proceso de fabricación de azúcar (Rein, 2012).</i>	
Tabla 1.5	27
<i>Color observado en Jugo Mezclado, Jugo Clarificado y Meladura para diferentes tipos de corte de Caña de Azúcar (Larrahondo J. E., 1995).</i>	
Tabla 1.6	36
<i>Máximo valor permitido de color para la comercialización de los diferentes tipos de azúcares producidos en El Salvador, establecidos por la NSO 67.20.01:03.</i>	
Tabla 2.1	43
<i>Tabla comparativa de características estructurales entre bodega 3 y bodega 4</i>	
Tabla 2.2	49
<i>Tabla comparativa de características estructurales entre bodega 5 y bodega 6</i>	
Tabla 2.3	51
<i>Tamaño de muestra a partir de las proporciones de los tipos de azúcar almacenada y cantidad de muestras almacenadas por bodega.</i>	
Tabla 2.4	53
<i>Temperaturas mensuales promedio monitoreadas en bodegas de almacenamiento de azúcar.</i>	
Tabla 2.5	54
<i>Humedades relativas mensuales promedio monitoreadas en bodegas de almacenamiento de azúcar.</i>	
Tabla 3.1	64
<i>Datos experimentales de aumento de color (UI) en el tiempo para azúcar cruda ensacada y monitoreo de temperatura en Bodega 4.</i>	
Tabla 3.2	64
<i>Datos experimentales de aumento de color (UI) en el tiempo para azúcar cruda ensacada y monitoreo de temperatura en Bodega 5.</i>	
Tabla 3.3	65
<i>Diferencias de aumento de color respecto a cada toma de muestra consecutiva, promedios parciales de aumento, y promedio general de aumento para cada muestra de azúcar cruda ensacada.</i>	
Tabla 3.4	67
<i>Datos experimentales de color (UI) en azúcar cruda ensacada y monitoreo de humedad relativa (%) en Bodega 4.</i>	
Tabla 3.5	68
<i>Datos experimentales de aumento de color (UI) en el tiempo para azúcar cruda ensacada y monitoreo de humedad relativa (%) en Bodega 5.</i>	
Tabla 3.6	70
<i>Datos experimentales de aumento de color (UI) en el tiempo para azúcar blanca sulfitada y monitoreo de temperatura (°C) en Bodega 4.</i>	

<u>Tabla</u>	Pág.
Tabla 3.7	71
<i>Diferencia del aumento de color respecto a cada toma de muestra consecutiva, promedios parciales de aumento, y promedio general de aumento para cada muestra de azúcar blanca sulfitada almacenada en Bodega 4. ....</i>	
Tabla 3.8	73
<i>Datos experimentales de aumento de color (UI) en el tiempo para azúcar blanca sulfitada y monitoreo de humedad relativa (%) en Bodega 4. ....</i>	
Tabla 3.9	74
<i>Datos experimentales de aumento de color (UI) en el tiempo para azúcar blanca sulfitada y monitoreo de temperatura (°C) en Bodega 5. ....</i>	
Tabla 3.10	75
<i>Diferencias del aumento de color respecto a cada toma de muestra consecutiva, promedios parciales de aumento, y promedio general de aumento para cada muestra de azúcar blanca sulfitada almacenada en Bodega 5. ....</i>	
Tabla 3.11	77
<i>Datos experimentales de aumento de color (UI) en el tiempo para azúcar blanca sulfitada y monitoreo de humedad relativa (%) en Bodega 5. ....</i>	
Tabla 3.12	78
<i>Datos experimentales de aumento de color (UI) en el tiempo para azúcar blanca sulfitada y monitoreo de temperatura (°C) en Bodega 6. ....</i>	
Tabla 3.13	79
<i>Diferencias del aumento de color respecto a cada toma de muestra consecutiva, promedios parciales de aumento, y promedio general de aumento para cada muestra de azúcar blanca sulfitada almacenada en Bodega 6. ....</i>	
Tabla 3.14	81
<i>Datos experimentales de aumento de color (UI) en el tiempo para azúcar blanca sulfitada y monitoreo de humedad relativa (%) en Bodega 6. ....</i>	
Tabla 3.15	83
<i>Datos experimentales de aumento de color (UI) en el tiempo para azúcar blanca superior y monitoreo de temperatura (°C) en Bodega 3. ....</i>	
Tabla 3.16	83
<i>Datos experimentales de aumento de color (UI) en el tiempo para azúcar blanca superior y monitoreo de temperatura (°C) en Bodega 6. ....</i>	
Tabla 3.17	84
<i>Diferencias del aumento de color respecto a cada toma de muestra consecutiva, promedios parciales de aumento, y promedio general de aumento para cada muestra de azúcar blanca superior almacenada en bodega en bodegas. ....</i>	
Tabla 3.18	86
<i>Datos experimentales de aumento de color (UI) en el tiempo para azúcar blanca superior y monitoreo de humedad relativa (%) en Bodega 3. ....</i>	
Tabla 3.19	87
<i>Datos experimentales de aumento de color (UI) en el tiempo para azúcar blanca superior y monitoreo de humedad relativa (%) en Bodega 6. ....</i>	
Tabla 3.20	89
<i>Datos experimentales de aumento de color (UI) en el tiempo para azúcar refinada y monitoreo de temperatura (°C) en Bodega 5. ....</i>	
Tabla 3.21	89
<i>Datos experimentales de aumento de color (UI) en el tiempo para azúcar refinada y monitoreo de temperatura (°C) en Bodega 6. ....</i>	

<u>Tabla</u>	Pág.	
<i>Tabla 3.22</i>	<i>Diferencias del aumento de color respecto a cada toma de muestra consecutiva, promedios parciales de aumento, y promedio general de aumento para cada muestra de azúcar refinada almacenada en Bodega 6.....</i>	90
<i>Tabla 3.23</i>	<i>Datos experimentales de aumento de color (UI) en el tiempo para azúcar refinada y monitoreo de humedad relativa (%) en Bodega 5.....</i>	92
<i>Tabla 3.24</i>	<i>Datos experimentales de aumento de color (UI) en el tiempo para azúcar refinada y monitoreo de humedad relativa (%) en Bodega 6.....</i>	93
<i>Tabla 3.25</i>	<i>ANOVA para muestras de azúcar cruda ensacada Bodega 4 (B4) y Bodega 5 (B5). .....</i>	95
<i>Tabla 3.26</i>	<i>ANOVA para muestras de azúcar blanca sulfitada Bodega 4 (B4), Bodega 5 (B5) y Bodega 6 (B6). .....</i>	96
<i>Tabla 3.27</i>	<i>ANOVA para muestras de azúcar blanco superior Bodega 3 (B3) y Bodega 6 (B6). .....</i>	97
<i>Tabla 3.28</i>	<i>ANOVA para muestras de azúcar refinada Bodega 5 (B5) y Bodega 6 (B6). .....</i>	98
<i>Tabla 3.29</i>	<i>Correlación de Pearson para azúcar cruda ensacada-tiempo de almacenaje.....</i>	99
<i>Tabla 3.30</i>	<i>Correlación de Pearson para azúcar blanca sulfitada Bodega 4 (B4) - tiempo de almacenaje .....</i>	99
<i>Tabla 3.31</i>	<i>Correlación de Pearson para azúcar blanca sulfitada Bodega 5 (B5) - tiempo de almacenaje .....</i>	100
<i>Tabla 3.32</i>	<i>Correlación de Pearson para azúcar blanca sulfitada Bodega 6 (B6) - tiempo de almacenaje .....</i>	100
<i>Tabla 3.33</i>	<i>Correlación de Pearson para azúcar blanco superior -tiempo de almacenaje .....</i>	100
<i>Tabla 3.34</i>	<i>Correlación de Pearson para azúcar refinada -tiempo de almacenaje.....</i>	100

# Objetivos

---

## *OBJETIVO GENERAL*

Evaluar el aumento de color en azúcar durante el periodo de almacenamiento en bodegas, por efecto de condiciones de almacenaje.

## *OBJETIVOS ESPECÍFICOS*

1. Caracterizar estructural y ambientalmente cada una de las bodegas donde es almacenada azúcar empacada en un Ingenio azucarero.
2. Identificar los posibles factores del proceso que pueden afectar el color final del azúcar obtenida.
3. Analizar los colores de producción del azúcar en estudio, respecto al incremento de color obtenido durante el periodo de almacenamiento y determinar su incidencia en el incremento de color.
4. Establecer posibles mejoras en el almacenamiento del azúcar en bodegas del ingenio en estudio, como medida de control para minimizar el aumento en el color del azúcar en el tiempo.

# Introducción

---

La agroindustria azucarera en El Salvador es un rubro que tiene mucho aporte a la economía del país, dado que el azúcar que se fabrica en los ingenios azucareros no solo es para el consumo de la población y uso industrial de manera nacional, sino que aproximadamente el 62% de la producción es exportado a mercados internacionales.

Las fábricas de los ingenios es donde se procesa jugo de caña para cristalizar sacarosa y producir lo que comercialmente se le conoce como azúcar, y las refinerías adjuntas a los ingenios es donde se procesa sacarosa ya cristalizada para producir azúcar de mayor pureza y mejor calidad; para ambos tipos de producciones se establecen parámetros de calidad para el azúcar con el propósito de dar cumplimiento a normativas nacionales y a contratos establecidos por clientes nacionales e internacionales. Dentro de los parámetros que se manejan está el color del azúcar, importante por ser un parámetro que, a través del tiempo, producto de las condiciones ambientales donde se encuentre almacenada el azúcar y de reacciones químicas, va aumentando; lo que genera una oportunidad de mejora para poder dar cumplimiento a los colores requeridos.

La evaluación del aumento de color en azúcar de caña almacenada en bodegas realizada abona a los conocimientos empíricos y bibliográficos previos, de la degradación que sufre el azúcar al estar expuesta a determinadas condiciones ambientales, con los antecedentes de las causas que generan color en el azúcar desde el campo, en la caña de azúcar, pasando por cada etapa del proceso en fábrica y en general por el proceso de refinería. Las reacciones no deseadas, el contenido de compuestos, pigmentos y componentes que añaden color al azúcar, se pueden reducir o evitar, controlando cada una de las etapas del proceso productivo.

## 1.0 Contexto de la caña de azúcar en El Salvador, procesamiento y factores importantes para la fabricación de azúcar.

En esta sección se abordará la información general, desde la caña de azúcar como materia prima para la fabricación de los productos en investigación, además de información general y técnica de esta herbácea, información del proceso productivo del azúcar y la agroindustria azucarera. Con ello se pretende formar un contenido que brinde una idea básica de lo que es la caña de azúcar, el contexto en El Salvador y generalidades del producto terminado.

### 1.1 Aspectos botánicos de la caña de azúcar

Caña de azúcar, es el nombre común de estas especies de herbáceas, de tallo leñoso del género *Saccharum*, de la familia de las gramíneas (*Gramineae*), originaria de la Melanesia y cuya especie fundamental es *Saccharum officinarum*. La caña de azúcar se cultiva mucho en países tropicales y subtropicales de todo el mundo por el azúcar que contiene en los tallos. La caña crece entre los 3 y 6 m de altura y entre 2 y 5 cm de diámetro. La sacarosa ( $C_{12}H_{22}O_{11}$ ) es el más abundante de los azúcares presentes en la savia de las plantas y en la caña de azúcar es sintetizada gracias a la energía tomada del sol durante la fotosíntesis con hojas que llegan a alcanzar de dos a cuatro metros de longitud. Es en el tallo donde se acumula el jugo, que supera el 17% de sacarosa, aunque este porcentaje depende del estado de madurez y de la variedad de la caña de azúcar (Cultivo de la caña de azúcar, 2018); para el ingenio en estudio se tiene un promedio para los años del 2014 al 2017 de 17.65% de sacarosa en jugo.

En las plantas los carbohidratos se forman por un proceso fotosintético de asimilación. En primer lugar, se forman ácidos fosfoglicéricos, fosfatos triosos y fosfatos hexosos, y la sacarosa es el primer carbohidrato libre en la planta. Esta formación ocurre en las partes verdes de la planta, pero la sacarosa se encuentra también en los tallos, en las raíces y en los frutos. La sacarosa del jugo al ser extraída y cristalizada en el ingenio forma el azúcar (EcuRed, 2018).

### 1.1.1 Morfología de la caña de azúcar

#### a. Raíz

La caña es distinguida por tener dos diferentes raíces. Las raíces primordiales, son raíces que forman parte de la estaca original de siembra, usualmente son delgadas y ramificadas, la vida de estas llega hasta los tres meses. Y las raíces permanentes, que forman parte de los anillos permanentes de crecimiento de nuevos brotes, son más gruesas y numerosas. La longitud y cantidad de raíces difieren por la edad, la variedad y por las diferentes condiciones del suelo y la humedad.

#### b. Tallo

Es uno de los órganos más importantes de toda planta, y en particular para la caña, ya que es el lugar donde almacena la mayor parte de sus azúcares, el número, diámetro, color y hábito de desarrollo va a depender de la variedad. La longitud de los tallos varía según las condiciones del terreno, el clima, etc. Los tallos tienen tres tipos, primarios, secundarios o terciarios. El tallo de la caña, propiamente dicho, se encuentra formado por canutos que, a su vez, se componen de los nudos y el entrenudo.

- i. *Nudo*: es una de las porciones más duras de la planta y también es la más fibrosas. Puede estar conformado por anillos de crecimiento, banda de raíces y la cicatriz foliar, el nudo, el anillo ceroso y la yema. La yema es muy diferente para cada variedad y es muy usada en su identificación.
- ii. *Entrenudo*: es la porción del tallo que se localiza entre dos nudos. El diámetro, color y la forma, dependen de la variedad de caña de azúcar. Aunque el color puede cambiar por las condiciones medioambientales. El entrenudo puede alcanzar diferentes tamaños y formas, la tendencia de adquirir una longitud determinada está asociada al periodo de crecimiento, y éste, a su vez, se encuentra definido tanto por las características de la variedad como por los factores del ambiente en el cual se desarrolle.

Los tallos de las diferentes variedades de caña de azúcar pueden presentar una gran diversidad de colores. El color de un tallo depende en gran medida de las

condiciones en las cuales se desarrolla, ya que el color propio puede ser modificado por el ambiente, principalmente por la luz solar. La altitud y el clima, en general, son factores que pueden hacer cambiar el color de una variedad. La gama de colores que presentan los tallos de la caña se debe a dos pigmentos básicos y a sus combinaciones y mezclas: el color rojo y sus diversos matices se deben al pigmento antocianina, contenido en las células epidérmicas del tallo, mientras que el color verde es provocado por la clorofila, contenida en los tejidos más profundos del tallo.

#### *c. Hoja*

Las hojas de la caña de azúcar brotan de los nudos del tallo. A medida que las hojas envejecen, se van separando del eje del tallo y toman la posición inclinada que las caracteriza. El ancho y largo de la hoja son características que también dependen de la especie a la que pertenezca. La hoja consta de dos partes fundamentales:

*La vaina:* es generalmente de un color verde claro. En los tallos muy jóvenes y hacia el ápice, las vainas se superponen, lo que garantiza una protección a las yemas jóvenes allí ubicadas.

*La lámina:* su color varía desde un verde amarillento hasta un verde muy oscuro, es de forma tubular y cónica hacia el cuello. En ella pueden apreciarse dos caras: una interior generalmente blanquecina y lisa, y otra exterior de color verde, que con frecuencia presenta abundantes vellos que hacen desagradable su manipulación.

#### *d. Flor*

Forma espigas florales pequeñas agrupadas y rodeadas por largas fibras sedosas. Se puede decir que el periodo de floración se produce cuando la condición ambiental de fotoperiodo, disponibilidad y temperatura, junto a los niveles de nutrientes son favorables para la planta. El ciclo vegetativo de la planta varía según el clima y la variedad, este tiene etapas diferentes: la germinación, el macollamiento que es cuando aumenta el número de brotes o tallitos por cada cepa, el crecimiento y la maduración, que es cuando la planta da paso a la acumulación de carbohidratos en forma de sacarosa en el tallo, la floración ocurre entre el proceso de crecimiento y maduración.

### **1.1.2 Siembra, mantenimiento y cosecha del cultivo de la caña de azúcar**

La siembra se realiza con trozos de tallo, normalmente se hace de Este a Oeste para lograr una mayor captación de luz solar. El material de siembra debe ser de preferencia cultivos sanos, con una edad de seis a nueve meses, se recomienda utilizar la parte media del tallo. La profundidad de siembra oscila entre 20 a 25 cm, con una distancia entre surco de 1.30 a 1.50 m. La semilla debe de quedar cubierta con 5 cm de suelo.

En lo que respecta al mantenimiento del cultivo, es variado dependiendo del lugar de siembra, pero en general se puede señalar cuidados básicos que se tienen en cuenta, como el control de plagas y maleza que pudiera presentar en algún momento la plantación, el riego en la época seca, y la aplicación de madurantes para aumentar la concentración de sacarosa en el tallo de la caña.

La cosecha se lleva a cabo entre los once y los dieciséis meses de la plantación, es decir, cuando los tallos dejan de desarrollarse, las hojas se marchitan y caen y la corteza de la capa se vuelve quebradiza. Con la aplicación de madurante, la cosecha se puede llevar a cabo hasta a los 7 u 8 meses (EcuRed, 2018). La cosecha se puede realizar de diferentes formas: cosecha con quema, que se realiza para eliminar las malezas que impiden el corte de la Caña. Según datos obtenidos del Consejo Salvadoreño de la Agroindustria Azucarera (CONSAA), en El Salvador aún más del 90% de la cosecha de la caña de azúcar se sigue haciendo con quema. El instrumento usado para cortarla suele ser un machete grande que cuenta con un pequeño gancho en la parte posterior y empuñadura de madera. La Caña se abate cerca del suelo y se corta por el extremo superior, cerca del último nudo maduro, ya cortadas se apilan a lo largo del campo, de donde se recogen a mano o a máquina para su transporte al Ingenio. También existe la cosecha en verde, que es cuando no se quema la caña, normalmente este tipo de cosecha se realiza con máquinas cosechadoras, la maquina cosechadora se encarga de cortar la caña en pequeños trozos, por lo que suele llamarse también “caña corta”, además puede llevarse a cabo la cosecha en verde de manera manual.

La caña de azúcar, luego de su cosecha en el campo, se transporta distintos tipos de cargadores y vehículos, en El Salvador el transporte más común es en camiones

de entre 20 y 40 TC. Cada uno de los camiones de carga puede estar designado para transportar dependiendo del modo en se cosechó, caña corta o caña larga, proveyendo al ingenio de la cantidad y tipo de caña que se requiere para la correcta operación de los molinos.

Existen varios tipos de descarga en los ingenios, para caña corta, el sistema de volteadores es el más común, los cuales pueden descargar su contenido por la puerta trasera, luego de subirse sobre una plataforma la cual se inclina entre 45 – 55° haciendo caer por gravedad los trozos de caña hacia el conductor alimentador. Para la caña larga, la descarga se hace por medio de grúa de hilo, estos emplean una malla de cadenas o varias cadenas individuales que cubren la superficie del tráiler al ser cargado, las cadenas están fijadas a un lado del camión, mientras que en el otro extremo están ligadas a una viga de acero que tiene la misma longitud del remolque. El arreglo se dispone que una grúa pueda levantar esta viga, descargando la caña sobre una mesa alimentadora (Rein, 2012)

## 1.2 Estructura molecular y propiedades físicas de la sacarosa

El azúcar, es un carbohidrato de formula general  $C_{12}H_{22}O_{11}$ , es un disacárido que consiste en dos compuestos monosacáridos: D-glucosa y D-fructosa.

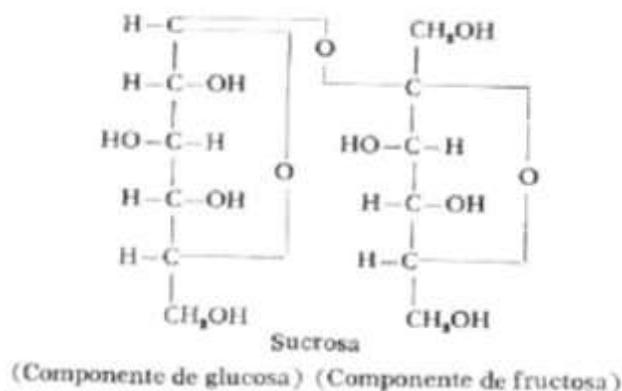


Figura 1.1 Estructura de la Sacarosa (Honig, 1969)

El peso molecular de la sacarosa es 342.296. Los cristales de sacarosa en el sistema monoclinico forman cristales monoclinicos hemimorficos y tienen un habito prismático. Las impurezas tienen una influencia notable en la forma y el habito de los cristales. El calor especifico de la sacarosa a 20°C es  $C_p = 0.290$  calorías por gramo. La densidad de la sacarosa a 15°C es de 1.5879 g por ml. En cuanto a la

solubilidad, la sacarosa es muy soluble en agua y es directamente proporcional con la temperatura.

El azúcar comercial se obtiene del jugo extraído de la caña de azúcar o de la remolacha, purificando este jugo por medios químicos y físicos, evaporando luego el agua y separando los cristales de azúcar. La sacarosa pura, para investigaciones científicas que tengan que ser muy exactas, se prepara re disolviendo en agua el mejor azúcar comercial, precipitándolo con alcohol etílico absoluto y repitiendo este proceso (Honig, 1969).

### 1.3 Constituyentes de la caña de azúcar

El tronco de la caña de azúcar está compuesto por una parte sólida llamada fibra y una parte líquida, el jugo, que contiene principalmente agua y sacarosa, pero que puede contener también otro tipo de sustancias orgánicas e inorgánicas. Las proporciones de los componentes varían de acuerdo con la variedad (familia) de la caña, edad, madurez, clima, suelo, método de cultivo y cosecha, abonos, lluvias, riegos, etc. Además, al momento de ser entregada a la fábrica, se toman en cuenta otros factores importantes como la cantidad de hojas, cogollos, la materia extraña que la acompañan; la tardanza entre quema, corte y la entrega en fábrica. Cifras típicas promedio para algunas de las principales áreas de cultivo de caña se presenta en la Tabla 1.1, se aprecia que para pureza, fibra y humedad El Salvador presenta datos por debajo de los demás países descritos en la tabla, mientras que, para el Brix, se tienen datos mayores.

*Tabla 1.1 Composición típica de la caña (en kg/100kg de caña) entregada a fábricas de azúcar en diferentes países (Rein, 2012).*

	Brasil	Australia	Sudáfrica	Colombia	Filipinas	Mauricio	Luisiana	El Salvador*
<b>Pol</b>	14	14.6	12.8	13.2	10	12	14	14 – 15
<b>Brix</b>	16.2	16.4	15	15	12.5	13.8	16	17.8 – 18.4
<b>Pureza aparente en %</b>	86	89	85	88	80	87	85	80.5 – 82.6
<b>Humedad</b>	70.5	69.3	70	70	72.5	71.2	71	67.1 – 70.7
<b>Fibra</b>	13.3	14.3	15	15	15	15	13	11 – 12

\* Rangos tomados del ingenio en estudio, para los años 2012 al 2018.

#### 1.4 La agroindustria azucarera en El Salvador.

En El Salvador el sector azucarero genera 47,968 empleos directos, 187,251 empleos indirectos y genera 186.5 millones de dólares como aportes económicos. El cultivo de caña y la producción de azúcar representan el 2.28% del producto interno bruto del país (PIB) y la participación del cultivo de caña de azúcar representa casi el 20% del producto interno bruto agrícola (PIBA). En la actualidad esta industria está conformada por aproximadamente 7,000 productores de caña y 6 centrales azucareras, además de otras entidades que dan apoyo como la asociación azucarera de El Salvador y otras constituyen el sector legal de la industria, como el Consejo Salvadoreño de la Agroindustria Azucarera, CONSAA, que fue creado en el 2001, como un organismo estatal con autonomía administrativa, con la intención de ser la máxima autoridad para la aplicación de: la “LEY DE LA PRODUCCIÓN, INDUSTRIALIZACIÓN Y COMERCIALIZACIÓN DE LA AGROINDUSTRIA AZUCARERA DE EL SALVADOR” que: “tiene como objeto normar las relaciones entre centrales azucareras o ingenios, y las de éstos con los productores de caña de azúcar, garantizándoles justicia, racionalidad y transparencia en las actividades siguientes: siembra, cultivo y cosecha de la caña de azúcar; y producción, autoconsumo industrial y comercialización de azúcar y miel final; propiciando su ordenamiento y desarrollo sostenible para la prosperidad de la nación y de los diferentes actores de la Agroindustria Azucarera Salvadoreña.” (Art.1 Ley de la producción, industrialización y comercialización de la agroindustria azucarera de El Salvador, 2001); produciendo alrededor de 760,000 toneladas métricas de azúcar por periodo de zafra, el cual dura aproximadamente entre 4 – 5 meses del año, el azúcar producida es de diferentes calidades, entre estas se encuentra el azúcar cruda, el azúcar blanca sulfitada; y para las centrales azucareras que tienen refinería producen también azúcar refinada en al menos dos diferentes calidades que son, el azúcar blanco superior y el azúcar refinada.

Gracias a esta ley, la agroindustria azucarera en El Salvador es llevada de manera ordenada y permite una organización mayor en todos sus ámbitos, pero principalmente en la producción del azúcar, ya que como se establece en el artículo 19 de esta Ley, la forma en que se determina el porcentaje de la estimación de la demanda

de azúcar asignada a cada central azucarera o ingenio para los mercados interno y preferencial, será la dispuesta en el “Reglamento de Distribución de Asignaciones Anuales de Azúcar para los Mercados Interno, Preferencial y Mundial”; por lo que cada central azucarera o ingenio, tiene una cuota establecida quinquenalmente que, aunque puede tener sus modificaciones de acuerdo a ciertas condiciones especiales que el reglamento permite, en buena parte no significa un cambio en lo que cada ingenio debe producir para cubrir su cuota a cabalidad.

Las cuotas que cada ingenio debe cubrir se encuentran identificadas por el tipo de mercado y la calidad de azúcar designada para cada mercado.

Los tipos de mercados que se manejan en El Salvador son tres: el Mercado Interno, referente a la venta de azúcar y miel final en el territorio nacional. El Mercado Preferencial, referente a la venta de azúcar y miel final, de conformidad con las cuotas asignadas a la República de El Salvador en condiciones preferenciales, como consecuencia de tratados o convenios internacionales. El Mercado Mundial, referente a la venta de azúcar y miel final en otros países bajo condiciones no preferenciales.

Las calidades de azúcar producidas por un ingenio azucarero pueden variar dependiendo del tipo de operaciones con las que cuentan cada uno, produciendo esencialmente azúcar cruda y/o azúcar blanca sulfitada, y en el caso de los ingenios que cuentan con refinería anexa, como es en el caso del ingenio en estudio del presente trabajo, se produce también calidad de azúcar refinada y azúcar blanco superior.

Para cada calidad de azúcar que se producen en los ingenios en El Salvador, se han establecido, dentro de un marco normativo, cuáles son los parámetros de calidad que debe cumplir el producto final, para su comercialización adecuada en el mercado nacional.

La Norma Salvadoreña Obligatoria NSO 67.20.01:03, Azúcares. Especificaciones. Establece las características físicas, químicas y especificaciones nutricionales que debe cumplir el azúcar. Esta norma es aplicable a toda azúcar que sea consumida en El Salvador, sea cual sea su tipo; ya sea de producción nacional, importación comercial o donación, para consumo directo o indirecto.

Los tipos de azúcar, composición y factores esenciales de calidad que se detallan en la norma son: Polarización, Azúcar Invertido, Ceniza por conductividad, Humedad y Color con Vitamina “A”, para todos los tipos de azúcar; y además para el azúcar Blanca y Blanca Superior, se detalla Dióxido de Azufre.

En la Tabla 1.2 se detallan los tipos de azúcar que son producidos en el ingenio en estudio, con los respectivos valores de los factores de calidad que están establecidos en la Norma Salvadoreña Obligatoria NSO67.20.01:03, con excepción del Azúcar Cruda Ensacada y el Azúcar Refinada de Exportación para los cuales se detallan valores según parámetros internos del ingenio en estudio, esto debido a que dichos productos no están contemplados como tal en la norma.

*Tabla 1.2 Tipos de Azúcar de caña producidas en El Salvador y sus factores de calidad (CONACYT, 2003).*

Tipos de Azúcar						
Factor de Calidad	FABRICA			REFINERIA		
	Azúcar Blanca	Azúcar Cruda (granel)	Azúcar Cruda Ensacada	Azúcar Refinada	Azúcar Blanca Superior	Azúcar Refinada Exportación
Polarización (°Z)	99.50	96.00	98.00	99.70	99.60	99.80
Azúcar Invertido (%)	0.10	1.00	1.00	0.04	0.10	0.02
Ceniza por Conductividad (%)	0.10	0.30	0.20	0.04	0.10	0.02
Humedad (%)	0.10	1.00	0.20	0.10	0.10	0.03
Color con Vitamina “A” (UI)	500	6000	1200	80	300	45
Dióxido de Azufre (mg/kg)	70	-	-	-	70	-

En la industria azucarera a nivel mundial, es reconocida la Comisión Internacional de Estandarización de Métodos de Análisis de Azúcar, ICUMSA por sus siglas en inglés (International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis) que es un organismo internacional fundado en 1897, el cual publica procedimientos de laboratorio detallados para el análisis del azúcar de caña y de productos azucarados del proceso y azúcar de remolacha. El libro de métodos de ICUMSA (2015) contiene

instrucciones detalladas para realizar diferentes tipos de análisis, entre éstos se encuentran los métodos para determinar el contenido de sacarosa aparente por polarimetría, sólidos disueltos por refractometría, azúcares reductores, cuantificación de metales como arsénico y plomo, determinación de **color**, entre otros. Las metodologías para determinar los parámetros descritos para cada tipo de los azúcares que aparecen en la Tabla 1.2, se encuentran en este libro de métodos; los productores y compradores de cada tipo de azúcar certifican la calidad del producto con estos métodos, teniendo como exigencia el cumplimiento de parámetros que bajo estas metodologías y así garantizar la conformidad de los productos de manera comparable entre laboratorios de calidad. El **color** como parámetro de calidad principal del azúcar, no es la excepción, esta determinación se realiza regularmente bajo metodologías ICUMSA, para azúcar cruda es utilizado el Método GS1/3-7(2011) y para azúcares blancos el Método GS2/3-9(2005), buscando establecer resultados que sean comparables con laboratorios acreditados para este tipo de metodología y por lo tanto se pueda cumplir con los requerimientos de los clientes y normativas existentes.

### 1.5 Color en el azúcar

La sacarosa pura es incolora, pero puede parecer coloreada debido a la inclusión de pequeñas cantidades de material coloreado en el azúcar. Color es el término genérico utilizado para describir una amplia gama de componentes que contribuyen al color en el azúcar. Muchos de estos compuestos son complejos y no son fáciles de cuantificar, de manera que el color es medido como el efecto total de todos los colorantes sobre la absorbancia de la luz. Esto no es completamente satisfactorio debido a que diferentes componentes colorantes se comportan de manera diferente (Rein, 2012). El color en el azúcar es una propiedad compleja, que se ha estudiado por la industria azucarera a nivel mundial, logrando definir bastantes de los parámetros y condiciones determinantes para la formación de este; desde la cosecha, durante la producción en fábricas/refinerías y en el almacenamiento.

### 1.5.1 Descomposición de la sacarosa en el proceso productivo y su efecto en el desarrollo del color en el azúcar de caña.

En presencia de iones hidrógeno, toma lugar una descomposición hidrolítica de la sacarosa disuelta. El proceso de hidrolisis se denomina inversión y al conjunto de azúcares producidos por este proceso, se le denomina azúcar invertido.

En el proceso productivo del azúcar, dentro del tratamiento de jugo, se tiene la adición de lechada de cal o sacarato de cal, el cual tiene como objetivo la formación de flóculos que ayudan en el proceso de clarificación del jugo, en este punto se busca además llevar el jugo a un pH cercano a 7 para evitar la inversión ácida de la sacarosa, pero también un exceso puede producir presencia no deseada de iones OH, luego en el proceso se lleva a cabo un calentamiento de jugo previo a la entrada del clarificador, esta condición de temperatura junto al exceso de iones OH de igual manera provocan una descomposición de la sacarosa con la cual puede observarse la formación de furfural, de metil glicoxilo, acetona gliceraldehído, dioxiacetona, de 5-hidroxi-metil-2-furfural, ácido láctico, ácido trioxiglutarico, ácido trioxibutirico, ácido acético, ácido fórmico, bióxido de carbono y otras sustancias. La descomposición de la sacarosa se acompaña con la formación de mezclas indefinidas de sustancias en pequeñas cantidades, pero de un color café muy intenso. No existe una relación estrecha entre la formación de ácidos y la formación de sustancias coloreadas. Sin embargo, en promedio una descomposición alta de sacarosa motiva una coloración alta. Las impurezas pueden tener un poder inhibidor del **color** o una influencia del mismo (Honig, 1969).

Existen diferentes tipos de ácidos orgánicos dentro de la caña de azúcar, los cuales forman una buena parte de la acidez del jugo. Algunos de estos ácidos han sido estudiados y relacionados directamente con situaciones no deseadas en el proceso productivo, a esto se le suman los ácidos que se pueden formar durante el proceso, como cuando es producida azúcar Blanca Sulfitada; el proceso más utilizado en El Salvador para el tratamiento de jugo que mejora el proceso de la clarificación, es la sulfitación, la cual tiene como objetivo hacer reaccionar el dióxido de azufre con las impurezas presentes en el jugo, para disminuir su actividad. El azufre utilizado en

este proceso es alimentado en polvo, a un horno rotativo, a una temperatura de entre 300 y 400 °C, para formar dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) el cual se pone en contacto con el jugo, puede ser en frío o en caliente, y por medio de eyectores, se hace llegar el gas del horno hacia el jugo, mezclándose en este punto, si el azufre no es quemado con aire libre de humedad, se corre el riesgo que se dé la formación de ácido sulfúrico, el cual tiene un efecto no deseado en la formación de otros compuestos no favorables.

El ácido fosfórico por ser un ácido mineral fuerte también puede tener un efecto negativo, propiciando la formación de ácidos como el ácido fórmico. También la oxidación puede tener parte, principalmente cuando entra en contacto con el aire y tiene un catalizador de cobre (como lo pueden ser algunas tuberías en el proceso), se produce ácido oxálico.

Reacciones bioquímicas son de las causas más comunes de descomposición de la sacarosa, el ejemplo principal de este tipo de causa es la formación de Dextrana que puede ser producida a partir del *Leuconostoc Mesenteroides*, *L. dextranicum*, *Betacoccus arabinosaceus*, y por otras bacterias (Honig, 1969). Este tipo de descomposición es más común que se presente en la etapa de molienda de la caña de azúcar, ya que es en este punto donde al no tener una adecuada limpieza en el tándem se puede proliferar este tipo de bacterias; aunque es importante mencionar que gran parte de este tipo de descomposición tiene sus inicios desde que se lleva a cabo la cosecha de la caña en el campo y como principal factor se sabe que el tiempo que se tarda en ser llevada la caña desde ese momento hasta el momento de su procesamiento es significativo.

Por otro lado, la caña de azúcar también contiene una cantidad considerable de aminoácidos y proteínas, los cuales pueden tener un efecto negativo dentro del proceso de fabricación de azúcar, por ejemplo, los aminoácidos contribuyen a la formación de melaza, ya que al combinarse con los azúcares reductores forman productos de color oscuro, de alto peso molecular llamados melanoidinas. Estos son materiales capaces de formar dispersiones coloidales, de ahí que cantidades muy pequeñas puedan ser lo suficientemente efectivas para inhibir la cristalización

(Honig, 1969). Este tipo de reacciones se llaman reacción de Maillard, la cual se caracteriza por la producción de melanoidinas coloreadas que pueden ser desde un color amarillo claro hasta un café muy oscuro. Como se mencionaba, para que esta reacción tenga lugar, es necesario un azúcar reductor (cetosa o aldosa) y un grupo amino libre, proveniente de un aminoácido o una proteína. Cuando se produce la descomposición de la sacarosa en forma de inversión, no solo propician las pérdidas de sacarosa como tal, sino que propicia también la formación de **color** en el proceso.

### **1.5.2 Color y no-azúcares coloreados**

En la caña de azúcar por naturaleza se encuentran diversidad de sustancias coloreadas, en las etapas del proceso de fabricación de azúcar donde se tratan las impurezas del jugo, se extraen la mayor parte de estas sustancias, pero además se forman otras sustancias de color en las diferentes etapas de fabricación. La cantidad de sustancias coloreadas con las que se cuenta en el proceso dependerá en gran medida del tipo de caña, del suelo y las condiciones donde fue cultivada, etc., se puede interpretar entonces, que la problemática del color es un conjunto de variables que abarca globalmente todos los procesos.

En la bibliografía se puede encontrar diversos métodos analíticos para determinar las sustancias coloreadas inmersas en los procesos de producción de caña, pero ya que la mayoría de las sustancias son tan complejas y difíciles de determinar, por lo general se suelen tratar como todo un conjunto y no individualmente. Aun así, algunos autores como (Honig, 1969) menciona tres categorías según la naturaleza de los no-azúcares que producen sustancias coloreadas, las cuales se retoman y amplían en las secciones 1.8.1, 1.8.2 y 1.8.3.

### **1.5.3 No-azúcares coloreados existentes originalmente en la caña.**

Las sustancias de color que existen en la caña se pueden clasificar en cuatro tipos principales: clorofilas, xantófilas, carotenos y antocianinas.

### I. Clorofila, Xantófila y Caroteno

La clorofila tiene naturaleza coloidal y es la encargada de dar el color verde a las plantas. La xantófila es un pigmento que se encuentran de forma natural en las plantas, este pigmento, es más resistente a la oxidación que la clorofila, y es el responsable de proporcionar los tonos amarillentos y pardos a las hojas de las plantas. El caroteno es el carotenoide más abundante en la naturaleza, que es un pigmento de color amarillo-anaranjado. Estas tres sustancias son insolubles en agua y soluciones de azúcar, pero solubles en alcohol, éter y algunas otras sustancias. Se conoce que se encuentran en el jugo de caña de azúcar en forma de suspensión, lo que hace más fácil su separación durante el proceso de tratamiento de jugo, lo que las hace poco importantes para la formación de color durante la fabricación de azúcar.

### II. Antocianinas

Las antocianinas son pigmentos hidrosolubles que se hallan en las células vegetales y que otorgan el color rojo, púrpura o azul a las hojas, flores y frutos. Desde el punto de vista químico, las antocianinas pertenecen al grupo de los flavonoides y son glucósidos de las antocianidinas, combinados con glucosa y otros azúcares.

Con ácido clorhídrico concentrado toman un color rojo y con hidróxido de sodio al 10% se vuelven de color violeta rojizo. La antocianina está prácticamente ausente en las variedades de caña blanca o amarilla, pero es evidente que si se encuentra en las cañas de color oscuro.

Durante el proceso, cuando el jugo es tratado con cal, toma un color verde oscuro y como no precipita, es difícil lograr que no siga durante el proceso, además se oscurece al combinarse con sales de hierro. Aunque como se menciona anteriormente, esto depende de la variedad de caña, ya que no todas contienen antocianinas, los efectos que esta causa cuando la planta si la tiene, puede ser poco o nada controlado, ya que solo el proceso de carbonatación dentro de las fábricas puede que los elimine, pero en el caso de la sulfitación solo lo hacer de manera parcial.

#### 1.5.4 No-azúcares de la caña que pueden desarrollar un color

Se encuentran en la caña, muchos compuestos que son incoloros, pero que en el proceso por la reacción de éstos con otros o la combinación con otras sustancias forman compuestos coloreados. Se pueden clasificar en dos grupos generales, los polifenoles y los aminocompuestos.

##### I. Polifenoles

Los polifenoles en soluciones alcalinas reaccionan con el hierro y el oxígeno y dan como resultado compuestos de color oscuro. Entre los fenoles más conocidos que se encuentran en la caña de azúcar están el tanino, los hidroxilos fenólicos de las antocianinas y sacaretina; además, las huminas y melanoidinas que contienen hidroxilos fenólicos, tienen el comportamiento mencionado, se oscurecen y forman compuestos de color muy oscuro con los iones férricos. La sacaretina en presencia de solución alcalina, se vuelve de color amarillo, pero se decolora cuando la solución se vuelve neutra o ácida, y como la mayor cantidad de este polifenol se encuentra en la fibra de la caña, al pasar por el filtro de jugo, buena parte de él se ve separado, y luego durante la clarificación, se separa casi en su totalidad. El tanino por ser soluble en agua reacciona más fácilmente y de mayor presencia. El jugo de caña en ausencia de hierro es de color café, pero dadas las sustancias polifenólicas que se encuentran en él, más el desgaste de los molinos, que agrega hierro a la solución, propicia el cambio de color verde.

##### II. Aminocompuestos

Existen muy pocos compuestos de nitrógeno, en su mayoría se encuentran en forma de amoníaco, aminoácidos y amidas. Estos compuestos incluyen asparraguina y glutamina con sus respectivos ácido aspártico y glutámico. Todos estos tipos de compuestos del nitrógeno, y sus derivados tienen importancia, dado que reaccionan con los azúcares reductores que se producen a partir de la descomposición de la sacarosa, y dan como resultado compuestos coloreados.

### 1.5.5 No-azúcares coloreados obtenidos de los productos de descomposición del azúcar.

Durante el proceso, el jugo de caña, con los componentes de No-azúcares respecto al total de impurezas (Tabla 1.3), es expuesto a una gran cantidad de condiciones: diferentes temperaturas, condiciones de pH, exposición al aire, al hierro de los equipos, y a los reactivos químicos que son añadidos como parte propia del proceso. Todos estos factores tienen una incidencia en lo que respecta al desarrollo del color. Algunos compuestos son atribuidos a la acción química sobre los no-azúcares.

*Tabla 1.3 Composición de los No-Azúcares en el jugo crudo de caña de azúcar (Honig, 1969).*

Constituyentes		% de no azúcares
Carbohidratos (diferentes a los azúcares)	Hemicelulosas y Pentosanas (Xilana)	8.5
	Pectinas	1.5
Compuestos Orgánicos nitrogenados	Altas proteínas (Albúmina)	7.0
	Proteínas simples (Albuminosas y Peptosas)	2.0
	Aminoácidos (Glicina, Ácido Aspártico)	9.5
	Amidas ácidas (Asparraguina, Glutamina)	15.5
Ácidos Orgánicos	Diferentes de amino, aconítico, oxálico, succínico, glicólico, málico	13.0
Materia Colorante	Clorofila, Antocianinas, Sacaretina, Taninos	17.0
Grasas Céreas y Jabones	Cera de caña	17.0
Sales inorgánicas	Fosfatos, Cloruros, Sulfatos, Nitratos de Sodio, Potasio, Calcio, Magnesio, Aluminio y Hierro	7.0
Sílice		2.0

El tipo de productos coloreados que se forma es variable, pero puede señalar los productos de la caramelización y descomposición de azúcares, además de los productos por formación con otros compuestos.

#### a. Formación de caramelo

La cristalización en las fábricas se produce bajo vacío e implica procesos simultáneos de transferencia de calor para el proceso de evaporación y proceso de transferencia de masa durante la cristalización. El vacío es necesario para mantener

la temperatura a un nivel suficientemente bajo que permita minimizar la formación de color y la inversión de sacarosa en el proceso. Ya que si el azúcar es calentada alrededor de los 200°C es formado un material de color oscuro que comúnmente es llamado caramelo. Esta formación es debido a reacciones de deshidratación y condensación que sufren los azúcares al ser calentados a temperaturas por encima de las temperaturas comunes de operación, principalmente en la etapa de cristalización en tachos, donde en combinación con presión de vacío las temperaturas rondan por los 65°C. Estos caramelos pueden ser formados a partir de sacarosa, glucosa y fructosa, todo depende de las condiciones en que se formen, pero primordialmente se debe tener el cuidado de las altas temperaturas, ya que es el principal factor involucrado que afecta en la formación de caramelo.

En estudios realizados, se determinó por espectrofotometría, que al calentar azúcares durante 20 horas, el desarrollo de color en la glucosa y fructosa fue igual; pero en comparación con el desarrollo de color de la sacarosa, estos azúcares fueron siete veces más intensos, igualmente se determinó que la temperatura no solo aumenta los pigmentos formados, sino que también cambian en su naturaleza. El pH mostró un efecto más intenso, ya que, dependiendo de las condiciones de pH, ya que, para un pH básico de 8, se llegó a determinar un aumento de hasta diez veces mayor que en un pH ácido de 5.9 (Honig, 1969).

b. Productos de la descomposición del azúcar

Como se explica en la sección 1.7 la descomposición de la sacarosa, suele suceder bajo condiciones ácidas y temperaturas altas, es entonces que se hidroliza y forma azúcares reductores; bajo calentamiento prolongado y condiciones alcalinas también se descompone a hexosas (HADP); todas estas condiciones de pH y temperatura dependerán de la etapa del proceso que se analice, pero al ocurrir cualquiera de estos fenómenos, se producen compuestos de color café. El efecto de la temperatura en la formación de color es notorio, al incrementar el color cuando las temperaturas son más altas. En condiciones alcalinas y temperaturas bajas, las hexosas forman ácidos orgánicos, como ácido acético, ácido fórmico, ácido láctico, ácido sacarínico, etc. El oxígeno aumenta el color y la actividad en todas estas

sustancias, mientras que el azufre, que se agrega en la etapa de tratamiento del jugo, ayuda disminuirlos.

c. Productos de reacción entre azúcares reductores y aminocompuestos

El resultado de las reacciones de las hexosas y los aminoácidos, son aminocompuestos. Este tipo de reacción es llamada reacción de Maillard y produce ciertas sustancias coloreadas, en especial de color café. Para que este tipo de reacciones se dé, tienen que existir condiciones específicas de temperatura, pH, humedad y transcurrir un determinado tiempo, estos factores varían de etapa a etapa del proceso, siendo que en cada una de estas se requieren condiciones específicas que cumplan con la operación para la que están diseñadas, pero que, a su vez, no causen formación de color. Cuando la sacarosa entra en calentamiento, el color que se desarrolla es notorio, pero su efecto es mucho más cuando contiene mayor cantidad de azúcares reductores.

*Tabla 1.4 Características de diferentes grupos de colorantes en el proceso de fabricación de azúcar (Rein, 2012).*

	<b>Colorantes de Caña de Azúcar</b>	<b>HADP</b>	<b>Caramelos</b>	<b>Melanoidinas</b>	<b>Melaninas</b>
Masa Molecular	Monomérico <1 200	Intermedio <10 000	Polimérico >10 000	Polimérico >10 000	Muy elevado >250 000
Origen	Flavonoides más otros productos fenólicos extraídos del tallo de la caña. Complejos de hierro con fenoles.	Reacción de hexosas a elevado pH (>8; optimo a pH 11).	Descomposición térmica de sacarosa a temperaturas por arriba de 120°C.	En reacciones de Maillard que involucran aminoácidos y azúcares invertidos a altos niveles de RDS.	Oscurecimiento enzimático de fenoles. También se reacción de fenólicos con aminoácidos.
Grado de ionización	Ionizado a alto pH. Neutro a bajo pH.	Sin carga. Catiónico por debajo de pH 5, aniónico arriba de pH 6.	Carga leve. Ionizado a pH 7.2	Catiónico por debajo de pH5. Aniónico arriba de pH 6.	Carga negativa
Polaridad	Menos polar	Polar	Intermedio	Polar	
Eliminado por	Pigmentos de la planta eliminados en la clarificación de jugo. Fenólicos por carbonatación.	Fosfatación e intercambio iónico (estirénico).	Carbón granular activado (GAC).	Completamente eliminado por intercambio iónico.	Carbón granular activado (GAC)

Afinidad por el cristal de azúcar	Incluido en el cristal.	Mayormente eliminado en la afinación.	Incluido en el cristal.	Mayormente eliminado en la afinación.	Fácilmente incluido en el cristal.
-----------------------------------	-------------------------	---------------------------------------	-------------------------	---------------------------------------	------------------------------------

Es considerado que los primeros productos que se forman cuando entran a reacción los aminoácidos con los azúcares reductores, son N-glucósidos. En esta primera parte de la reacción, se forma un color amarillo y luego cambia a café. El color café oscuro o negro que se forma son melanoidinas; aunque este tipo de productos son más comunes en la melaza.

Como se menciona en la sección 1.6, el color es un conjunto amplio de compuestos y componentes, que requieren de diferentes condiciones para poder desarrollarse. Se presenta en la Tabla 1.4 un resumen de los colorantes, su origen, sus características, y su afinidad por el cristal de azúcar.

#### **1.5.6 Separación del color durante la fabricación del azúcar de caña.**

Los no-azúcares coloreados presentes en el jugo de caña pueden ser separados por diferentes procesos físicos y químicos. Se pueden distinguir entre agentes precipitantes como la cal y ácido fosfórico; y agentes absorbentes como el carbón activado. Para todos estos agentes utilizados para separación de color es necesario tener en cuenta que existe el peligro que formen más color, debido a que en sus condiciones de propias de trabajo cumplen su propósito, pero a condiciones de pH o temperatura no adecuadas, pueden contribuir a la formación de complejos coloreados.

##### *1. Cal*

La utilización de cal (CaO), es el método más comúnmente utilizado en los ingenios para la clarificación del jugo de caña, ya que es muy efectivo en la separación de compuestos coloreados de naturaleza insoluble. Usualmente se añade la suficiente cantidad de cal para neutralizar los ácidos orgánicos contenidos originalmente en el jugo. Esta cantidad puede ser entre 1.0 – 1.6 libras de Cal por Tonelada Corta de caña. Al combinarse la cal con todos estos compuestos, es formado un precipitado

pesado con composición compleja. Este es un proceso muy importante porque es el que tiene mayor relación con el color y la calidad del azúcar que se produce.

Una adición excesiva de cal puede llevar a la formación de azúcares oscuros con baja calidad, por lo que el pH debe ser controlado ente 7.0 y 8.0. La ventaja que se obtiene al utilizar la cal es que reacciona tanto con compuestos orgánicos como con los inorgánicos, formando numerosas sales insolubles de calcio, algunas pueden ser compuestos coloreados, aunque la cal no es tan efectiva para la eliminación de color. Uno de los principales compuestos precipitados en la alcalización es el fosfato de calcio y magnesio combinado con sesquióxidos y ácido silícico, además se tienen diversos grupos de no-azúcares orgánicos que no han sido analizados a detalle (Honig, 1969).

### *II. Ácido fosfórico*

Por naturaleza los jugos de caña tienen cierto contenido de fosfatos ( $P_2O_5$ ) lo que fue notado como una ventaja, para facilitar la clarificación y como resultado dar un color más bajo al azúcar. Generalmente la cantidad de fosfatos contenida en el jugo de caña es muy poca, por lo que se realiza la adición de ácido fosfórico que, combinado con la cal, sirve en la clarificación para la formación de un precipitado floculento y pesado de fosfato tricálcico ( $Ca_3(PO_4)_3$ ), que además de ocluir las impurezas en general, absorbe mucho del material colorante. Se desea que el jugo contenga arriba de 250ppm de fosfatos, pero se sabe también, que el exceso de estos hace que la clarificación no sea del todo efectiva, por la cantidad de materia coloidal formado. La adición de este ácido es utilizada tanto en la clarificación de fábrica, como en la de refinería.

### *III. Dióxido de azufre*

La adición de dióxido de azufre junto con cal, forma parte del proceso de clarificación de jugos de caña. La cal es adicionada es mayor a la acidez natural del jugo, lo que lleva a la necesidad de neutralizar este exceso de cal y esto se hace con el dióxido de azufre. Para estas aplicaciones existen varias modificaciones posibles a realizar, pero se busca siempre el mejoramiento del manejo de los jugos y poder obtener azúcar blanca de bajo color.

El dióxido de azufre es aplicado de forma gaseosa al proceso, este se prepara a partir de azufre elemental en estado sólido, el cual es quemado en hornos especialmente diseñados para este propósito. Al ser calentado primero se funde alrededor de los 119°C dando como resultado un líquido amarillo, la combustión del azufre en el aire es una combustión, que si fuera completa se alcanzaría un gas con 21 vol% de SO<sub>2</sub>; sin embargo, esta combustión en los hornos utilizados requiere un considerable exceso de aire, por lo que el gas que normalmente se utiliza solo contiene entre 6-14 vol% de SO<sub>2</sub>. Un mal manejo del horno y su combustión puede dar como resultado el trióxido de azufre SO<sub>3</sub>, el cual es perjudicial para el proceso porque propicia la formación de ácido sulfúrico H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al entrar el contacto con agua, lo cual no solo complica las operaciones posteriores, sino que también nocivo para las tuberías y los equipos.

Cuando el dióxido de azufre entra en contacto con el jugo, se produce el ácido sulfuroso H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> el cual al disociarse y con presencia de Cal Ca(OH)<sub>2</sub> reacciona con las moléculas se combinan de tal manera que forman un precipitado de Sulfito de Calcio CaSO<sub>3</sub>, en este punto el pH del jugo se mantiene en condiciones acidas, pero es recomendable incrementar el pH a valores de 6.8 -7.8 para precipitar de un modo más completo el sulfito de calcio, este precipitado de sulfito de calcio adsorbe compuestos de color e impurezas. A nivel de experimentos y ya en operaciones en ingenios en diversas partes del mundo, se han probado diferentes configuraciones para la adición de azufre, cal y tratamiento de jugo en general; estas configuraciones son adoptadas a conveniencia según se vea su efectividad individualmente; puede ser agregado antes, después o en simultaneo con la alcalización, esto depende de la configuración de cada proceso en particular. En el caso del ingenio en estudio, la sulfitación se realiza antes de la alcalización y este proceso se lleva a cabo en caliente, con una temperatura de jugo de aproximadamente 75°C.

#### *IV. Carbones activados*

Los carbones activados, son fabricados a partir de diversidad de materiales orgánicos. Dependiendo del material y la forma de fabricación, cada carbón puede tener un poder decolorante diferente, aunque esto depende en gran medida también

del tipo de azúcar para el que se pretende utilizar, ya que como hemos venido mencionando, las características de cada producto están amarrado al tipo de caña y en definitiva esto varía en cada región del mundo donde se cosecha. El carbón tiene una atracción por el material colorante y por algunas impurezas lo que hace muy rápida la remoción de color bajo condiciones óptimas de temperatura, pH y concentración. Cabe señalar que la efectividad de este método es mayor cuando es combinada con defecación ácido fosfórico-cal, utilizado mayormente en refinerías de azúcar crudo, donde por el tipo de producto a tratar, también se advierte una mayor remoción de color e impurezas.

#### *V. Intercambiadores de iones*

Pensado en un principio para desmineralización, se demostró como una opción muy efectiva para la remoción de color. Son utilizados dos intercambiadores: de aniones y cationes, aunque también son utilizadas resinas adsorbentes del color que son comparables al carbón activado, estos son más capaces de adsorber compuestos orgánicos. A lo largo del tiempo se han realizado ensayos con esta tecnología para la remoción en la etapa de tratamiento de jugo, para el tratamiento de meladura, y en refinería, teniendo variables resultado, pero todos muy aceptables.

#### *VI. Efecto del pH en el color durante el proceso productivo.*

Dada la naturaleza de las soluciones colorantes dentro del proceso, pueden tener diferente grado de color dependiendo del pH de las condiciones donde se encuentren, ya sean acidas o alcalinas. Como muestra de este efecto, la marcha desarrollada por ICUMSA para la determinación de color, hace llevar la solución de azúcar a un pH 7, con el objetivo de eliminar el efecto variable del color por el pH. En la figura 1.2 se ilustra el efecto del pH sobre el color, en estas curvas se muestra el cambio de color entre el pH 5 y 8, para licor de azúcar crudo lavado y un jarabe de afinación, que son productos propios de refinerías. Lo que resalta es el alza del color a mayor pH.

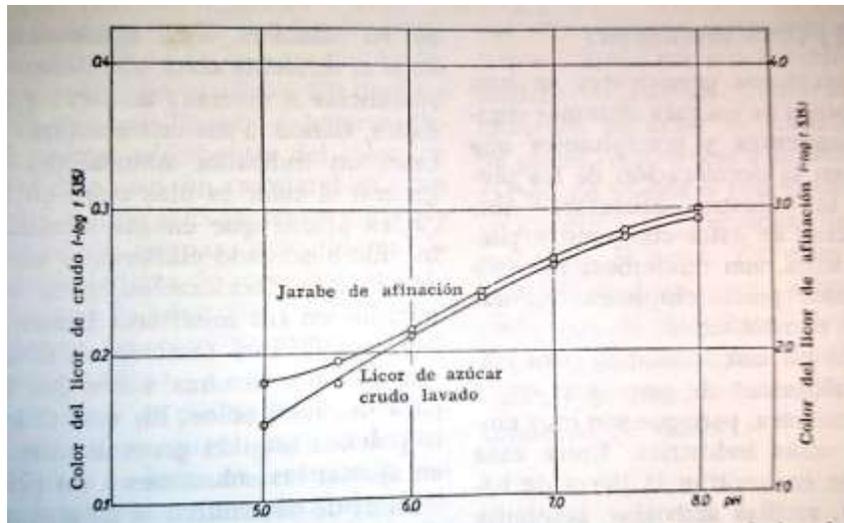


Figura 1.2 Efecto de pH sobre el Color de productos de refinación (Honig, 1969).

### 1.5.7 Desarrollo del color en el cultivo y cosecha de la caña de azúcar

Se ha tratado hasta este punto, la naturaleza del color como un conjunto de compuestos y pigmentos, y también la degradación del azúcar y reacción de los azúcares reductores con aminoácidos, etc., todo esto que viene desde la caña de azúcar y que ocurre durante el proceso. En Sur África se encuentra el análisis del color del jarabe del evaporador, azúcar y melaza (Smith, 1990) en muestras compuestas semanales de cinco fábricas en una temporada completa, lo cual presenta valores variables a lo largo de la temporada, que es considerado como un efecto de la calidad de la caña y no de la fábrica, comprobando en gran medida la teoría encontrada en libros, si se desea no obtener colores altos en azúcar de debe tener atención a la calidad de la caña. Aun así, se requiere atención en el proceso productivo, ya que no se puede estudiar por separado cada una de estas sustancias y condiciones que dan formación de color en el proceso, ya durante la fabricación de azúcar todos estos constituyentes no pueden ser tratados individualmente. En cada etapa del proceso pueden ocurrir por condiciones de operación no apropiadas y a reacciones no deseadas, cambios en el color e incrementarlo, por lo que no se debe menospreciar el efecto que pueda surgir en estos puntos. En la refinación también se debe tener el cuidado pertinente, aunque por el tipo de proceso, propicia menos el desarrollo del color.

Hay factores que afectan la calidad de la caña antes y durante la cosecha, como es la nutrición de la caña, la cual normalmente se ayuda con la fertilización de la planta, pero un exceso de esta puede ser perjudicial, ya que aunque la mayor parte de los minerales aplicados en la fertilización la planta los necesita para su crecimiento y maduración, la deficiencia de minerales como el calcio, sodio, magnesio y principalmente el potasio, pueden afectar la síntesis y translocación de proteínas, lo cual repercute en la calidad de la caña, aumentando la cantidad de azúcares reductores desde esta etapa; en cambio el exceso de estos pueden afectar de diversas formas en las etapas del proceso, como causar la cristalización de cloruro de potasio, incrustaciones de sulfato de calcio hidratado en los evaporadores o efecto melasogenico conduciendo a mieles finales con más alta purzas. Este tipo de minerales también pueden ser introducidos al proceso cuando el porcentaje de “materia extraña” que acompaña a la caña es alto, este concepto se entiende como cualquier tipo de materia que acompañe la caña que no sea tallo rico en sacarosa, es decir: hojas, cogollos, raíces, tierra, etc. El porcentaje de materia extraña aumenta considerablemente cuando la cosecha de la caña se realiza de manera mecanizada. En la Tabla 1.5 se presenta una comparación de colores obtenidos para Jugo Mezclado, Jugo Clarificado y Meladura, dependiendo del tipo de cosecha realizado, mostrando un incremento de color para todos los productos cuando la cosecha fue mecanizada. En una evaluación realizada se determinó que hay un incremento del 11% en la materia extraña en la cosecha mecanizada respecto a la cosecha manual, aumentando principalmente el hojas, cogollos y tierra (Larraondo J. E., 2009).

La materia extraña, constituida por cogollos, tiene una alta incidencia en los niveles de color y de impurezas como polisacáridos solubles, fenoles y amino-nitrógenos. Estos constituyentes afectan el proceso de cristalización y la calidad final del azúcar en relación con su color (Larraondo J. E., 1995).

*Tabla 1.5 Color observado en Jugo Mezclado, Jugo Clarificado y Meladura para diferentes tipos de corte de Caña de Azúcar (Larrahondo J. E., 1995).*

Sistema de Cosecha	Jugo Mezclado	Jugo Clarificado	Meladura
	Color (UI x 10 <sup>3</sup> )		
Cosecha Manual	8.9	8.9	9.7
Cosecha Mecanizada	12.5	10.2	11.5
Incremento	3.6	1.3	1.8

El tipo de corte de la caña también puede influenciar en el deterioro después de la cosecha y antes de ingresar al proceso, ya que cuando el corte es mecánico, el deterioro es mayor, debido al incremento de las infecciones de origen bacteriano en los tallos, porque la superficie de corte da entrada a microorganismos. Si la caña es quemada antes de la corta, disminuye su humedad lo que provoca un deterioro mayor, principalmente cuando se deja pasar más de 48 horas luego de realizada la cosecha (Larrahondo J. E., 1995). La principal repercusión durante y luego de la cosecha es la disminución de sacarosa, incrementando los azúcares reductores y disminuyendo el pH de los jugos, que en conjunto lleva a dar condiciones propicias para reacciones no deseadas durante el proceso productivo.

El oscurecimiento y degradación del jugo de caña puede ser un factor que siga desarrollándose durante todo el proceso, pero la remoción de color en el tratamiento de jugo es fundamental, ya que una mala remoción en este punto podrá generar desarrollo de color en los procesos subsecuentes. En esta etapa de tratamiento de jugo se sabe que la mayor parte de colorante proviene de la descomposición de azúcares reductores, aunque también estos son los que más se separan con la clarificación, pero esto no implica que este jugo pueda ser más oscuro que el jugo crudo, dado las otras diversas reacciones que pueden ocurrir, como las descritas en la sección 1.5.8. En la etapa de evaporación y cristalización puede desarrollar color por los caramelos y las melanoidinas provenientes del calentamiento de jugo.

### **1.5.8 Desarrollo y separación del color durante el tratamiento de jugo y clarificación**

La clarificación realiza una buena parte de separación de color, pero generalmente no se elimina por completo, el contenido de azúcares reductores en jugo de caña se vuelve crucial en este punto y la pureza es otro factor determinante, ya que la pureza con la que se va a efectuar la cristalización es la que determina la pureza final del azúcar cristalizado.

Las etapas del tratamiento de jugo se pueden describir en dos: el tratamiento de jugo de manera física, y tratamiento de jugo de manera fisicoquímica.

En una primera instancia se trata el jugo con un tamizado o filtrado en los molinos, teniendo como principal objetivo la separación de las partículas finas de bagazo que están en suspensión. La cantidad de partículas que pueden ser separadas en este punto es variable de ingenio a ingenio, como la contaminación misma que presente cada jugo, que varía dependiendo del tipo de molino, el rayado de las masas, y principalmente por la variación en el tipo de caña que entra al proceso. Además del bagacillo que se puede separar, muchas veces se puede observar una separación de arena, arcilla y tierra acarreada por la misma caña. Cualquier material que de alguna manera quede suspendido en el jugo luego de este proceso, tendrá que ser separado en los procesos subsecuentes del jugo. Como es notable, desde el principio se desea ir evacuando las impurezas externas que, por la naturaleza de corte y tratamiento de la caña, no son posibles de separar antes, también se desea desde este punto, deshacerse de las impurezas propias de la caña (Honig, 1969).

Para el ingenio en estudio, se puede mencionar que se realiza una adición de ácido fosfórico en el proceso, este se hace luego de este tratamiento en los molinos, al jugo mezclado, que es el jugo que de molinos va a fábrica.

Cuando la fábrica solo está produciendo azúcar crudo, básicamente solo el calentamiento del jugo, más la adición de cal son los agentes involucrados para lograr la eliminación de la máxima cantidad de impurezas. Para la fabricación de azúcar de consumo directo, como el azúcar sulfitada o el azúcar crudo ensacada, que son tipos de azúcar objeto de estudio en el presente trabajo, si requieren de adición de otras sustancias para lograr la calidad deseada.

La clarificación concebida solo con cal y calor, es también llamada defecación simple, que, aunque dependiendo de la configuración propia de cada ingenio, básicamente lo que logra, es generar un precipitado denso de composición compleja, que contiene sales insolubles de calcio, albúmina coagulada, sustancias cerosas, y por supuesto material fino que no logró ser separado en la filtración en los molinos (Honig, 1969). La separación que se lleva a cabo entre este precipitado y el jugo, por lo general es por medio de la sedimentación y decantación, bajo este principio se han diseñado diferentes tipos de clarificadores. El grado de clarificación que se logra en este punto, es clave para lograr un producto final bajo especificación.

El pH óptimo en que se debe trabajar la alcalización puede variar dependiendo de condiciones de tipo de caña, la configuración del proceso, la capacidad del clarificador, etc., pero en general resulta favorable agregar la cantidad de cal necesaria para llevar la caña a un pH cercano a 7.0 en el jugo clarificado. Si este llega arriba de pH 8.5 se hacen presentes en exceso, sales solubles de calcio, hay descomposición de azúcares reductores y el consecuente aumento de color (Honig, 1969).

Para la formación del flóculo, es añadido flocculante, lo que intensifica la formación de esta aglomeración de partículas. Estos flóculos deben ser tratados con cuidado, ya que al ser dañados por lo general pierden su tamaño. El tiempo de retención de jugo en esta etapa, debe ser tan corto como sea posible dependiendo del tipo de clarificador que se tenga instalado para este propósito, también se debe lograr el manejo de las condiciones de pH entre 6.4 y 7.4 y temperatura entre los 103 -105°C.

La sulfitación se puede realizar en frío o caliente, se puede realizar antes o después de la alcalización, continua o fraccionado; todas estas variables dependen de la configuración de cada ingenio en específico, y sobre todo del tipo de caña que es tratada, por su propia naturaleza.

En el ingenio en estudio, se realiza la sulfitación en caliente y previa a la alcalización, en esta configuración se reduce la solubilidad del sulfito de calcio. Primero se calienta el jugo a una temperatura cercana a los 75°C luego se sulfita, alcaliza y se

deja sedimentar. Este proceso se realiza de manera continua, el  $\text{SO}_2$  se produce cuando se quema azufre, en un horno con aire seco, para evitar la formación de ácido sulfúrico que es dañino para las tuberías y accesorios y que de entrar al contacto con el jugo también puede ser adverso.

El color en esta etapa se origina por diversas reacciones, principalmente la que tiene lugar entre los azúcares reductores y los aminoácidos, pero dependiendo de la configuración del proceso se logra controlar la calidad del jugo, eliminando compuestos de calcio, sílice ( $\text{SiO}_2$ ), Magnesio ( $\text{MgO}$ ,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ), Hierro y Aluminio (no están presentes en solución, sino en suspensión, pero que son removidos casi en su totalidad); sustancias inorgánicas, gomas, pectinas, ceras, grasas, partículas gruesas de materia en suspensión y compuestos nitrogenados aunque de estos no todos son precipitados y eliminados en esta etapa, como lo son los aminoácidos simples que son perjudiciales para la formación de color.

#### **1.5.9 Evaporación y desarrollo del color en el azúcar**

La evaporación del jugo clarificado es la separación del agua mediante la elevación de la temperatura del jugo, comúnmente realizado en varias etapas continuas. Hay un número sustancial de fenómenos durante el proceso de la evaporación, de naturaleza química y fisicoquímica que modifican la composición y las propiedades de los sólidos disueltos. Se puede presentar una descomposición y transformación de los no-azúcares en la solución, una descomposición de la sacarosa (Honig, 1969).

Los principales factores que afectan en el desarrollo de la formación de color en la etapa de evaporación son el tiempo de retención en los evaporadores, aunado a las altas temperaturas que se maneja en este proceso, por otro lado, se hace énfasis a la etapa anterior, el tratamiento del jugo, ya que un ajuste inadecuado de pH en esta etapa puede propiciar formación de color en los evaporadores. En este punto, la naturaleza de la formación de color guarda relación principalmente con los compuestos de hierro presentes en el jugo. Cabe señalar que, estos efectos son más grandes cuando el jugo no ha sido tratado con la sulfitación, es decir, la sulfitación ayuda a que la formación de color sea menor. Aunque en esta parte del

proceso no sea donde se genere por completo el aumento de color, si se sabe que puede ser precursora de la formación de color en las últimas etapas del proceso. Clarificando el jugo de manera apropiada y controlando el tiempo de retención y temperatura en los evaporadores se puede evitar la formación de color.

#### **1.5.10** Cristalización del azúcar y desarrollo de color

La reacción entre aminoácidos y azúcares reductores, que sucede durante la cristalización, esta reacción, también conocida como reacción de Maillard, la cual causa oscurecimiento en las mieles; este tipo de reacción se da principalmente en mieles con bajo contenido de agua y baja pureza. La destrucción y transformación de los no-azúcares reductores y la inversión de la sacarosa en el proceso de cristalización tienen lugar simultáneamente, dando como resultado melanoidinas, las cuales también aportan color café al proceso.

Durante la cristalización también se producen reacciones de los no-azúcares orgánicos, y aunque es un tema que dada su complejidad no ha sido estudiado tan a profundidad, aun así, se tiene identificadas ciertas reacciones que ocurren. Un cierto grupo de no-azúcares orgánicos se vuelve insoluble durante el proceso en tachos al vacío, aun sin conocer su mecanismo exacto, se sabe que gran cantidad de reacciones dan como resultado final la formación de color. La formación de productos de descomposición se da por altas temperaturas, existe un agregado de color que es comúnmente llamado "caramelo", el cual es parte de descomposición del azúcar a temperaturas elevadas con una deshidratación y polimerización de las moléculas deshidratadas y la formación de moléculas complejas, así como la descomposición de sustancias presentes en forma coloidal en las soluciones azucaradas diluidas con contenido alto de carbón y muy bajo de agua. También la presencia de hierro, aun en pequeñas cantidades, afecta la formación de color en los productos azucareros en proceso. La adición de sulfitos puede impedir la formación de sustancias coloridas, probablemente en forma directa, reduciendo el ion férrico a ferroso (Honig, 1969).

Las impurezas coloridas que son absorbidas por los cristales pueden tener el efecto tan grande en estos que además de disminuir su velocidad de cristalización, vuelve

el cristal en una forma simplificada que carece de las caras propias de un cristal de sacarosa.

#### **1.5.11 Centrifugación del azúcar**

En la etapa de centrifugación no se presenta desarrollo de color, pero siempre se deben considerar todas las variables dentro del proceso de centrifugado, variables mecánicas y consideraciones teóricas en general. En cuanto al color en azúcar, el criterio para tener en cuenta, son los tiempos de lavado de los cristales al momento de centrifugar, ya que esta variable no solo puede cambiar la distribución de tamaño o afectar el proceso por el agua miel que se genera, sino que sirve principalmente para eliminar la miel madre residual. Esta eliminación es superficial, no tiene efecto alguno en las impurezas ocluidas en los cristales.

#### **1.5.12 Almacenamiento del azúcar**

El tiempo que llega a pasar el azúcar almacenada antes del despacho a los respectivos clientes, hace que esta última parte del proceso sea crítica. El tipo de almacenamiento va a depender del tipo de azúcar a almacenar, por ejemplo, el almacenamiento de azúcar crudo ensacado depende en gran medida de la humedad que contengan en la capa de miel los cristales. Para evitar la absorción de humedad, los almacenes deben ser secos, grandes y casi herméticos. El azúcar refinada empacada, también presenta requerimiento de ciertas condiciones para su mejor almacenamiento, suelen ser de mampostería y con pisos de concreto o madera, y techos herméticos; en algunos lugares hasta es empleado aire acondicionado.

El incremento del color durante el almacenamiento no sólo aumenta el color de la película de miel que rodea los cristales, sino que aumenta también el color en el interior de los cristales (Chen, 1999). De manera principal recomiendan ciertas condiciones ambientales que debe cumplir el área de almacenamiento de azúcar empacada (Rein, 2012):

- Conservar el azúcar a una temperatura inferior a 38°C
- Mantener una humedad relativa por debajo de 60%

La velocidad en la que el azúcar experimenta un incremento de color ocurre dependiendo en gran medida de la temperatura de almacenaje, además es recomendable que, al momento de entrar al almacenamiento, el azúcar debería no exceder 45°C. Por otro lado, en cuanto más directo sea el contacto con la humedad del ambiente, más posibilidades existen de que esta pueda tener influencia en el aumento de color, aquí entra en juego el material de los sacos y la forma en que se almacena el azúcar, ya que estas son condiciones controlables de manera sencilla que evitan un aumento drástico en el color.

En el capítulo 14 del Manual del Azúcar de Caña (Chen, 1999), se muestra una prueba realizada a dos azúcares con diferentes niveles iniciales de color, los cuales fueron almacenados y controlando su temperatura, se monitoreo el desarrollo del color. La muestra A con un color inicial de 473 y la muestra B con un color inicial de 90, ver Figura 1.3. Lo que respalda la idea que cuando el azúcar es producido con un color más alto, en el tiempo aumenta más color que el que aumenta un azúcar producido con más bajo color.

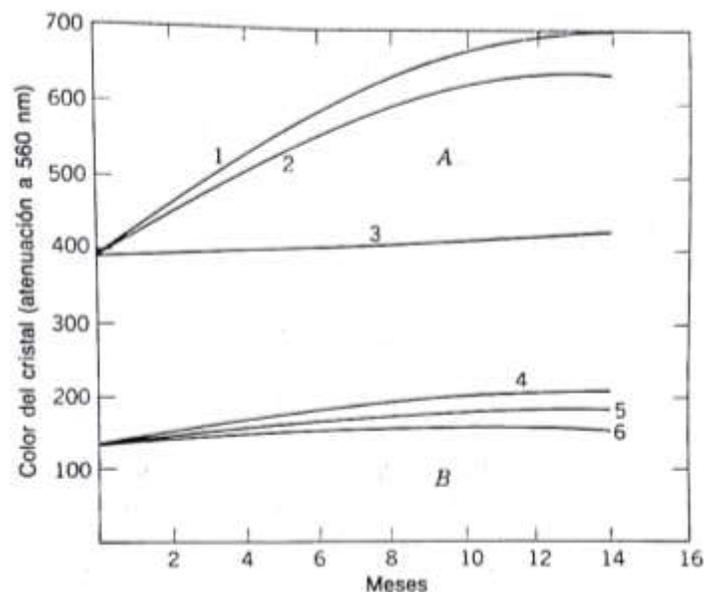


Figura 1.3 Aumento de color durante el almacenamiento, para dos muestras en estudio (Chen, 1999).

Según el estudio realizado (Barrientos Aquino, 2005) la degradación del color del azúcar tiene dependencia de la ubicación de las bodegas, en esta investigación se realizó el estudio en bodegas que están distribuidas en todo Guatemala, caracterizando climatológicamente cada una de las zonas donde se ubican y llevando el análisis de los datos en ese camino. El estudio concluye que en el 80% de las bodegas analizadas se degradó mayormente el color del azúcar y que para el 100% de las bodegas analizadas, a mayor temperatura se observó mayor degradación de color. Entonces la variación del color si depende en gran manera de las condiciones ambientales que se tengan en cada bodega amarrado a la ubicación geográfica donde se encuentren. (Herrera Alfaro, 2016) en su artículo respaldan la relación del almacenamiento con el aumento del color en el azúcar almacenada en bodegas desarrolla la problemática con una parte de ensayos de laboratorio, para azúcar blanco sulfitado. Donde se realizó un análisis completo de la muestra, en cuanto a los agentes colorantes que se ven involucrados en el color final del azúcar, determinando que la temperatura de almacenamiento es clave para el incremento de color en azúcar, haciendo un análisis gráfico e interpretativo de lo que cada uno de los compuestos que generan color influye para el aumento de color del azúcar, estando almacenada.

La problemática del aumento de color causado por el almacenamiento incorrecto de la producción de azúcar es causada principalmente por los factores ambientales (temperatura, humedad, luz y clima) y tienen influencia en la calidad del producto final, para varios tipos de azúcares cristalinos. Se sabe que junto con el aumento de color se puede dar un aumento de azúcares reductores. En Brasil, en la Universidad de Sao Pablo (Lima de Aguiar, 2015), se llevó a cabo un estudio y se evaluaron cambios bajo condiciones controladas, con muestras de azúcar que se colocaron en desecadores sellados, donde la humedad relativa se controló dentro del recipiente a través de soluciones saturadas de: cloruro de magnesio ( $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ) para obtener igual a 30% de humedad; nitrato de magnesio ( $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ) para una humedad igual al 50%; y cloruro de sodio (NaCl) para una humedad igual al 70%. Para el efecto de la temperatura, las muestras fueron llevadas a un horno con control de temperatura a 30, 40 y 50 ° C durante 6, 12 y 24 horas por los factores

que pueden afectar la formación de color durante el almacenamiento. Para un diseño experimental factorial completo, se usaron 23 experimentos con 3 repeticiones en el punto central, con un total de 11 ensayos. Con este modelo de experimento presentaron la conclusión que los efectos de diferentes condiciones de almacenamiento de azúcar cambian el contenido de sacarosa, glucosa y fructosa, y hay formación de color durante el almacenamiento.

#### **1.5.13 Formación de color en el azúcar en la refinería**

Al tratarse de un reproceso de azúcar, la refinería logra obtener mayores purezas y, por ende, menos color en los cristales, al mismo tiempo cuenta con la ventaja de una etapa de adición de productos químicos especialmente diseñada para la decoloración. Por la alta pureza que se maneja a lo largo de todo el proceso, se vuelve más complicado el desarrollo de color bajo reacciones no deseadas como pasa en la fábrica con el azúcar cruda o blanca, aun así se deben tener bajo control, en todas las etapas del proceso, las variables críticas como lo son el pH, la temperatura, tiempo de residencia y aireación del licor en la refinería, ya que está relacionado directamente con la formación de color, específicamente en la cristalización, durante la ebullición en tachos, la temperatura y la circulación son importantes, una buena circulación minimiza la formación de color (Rein, 2012).

#### **1.5.14 Problemática del aumento de color en azúcar almacenada**

El color se origina en la caña de azúcar, pero también una parte se forma en el procesamiento. En la caña el color está afectado considerablemente por la temporada de cosecha y por la variedad de caña, mientras que durante el proceso se forma por una cantidad de mecanismos diferentes, como la caramelización y la degradación alcalina de la hexosa y melanoidinas que ocurren a ciertas condiciones de pH y temperatura; el hierro también juega un papel importante, particularmente en colorantes derivados de plantas. Muchos compuestos polifenólicos son capaces de producir complejos de hierro altamente coloreados (Rein, 2012). Los tipos de colorantes y sus características, así como su influencia en el proceso productivo, en relación con la formación de color, son abordados a lo largo del capítulo 1.5.

El azúcar sufre un incremento gradual de color cuando se almacena durante periodos largos. La velocidad del deterioro del azúcar puede variar ampliamente, dependiendo de los siguientes aspectos: el contenido de humedad (en especial para el azúcar crudo a granel), la temperatura, distribución del tamaño de cristales, presencia de no azúcares y la humedad ambiental relativa.

Conforme a lo establecido en la Norma Salvadoreña Obligatoria NSO 67.20.01:03, los parámetros de calidad a cumplir son de carácter obligatorios, y dentro de los más importantes se encuentra el Color, se establece el máximo valor permitido dependiendo del tipo de azúcar, ver tabla 1.6; para Azúcar Cruda envasada, el parámetro máximo se establece de acuerdo a contratos de compra con los clientes, al igual que para el azúcar refinada de exportación, el color pactado en contratos con los clientes puede ser aún más exigentes que el parámetro establecido en la norma.

*Tabla 1.6 Máximo valor permitido de color para la comercialización de los diferentes tipos de azúcares producidos en El Salvador, establecidos por la NSO 67.20.01:03*

<b>Tipo de Azúcar</b>	<b>Color (UI)</b>
<b>Refinada</b>	80
<b>Blanca Superior</b>	300
<b>Blanca</b>	500
<b>Cruda (granel)</b>	6000

Es necesario durante la producción de azúcar en los ingenios azucareros en El Salvador, establecer parámetros de control en el proceso que aseguren un cumplimiento a futuro de lo señalado en la Norma Salvadoreña; también asegura que el aumento de color de todos estos tipos de azúcares, estando almacenada en bodegas, no llegue al punto del incumplimiento al momento del despacho.

Dentro del procesamiento de la caña de azúcar, se toman en cuenta parámetros que aseguren el cumplimiento de color al final de la producción, y existen etapas específicamente diseñadas para la remoción de color; luego de la producción, la

etapa de almacenamiento del azúcar en bodegas es determinante. Para el ingenio en estudio este almacenamiento es realizado en estibas conformadas por hasta 25,000 sacos de azúcar, en cuatro bodegas, con capacidad de almacenar entre 20 a 24 estibas cada una.

Cuando se almacena por periodos largos de tiempo, el azúcar experimenta un incremento gradual en el color. La velocidad a la que esto ocurre depende en gran parte de la temperatura de almacenaje (Rein, 2012).

Ya que la producción de azúcar solo ocurre aproximadamente entre los meses de noviembre de un año, a abril del siguiente año (6 meses de producción), existe siempre azúcar que tendrá que permanecer almacenada durante periodos largos de tiempo (aproximadamente diez o doce meses), mientras espera a ser despachada y se llega al próximo periodo de producción, entonces deberá cumplir aun después de este plazo los parámetros fisicoquímicos que se establecen en la norma Salvadoreña obligatoria; radica en este punto la importancia de monitorear el color como parámetro a cumplir.

Con relación a esta situación de almacenamiento y aumento de color a lo largo del tiempo, surge la inquietud de poder relacionar la variable color, con la temperatura de almacenamiento, para calcular el impacto que tiene y poder determinar así una relación entre ambas para cada una de las bodegas del ingenio en estudio. Se busca relacionar también, el color con la humedad relativa en bodegas, como parte de las condiciones ambientales, además de realizar una caracterización de las bodegas donde se almacena azúcar empacada, con condiciones ambientales propias y con efectos probablemente diferentes para cada una de estas.

## 2.0 Desarrollo experimental del monitoreo de color en muestras de azúcar y de condiciones ambientales en bodegas de almacenamiento.

Se realizó un enfoque metodológico como parte del diseño experimental a implementar para el desarrollo del monitoreo del color, la caracterización del tipo de estructura de las bodegas de las cuales se registraron los datos de condiciones ambientales a seguir durante el monitoreo.

Se buscó comprobar la existencia o no de una relación directa entre las condiciones ambientales dentro de las bodegas donde se almacena azúcar de caña empacada, respecto al aumento de color que sufre. Tomando en cuenta como elemento principal el tipo de infraestructura de la bodega donde se almacena, dado que es trascendental para determinar las condiciones propias dentro de cada bodega en estudio. Además, figuran desde la cosecha y producción otros factores que son relevantes al momento de obtener un resultado en el producto al final del proceso, lo cual incide directamente en el color del cristal, por lo que se evaluó, además, si una azúcar que es producida con un color más alto tiende a aumentar más rápidamente de color, que una azúcar que es producida con un color más bajo.

### 2.1 Caracterización estructural de las bodegas en estudio utilizadas para almacenamiento de azúcar.

La caracterización física se realizó para un total de 4 bodegas del ingenio en estudio, las cuales son identificadas con los números #3, #4, #5 y #6; estas bodegas fueron elegidas ya que es en estas donde se almacena el producto envasado, dejando por fuera las bodegas #1 y #2 que son utilizadas únicamente para azúcar a granel. Se realiza una breve descripción de la infraestructura física y de la capacidad de almacenamiento de cada bodega. También de un registro fotográfico para ilustrar de mejor manera las bodegas, y en el Anexo A se esquematiza la ubicación y la distribución de las bodegas (Figura A-1 y Figura A-2).

En la actualidad no existe ninguna normativa específicamente diseñada para el almacenamiento de azúcar, es por eso que se toman como referencia, normativas generales para alimentos, donde se dictan algunos principios universales sobre almacenamiento como:

- a. “La bodega debe estar ubicada en un lugar en el que no exista riesgo de inundación así mismo debe existir un cordón sanitario alrededor de la misma, que impida el paso de roedores y otro tipo de plagas a su interior. La bodega no debe estar ubicada contiguo a bodegas que contengan productos químicos. Además, en los alrededores de ésta no deben existir malezas, objetos inservibles ni basura” (Ministerio de Salud, 2013).
- b. “Materiales de construcción: todos los materiales de construcción de los edificios e instalaciones deben ser de naturaleza tal que no transmita ninguna sustancia no deseada al alimento. Las edificaciones deben ser de construcción sólida, y mantenerse en buen estado” (CONACYT, 2006).
- c. “Los pisos deberán ser de materiales impermeables, lavables y antideslizantes que no tengan efectos tóxicos para el uso al que se destinan; además deberán estar contruidos de manera que faciliten su limpieza y desinfección” (CONACYT, 2006).
- d. “Los techos deberán estar contruidos y acabados de forma lisa de manera que reduzcan al mínimo la acumulación de suciedad, la condensación, y la formación de mohos y costras que pueden contaminar los alimentos, así como el desprendimiento de partículas” (CONACYT, 2006).
- e. “Debe existir una ventilación adecuada para: evitar el calor excesivo, permitir la circulación de aire suficiente, evitar la condensación de vapores y eliminar el aire contaminado de las diferentes áreas” (CONACYT, 2006).
- f. “Deberá tenerse cuidado en impedir, en la medida en que sea razonable posible, el deterioro y la descomposición, aplicando medidas como el control de la temperatura y la humedad y/u otros controles” (Comisión del Codex Alimentarius, 1997).

### 2.1.1 Caracterización física de la BODEGA 3

Fue construida en el año 1994, con orientación hacia el oeste, y con dimensiones de 40.21 m ancho X 67.97 m de largo X 11.96 m altura. Toda la estructura se encuentra construida sobre una base de concreto. Posee paredes de mampostería de 4.96 m de altura. El resto de la construcción de las paredes está realizada con estructura metálica, alcanzando una altura de 2.41 m en la parte de la lámina, y sumado a la mampostería, la bodega tiene una altura en las paredes de 7.37 m. La altura que se tiene al centro de la bodega, en su parte más alta un total de 11.96 m de altura, reforzada con 10 vigas a cada lado del largo de la bodega. Cuenta con dos puertas, una al frente y la otra en el costado norte, con dimensiones de 5.57 m de ancho X 4.75 m de alto (Figura 2.1). Además, cuenta con 6 ventiladores y 16 inyectoros de aire (Figura 2.2). Bajo estas dimensiones, y descontando el área de circulación dentro de las bodegas: a la periferia de las estibas de azúcar, de 1 m y al centro entre ambas estibas de 2 m, se cuenta con espacio para formar 10 estibas, de 50 tendidos cada una y 10 estibas de 55 tendidos cada una, teniéndose una capacidad de almacenamiento de 33,360 sacos de 50kg (Figura 2.3). Cada estiba es cubierta desde su formación y hasta el despacho total de esta, por un plástico transparente, para evitar la contaminación del producto almacenado con polvo y el contacto directo con la humedad del ambiente. En esta bodega es almacenada azúcar envasada, **Blanco Superior**.



*Figura 2.1 Fachada de Bodega 3 – Ingenio Azucarero en estudio.*



*Figura 2.2 Bodega 3 - Ventiladores ubicados en las paredes e inyectores de aire ubicados en la parte más alta de la bodega.*



*Figura 2.3 Almacenamiento en Bodega 3, estibas de 50 tendidos formadas al interior - banda utilizada para el despacho de azúcar.*

### 2.1.2 Caracterización física de la BODEGA 4

Fue construida en el año 1997, con orientación hacia el oeste, y con dimensiones de 40.20 m ancho X 68.00 m de largo X 12.15 m altura. Toda la estructura se encuentra construida sobre una base de concreto. Posee paredes de mampostería de 5.04 m de altura. El resto de la construcción de las paredes está realizada con estructura metálica, alcanzando una altura de 2.30 m en la parte de la lámina, y sumado a la mampostería, la bodega tiene una altura en las paredes de 7.34 m. La altura que se tiene al centro de la bodega, en su parte más alta un total de 12.15 m de altura, reforzada con 10 vigas a cada lado del largo de la bodega. Cuenta con dos puertas, una al frente y la otra en el costado norte, con dimensiones de 5.52 m de ancho X 4.70 m de alto (Figura 2.4). Además, cuenta con 6 ventiladores y 16 inyectores de aire (Figura 2.5). Bajo estas dimensiones, y descontando el área de circulación dentro de las bodegas: a la periferia de las estibas de azúcar, de 1m y al centro entre ambas estibas de 2 m, se cuenta con espacio para formar 10 estibas, de 50 tendidos cada una y 10 estibas de 55 tendidos cada una, teniéndose una capacidad de almacenamiento de 33,360 sacos de 50kg. Cada estiba es cubierta desde su formación y hasta el despacho total de esta, por un plástico transparente, para evitar la contaminación del producto almacenado con polvo y el contacto directo con la humedad del ambiente. En esta bodega es almacenada azúcar envasada, **Cruda y Blanca Sulfitada**.



*Figura 2.4 Fachada Bodega 4 – Ingenio Azucarero en estudio.*



*Figura 2.5 Bodega 4 - Ventiladores ubicados en las paredes e inyectores de aire ubicados en la parte mas alta de la bodega.*

*Tabla 2.1 Tabla comparativa de características estructurales entre bodega 3 y bodega 4*

<b>Característica</b>	<b>Bodega 3 - B3</b>	<b>Bodega 4 - B4</b>
Año de Construcción	1994	1997
Orientación	Oeste	Oeste
Ancho (m)	40.21	40.2
Largo (m)	67.97	68
Altura (m)	11.96	12.15
Altura paredes de mampostería (m)	4.96	5.04
Altura paredes estructura metálica (m)	2.41	2.3
Total altura de paredes (m)	7.37	7.34
Numero de puertas de acceso	2	2
Ancho de puertas (m)	5.57	5.52
Alto de puertas (m)	4.75	4.7
Numero de Ventiladores	6	6
Numero de inyectores de aire	16	16
Cantidad máxima de estibas	20	20
Capacidad de almacenamiento (sacos 50 kg)	33,360	33,360

### 2.1.3 Caracterización física de la BODEGA 5

Fue construida en el año 2007, con orientación hacia el noreste, y con dimensiones de 57.88m ancho X 55.55m de largo X 26.40m altura. Toda la estructura se encuentra construida sobre una base de concreto que se eleva a 1.30m de altura sobre el nivel del suelo. Posee paredes de mampostería de 4.0m de altura y 0.2m de espesor. Los bloques utilizados para la fabricación cumplen con las especificaciones ASTM C-90 tipo II, ASTM C-140 y ASTM C-426. El concreto de toda la estructura cumple con normativas ASTM, específicamente para la formación de concreto, en sus agregados y el cemento, ASTM C-33 y ASTM C150 respectivamente. Con acero de refuerzo grado 40, y con varillas de tipo corrugado, bajo normativa ASTM A-615. Al centro cuenta con 7 columnas metálicas que refuerzan la estructura. El resto de la construcción de las paredes está realizada con estructura metálica, las cuales tienen perfiles metálicos tipo I de acero A-572 grado 50; con perfiles tubulares que cumplen con especificaciones ASTM A-500. Con forro de lámina DURALUM calibre 26, por fuera y por dentro, alcanzando una altura de 18.96m en la parte de la lámina, y sumado a la mampostería, la bodega tiene una altura en las paredes de 22.96m. El techo cuenta con un ángulo de 6.84° respecto a la horizontal, con estructura metálica; siempre cumpliendo especificaciones ASTM y con cubierta de lámina DURALUM estándar de calibre 24, que alcanza al centro de la bodega, en su parte más alta un total de 26.40m de altura. Cuenta con dos puertas al frente y dos atrás, de 8.2m de ancho X 3.4m de alto, cada una, y una puerta a cada costado de 5.85m de ancho X 3.40m de alto, cada una. El piso es de concreto con un acabado pulido que lo hace ideal para la limpieza continua; además, posee una acera perimetral de 6.52 m al frente y atrás; y 2.62m a ambos costados, para circulación peatonal o de montacargas utilizado para el transporte de azúcar en tarimas (Figura 2.6). Además, cuenta con 10 ventiladores y 8 inyectores de aire (Figura 2.7). Bajo estas dimensiones, y descontando el área de circulación dentro de las bodegas: a la periferia de las estibas de azúcar, de 1m y al centro entre ambas estibas de 2m, se cuenta con espacio para formar 20 estibas, de 70 tendidos cada una, se obtiene una capacidad de almacenamiento de 522,700 sacos de 50kg. Cada estiba es cubierta desde su formación y hasta el despacho

total de esta, por un plástico transparente, para evitar la contaminación del producto almacenado con polvo y el contacto directo con la humedad del ambiente (Figura 2.8). En esta bodega es almacenada azúcar envasada, **Cruda, Blanca Sulfitada y Refinada.**



*Figura 2.6 Fachada Bodega 5 – Ingenio Azucarero en estudio.*



*Figura 2.7 Estructura metálica de soporte al centro de la Bodega 5 – Inyectores de aire ubicados en la parte más alta de la bodega.*



*Figura 2.8 Almacenamiento en Bodega 5, estibas de 70 tendidos formadas al interior - banda utilizada para el despacho de azúcar.*

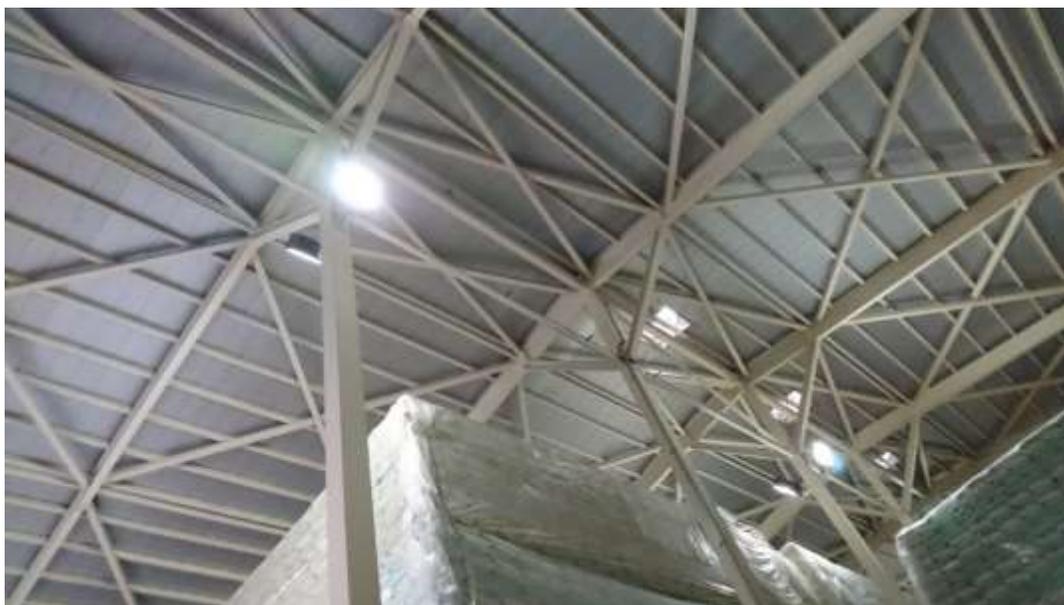
#### 2.1.4 Caracterización física de la BODEGA 6

Esta bodega fue construida en el año 2011, con orientación hacia el noreste, y con dimensiones de 57.90m ancho X 63.61m de largo X 14.98m altura. Toda la estructura se encuentra construida sobre una base de concreto que se eleva a 1.15m de altura sobre el nivel del suelo. Posee paredes de mampostería de 4.0m de altura y 0.2m de espesor. Los bloques utilizados para la fabricación cumplen con las especificaciones ASTM C-90 tipo II, ASTM C-140 y ASTM C-426. El concreto de toda la estructura cumple con normativas ASTM, específicamente para la formación de concreto, en sus agregados y el cemento, ASTM C-33 y ASTM C150 respectivamente. Con acero de refuerzo grado 40, y con varillas de tipo corrugado, bajo normativa ASTM A-615. Al centro cuenta con 7 columnas metálicas que refuerzan la estructura. El resto de la construcción de las paredes está realizada con estructura metálica, las cuales tienen perfiles metálicos tipo I de acero A-572 grado 50; con perfiles tubulares que cumplen con especificaciones ASTM A-500. Con forro de lámina DURALUM calibre 26, por fuera y por dentro, alcanzando una altura de 7.70m en la parte de la lámina, y sumado a la mampostería, la bodega

tiene una altura en las paredes de 11.70m. El techo cuenta con un ángulo de 6.84° respecto a la horizontal, con estructura metálica; siempre cumpliendo especificaciones ASTM y con cubierta de lámina DURALUM estándar de calibre 24, que alcanza al centro de la bodega, en su parte más alta un total de 14.98m de altura. Cuenta con dos puertas al frente y dos atrás, de 8.2m de ancho X 3.4m de alto, cada una, y una puerta a cada costado de 5.85m de ancho X 3.40m de alto, cada una. El piso es de concreto con un acabado pulido que lo hace ideal para la limpieza continua; además, posee una acera perimetral de 6.66 m al frente y atrás; y 2.60m a ambos costados, para circulación peatonal o de montacargas utilizado para el transporte de azúcar en tarimas (Figura 2.9). Además, cuenta con 10 ventiladores y 8 inyectores de aire (Figura 2.10). Bajo estas dimensiones, y descontando el área de circulación dentro de las bodegas: a la periferia de las estibas de azúcar, de 1m y al centro entre ambas estibas de 2m, se cuenta con espacio para formar 24 estibas, de 70 tendidos cada una, se obtiene una capacidad de almacenamiento de 627,240 sacos de 50kg. Cada estiba es cubierta desde su formación y hasta el despacho total de esta, por un plástico transparente, para evitar la contaminación del producto almacenado con polvo y el contacto directo con la humedad del ambiente (Figura 2.11). En esta bodega es almacenada azúcar envasada, **Blanca Sulfitada, Blanco Superior y Refinada**.



*Figura 2.9 Fachada Bodega 6 – Ingenio Azucarero en estudio.*



*Figura 2.10 Estructura metálica de soporte al centro de la Bodega 6 – Inyectores de aire ubicados en la parte más alta de la bodega.*



*Figura 2.11 Almacenamiento en Bodega 6, estibas de 70 tendidos formadas al interior - banda utilizada para el despacho de azúcar.*

Tabla 2.2 Tabla comparativa de características estructurales entre bodega 5 y bodega 6

	<b>Bodega 5 - B5</b>	<b>Bodega 6 - B6</b>
Año de Construcción	2007	2011
Orientación	Noreste	Noreste
Ancho (m)	57.88	57.9
Largo (m)	55.55	63.61
Altura (m)	26.4	14.98
Altura paredes de mampostería (m)	4	4
Altura paredes estructura metálica (m)	18.96	7.7
Total altura de paredes (m)	22.96	11.7
Numero de puertas	puertas frontal y posterior	2 , 2
	puertas laterales	1 , 1
Ancho de puertas (m)	puertas frontal y posterior	8.2
	puertas laterales	5.85
Alto de puertas (m)	puertas frontal y posterior	3.4
	puertas laterales	3.4
Numero de Ventiladores	10	10
Numero de inyectores de aire	8	8
Cantidad máxima de estibas	20	24
Capacidad de almacenamiento (sacos 50 kg)	522,700	627,240

2.2 Enfoque metodológico de la investigación para la evaluación del color en azúcar durante su almacenamiento.

En base al OBJETIVO GENERAL del trabajo: *“Evaluar el aumento de color en azúcar durante el periodo de almacenamiento en bodegas, por efecto de condiciones de almacenaje”*

Se identifican como variables medibles para el estudio: el tiempo de almacenamiento, las condiciones ambientales en bodegas (temperatura y humedad relativa) y el monitoreo de color de cada muestra. Y como factores no medibles pero que generan influencia en el estudio, las características estructurales propias de cada una de las bodegas y las medidas de producción que llevan a la elaboración del azúcar bajo parámetros específicos que también son influencia para contribuir a la evaluación del aumento de color en azúcar almacenada en bodegas.

La variable de interés que se busca monitorear es el color del azúcar almacenada en bodegas, previendo para algunos tipos de azúcar poca variabilidad dado que la calidad del azúcar así se comporta, además por el margen de error establecido por la metodología ICUMSA para análisis de color, que hace que el análisis propiamente no tenga una respuesta exacta, sino siempre un rango de aceptación, con respecto al margen de dicho error dependiendo de cada calidad de azúcar.

La investigación a realizar será un tipo de estudio no experimental, dado que no se realizará la manipulación deliberada de variables y sólo se observarán datos del conjunto de variables en estudio en su ambiente natural para después ser analizados.

Ya que en la presente investigación se pretende analizar cambios a través del tiempo de una variable en específico, el color del azúcar y además la posible relación de esta respecto al resto de variables a monitorear, condiciones ambientales en bodega, etc.; se dispondrá de un diseño longitudinal de panel, con el cual se proyecta estudiar a través de un tiempo determinado de 1 año, todas las variables involucradas en el almacenamiento del azúcar en bodegas y el color del azúcar.

#### 2.2.1 Aplicación de un muestreo probabilístico aleatorio – estratificado, para el estudio realizado

Al momento de iniciar el estudio, el total de estibas almacenadas era de 49, distribuidas dentro de 4 bodegas, ya para el ingenio en estudio solo dentro de estas bodegas es almacenada azúcar ensacada: bodega 3 (B3), bodega 4 (B4), bodega 5 (B5), y bodega 6 (B6).

Para el muestreo probabilístico aleatorio se trabajó con un nivel de confianza del 90% obteniendo que el número total de muestras a tomar para realizar el análisis era de 28. Pero, al tener diferentes calidades de azúcar almacenada en las bodegas, se tienen entonces diferentes estratos que deben ser tomados en cuenta, y proporcionalmente a la cantidad total de estibas que se encuentran almacenadas al

momento de iniciar con el monitoreo, por lo que se realizó también un cálculo para para determinar la cantidad de muestras por tipo de estrato (tipo de azúcar), esto se realizó con la formula para muestreo estratificado, con este tipo de muestreo se obtuvo un tamaño de muestra por tipo de azúcar, detallado en la Tabla 2.1 y con la formula detallada a continuación:

$$n_i = n \frac{N_i}{N}$$

Donde:

$n_i$  : tamaño de la muestra por cada “i” estrato

$n$  : número de la muestra (calculado con muestreo probabilístico aleatorio)

$N_i$  : número del estrato “i”

$N$  : número total de elementos de la población

La selección del número de muestra por bodega se realizó bajo el criterio de disponibilidad y procurando abarcar todas los tipos de azúcar almacenados en cada bodega, puesto que no en todas las bodegas es almacenado todo tipo de azúcar, entonces, se tomó dentro de las bodegas que contenían cada tipo, una cierta cantidad de muestras considerando también la factibilidad de la toma de muestra por el acceso físico a las estibas.

*Tabla 2.3 Tamaño de muestra a partir de las proporciones de los tipos de azúcar almacenada y cantidad de muestras almacenadas por bodega.*

ESTRATO (Tipo de Azúcar)	POBLACION (número de estibas de azúcar)	% de muestras respecto al total estibas de azúcar	TAMAÑO DE LA MUESTRA	Número de muestras - Bodega de almacenamiento
CRUDA	8	16.33	4.57 ≈ 5	3- B4 ; 2- B5
SULFITADA	26	53.05	14.85 ≈ 14	5- B4 ; 4- B5 ; 5- B6
BLANCO SUPERIOR	8	16.33	4.57 ≈ 5	2- B3 ; 3- B6
REFINADA	7	14.29	4.00 = 4	3- B5 ; 1- B6
TOTAL	49	100.00	28	

### 2.3 Fase experimental

La caracterización de cada una de las bodegas en estudio se complementa con un recuento de sus características ambientales. Se realizó el monitoreo de color en el azúcar, a las muestras seleccionadas para este propósito y se expone cual fueron los procedimientos para realizar estos controles y los datos obtenidos a partir de estos puntos.

#### 2.3.1 Monitoreo de variables ambientales en bodegas de azúcar en estudio

El monitoreo de las variables ambientales dentro de las bodegas se llevó a cabo específicamente para dos variables: la Temperatura ambiental y la Humedad Relativa. Este monitoreo dentro de las bodegas es un control que se maneja periódicamente en el ingenio en estudio, por lo que estos datos fueron tomados del registro que se mantiene actualizado en el laboratorio.

El control de las variables ambientales se realiza de la siguiente manera: en cada una de las bodegas, se tiene en un equipo medidor de condiciones ambientales, ubicado estratégicamente a la altura máxima que alcanzan las estibas, en un punto medio de las bodegas, para las bodegas 5 y 6, y en un punto al costado de las estibas para las bodegas 3 y 4. Estos equipos se han programado para capturar las condiciones ambientales a cada hora, ininterrumpidamente cada mes, solo para la descarga de los datos, a final de cada mes.

El análisis de los datos de este control se realiza mensualmente, se calcula para el total de los datos por día de cada bodega, los valores promedio.

#### 2.3.2 Caracterización de condiciones ambientales de bodegas de almacenamiento de azúcar.

A pesar de que las bodegas en estudio están ubicadas geográficamente en el mismo lugar, cada una posee sus propias condiciones ambientales. Temperatura y Humedad Relativa fueron monitoreadas para cada bodega (Tabla 2.2 y Tabla 2.3). Gráficamente los comportamientos de las condiciones ambientales monitoreadas se pueden observar en la Figura 2.12 y Figura 2.13, respectivamente, las tendencias entre las bodegas se mantienen, dados los cambios en el tiempo meteorológico que se va sufriendo en cada época del año, que obviamente afecta a todas las bodegas,

pero al interior las condiciones denotan, en comparación entre ellas, una diferencia. En cuanto a la temperatura dentro de cada bodega, la bodega 4 es la que se destaca con temperaturas promedio mensuales más bajas entre 26.39 y 29.31°C, mientras que la bodega 6 es la que presenta temperaturas promedio mensuales más altas entre 27.93 y 33.04 °C. La diferencia entre el promedio anual de temperatura más alta y el promedio anual de temperatura más baja fue de 2.49°C, obtenidos en la Bodega 6 con promedio anual de temperatura más alta 30.62°C y la bodega 4 obtuvo el promedio de temperatura más baja 28.12°C.

En cuanto a la humedad relativa dentro de cada bodega, la bodega 4 es la que se destaca con humedad relativa más alta entre marzo y junio y noviembre a marzo con valores entre 53.34 y 90.24%, mientras que, entre julio y octubre, la bodega 3 fue la que presentó los valores más altos entre 70.84 y 76.35%; la bodega 6 es la que presenta humedad relativa más baja en todos los meses en que se realizó el estudio con valores entre 39.97 y 65.95%, menos en enero que fue la bodega 5 la que presentó la humedad relativa más baja con 59.74%. La diferencia entre el promedio anual de humedad relativa más alta y el promedio anual de humedad relativa más baja fue de 11.99%, obtenido entre la Bodega 4 con promedio anual de humedad relativa más alta 69.89% y la bodega 6 con promedio anual de humedad relativa más baja 57.9%.

*Tabla 2.4 Temperaturas mensuales promedio monitoreadas en bodegas de almacenamiento de azúcar.*

MES	T°C prom B3	T°C prom B4	T°C prom B5	T°C prom B6
marzo	30.55	29.06	30.37	32.06
abril	31.44	<b>29.31</b>	31.32	<b>33.04</b>
mayo	29.87	28.57	30.44	31.24
junio	28.22	27.44	28.65	30.04
julio	29.90	29.24	29.82	31.53
agosto	29.58	28.64	29.78	31.09
septiembre	28.67	28.14	28.90	30.16
octubre	28.25	27.76	28.48	29.74
noviembre	†	27.34	28.64	29.67
diciembre	28.25	26.83	28.14	28.98
enero	27.76	<b>26.39</b>	28.42	<b>27.93</b>
febrero	29.63	28.36	28.89	30.60
marzo	30.12	28.54	30.43	31.96
<b>PROMEDIO</b>	<b>29.35</b>	<b>28.12</b>	<b>29.41</b>	<b>30.62</b>

† El dato faltante para el monitoreo de temperatura, para la bodega 3, es debido a que para ese mes el equipo con el que se realizaba el monitoreo tuvo un desperfecto y no se logró recuperar los datos registrados con este equipo.

Tabla 2.5 Humedades relativas mensuales promedio monitoreadas en bodegas de almacenamiento de azúcar.

MES	%HR prom B3	% HR prom B4	% HR prom B5	% HR prom B6
marzo	49.30	<b>53.34</b>	44.44	<b>39.97</b>
abril	56.26	60.99	47.90	44.05
mayo	69.81	77.24	61.72	58.00
junio	77.64	<b>90.24</b>	71.37	65.80
julio	70.84	67.54	65.31	58.94
agosto	71.32	69.18	65.62	60.14
septiembre	76.35	73.02	72.16	<b>65.95</b>
octubre	73.60	69.80	70.30	63.05
noviembre	‡	74.30	68.38	63.43
diciembre	65.62	70.58	64.70	61.17
enero	63.85	68.43	59.74	60.07
febrero	68.69	71.93	63.55	61.31
marzo	56.36	61.92	56.74	50.79
<b>PROMEDIO</b>	<b>66.64</b>	<b>69.89</b>	<b>62.45</b>	<b>57.90</b>

Esta relación entre las condiciones, a mayor temperatura menos humedad relativa, y viceversa, sucede ya que, si la temperatura del aire aumenta y el contenido de humedad permanece constante, la humedad relativa disminuye. Esto es así porque, al aumentar la temperatura aumenta la máxima cantidad de vapor de agua que puede contener esa masa de aire, mientras que el contenido real en vapor de agua de esa masa de aire permanece constante. Es decir, el grado de saturación del aire disminuye porque al aumentar la temperatura tiene mayor capacidad para contener vapor de agua; y si el contenido de humedad (de vapor de agua) en el aire permanece constante y su temperatura desciende, la humedad relativa aumenta. Ya que, al disminuir la temperatura del aire, disminuye su capacidad para contener vapor de agua. Si el aire continúa enfriándose llegará un momento en que podrá alcanzar el punto de saturación. A partir de ese momento podría empezar la condensación del vapor de agua.

---

‡ El dato faltante para el monitoreo de humedad relativa, para la bodega 3, es debido a que para ese mes el equipo con el que se realizaba el monitoreo tuvo un desperfecto y no se logró recuperar los datos registrados con este equipo.

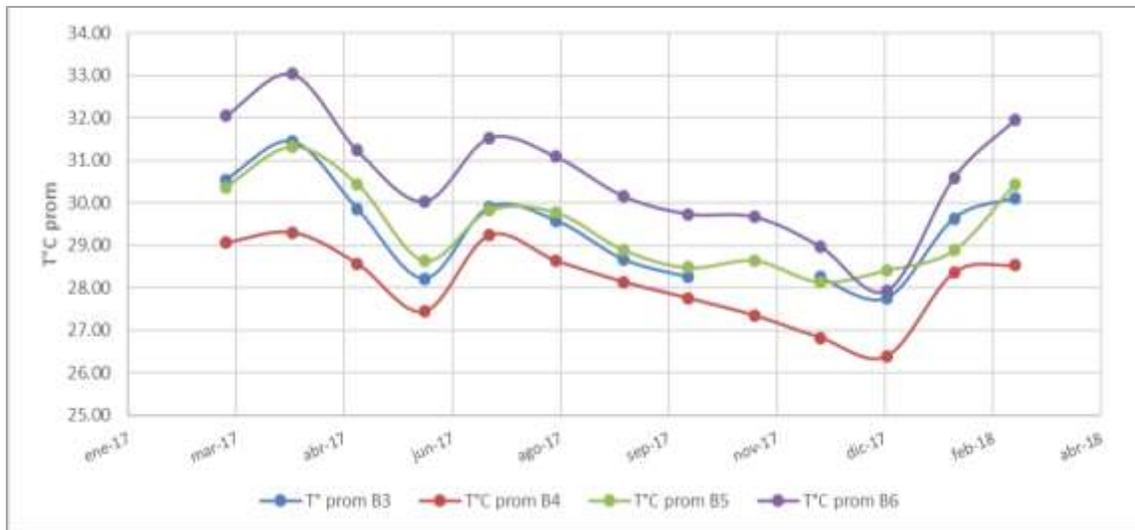


Figura 2.12 Gráfico de Temperatura promedio en bodegas de azúcar, en un año calendario para el ingenio azucarero en estudio.

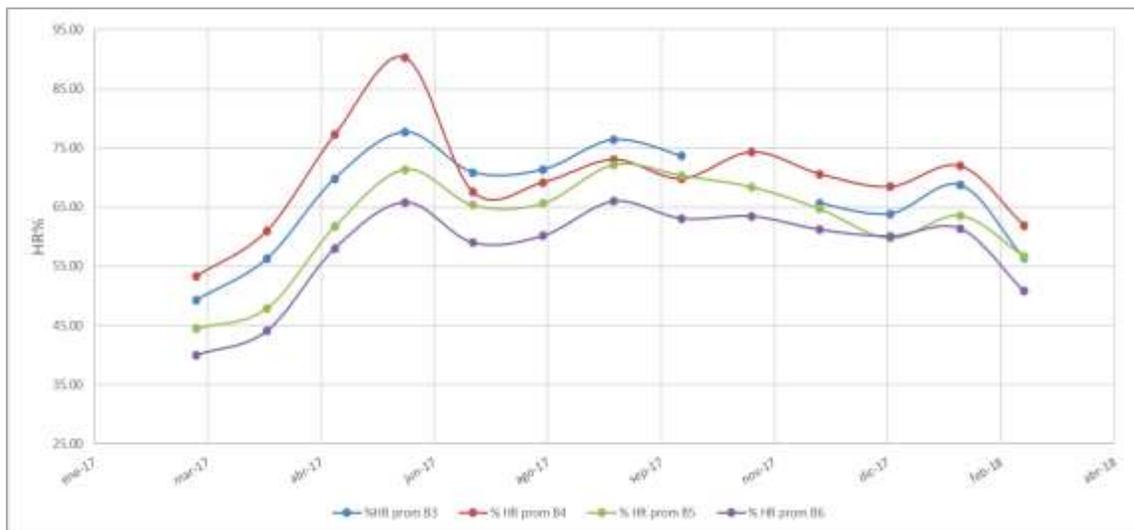


Figura 2.13 Gráfico de Humedad Relativa promedio en bodegas de azúcar, en un año calendario, para el ingenio azucarero en estudio.

### 2.3.3 Monitoreo de muestras de azúcar en el ingenio en estudio

De acuerdo con el cálculo estadístico realizado en el diseño experimental, resumido en la Tabla 2.1, el detalle de las muestras tomadas para el monitoreo es:

- Cinco muestras de **azúcar cruda ensacada**, dos muestras correspondían a azúcar almacenada en la bodega 5 (B5) y tres en la bodega 4 (B4).
- Catorce muestras de **azúcar blanca sulfitada**, cinco muestras correspondían a azúcar almacenada en la bodega 4 (B4), cuatro en la bodega 5 (B5) y cinco en la bodega 6 (B6).

- c) Nueve muestras de **azúcar de la refinería**, de las cuales 5 correspondieron a **azúcar blanco superior**; tres muestras correspondían a azúcar almacenada en la bodega 6 (B6), y dos en la bodega 3 (B3). Las otras cuatro muestras de azúcar pertenecen a **azúcar refinada**, tres muestras correspondientes azúcar almacenada en la bodega 5 (B5) y una en la bodega 6 (B6).

Las muestras monitoreadas corresponden al azúcar de un ingenio en estudio, y fueron determinadas, además del procedimiento metodológico, por la disposición de las muestras, también por el interés de realizar el análisis en todos los tipos de azúcar. Para el momento de inicio de monitoreo se buscó en cada bodega donde se había almacenado cada tipo de azúcar, y se distribuyó la cantidad de muestras determinadas entre cada bodega en que se contenían, en otras palabras, esto se realizó con objetivo de cubrir todas las bodegas de azúcar de producto ensacado y todos los tipos de azúcar, en búsqueda de un análisis más completo, ya que entre zafra y zafra, para el ingenio en estudio, el almacenamiento en cada bodega, puede variar de producto, dependiendo de la producción que se tenga y del planeamiento hecho para el despacho.

Se identificaron y rotularon las muestras seleccionadas, estas se tomaron dentro de las estibas a las que pertenecían (Figura 2.14) y conforme el despacho de azúcar se realizó y las estibas fueron enviadas a los respectivos clientes, las muestras asignadas para el monitoreo fueron ubicadas dentro de su respectiva bodega, en una tarima (Figura 2.15).

La toma de muestra se llevó a cabo aproximadamente durante un año calendario, realizándose diez tomas de muestras para cada muestra de cada tipo de azúcar monitoreada. El procedimiento de la toma de muestra se realiza con un tomamuestra metálico, el cual es introducido dentro del saco sin dañarlo; este tomamuestra consta de una punta muy aguda que logra entrar en el entretejido de los sacos sin romperlos, por lo que se obtiene la muestra cada vez que se necesita, sin dejar expuesta el resto de la muestra dentro del saco. Para cada muestreo realizado, se tomó alrededor de 500g de muestra, haciendo introducir el

tomamuestra dentro del saco y dejando fluir el azúcar por medio de este, depositándola inmediatamente dentro de una bolsa de muestreo (Figura 2.16).



*Figura 2.14 Muestras colocadas dentro de sus respectivas estibas.*



*Figura 2.15 Muestras colocadas en tarimas en sus respectivas bodegas de almacenamiento.*



Figura 2.16 Toma de muestra de azúcar.

La realización de los análisis de color de cada una de las muestras, para cada uno de los monitoreos, se llevó a cabo en el laboratorio de calidad del ingenio en estudio. Dentro de este laboratorio se tiene cada técnica analítica desarrollada bajo la referencia principal de ICUMSA; por este motivo, para los análisis realizados, se tomó como referencia primaria las técnicas analíticas internas del laboratorio del ingenio en estudio, y no directamente las de ICUMSA, aunque para fines prácticos y de metodología, y particularmente para el caso del análisis de color en azúcar, entre ambas referencias no se presentan mayores diferencias.

- I. Azúcar Crudo: LAB-TA-14 (4.2) – ICUMSA Método GS1/3-7 (2011)  
*Determinación del color en solución de azúcares crudos, azúcares morenos y jarabes coloreados a pH 7.0.*

Se homogeniza la muestra de azúcar que será objeto de análisis, en una balanza digital se pesa 30 g +/-0.01 g de azúcar y se adicionan 70 g +/-0.01 g de agua destilada. Se disuelve la muestra por agitación. Se filtra la solución utilizando un filtro de membrana de nitrato de celulosa con tamaño de poro de 0.45  $\mu\text{m}$ . y un prefiltro de microfibras de vidrio con tamaño de poro de 1.2  $\mu\text{m}$  y con ayuda de una

bomba de vacío. Con un pHmetro, se procede a ajustar el pH de la solución a 7.0 neutralizando con solución de NaOH 0.05M o Ácido clorhídrico 0.05M, según se tenga una solución ácida o alcalina, manteniendo la solución en agitación constante con un agitador magnético. A esta solución se le lee el Brix, con un refractómetro. Con un espectrofotómetro a una longitud de onda de 420 nm, se realiza un ajuste a cero utilizando agua destilada como blanco, y se lee la absorbancia de la muestra, tanto el blanco como la lectura de la muestra se realiza con una celda de cuarzo de 1 cm. Resultados son calculados con la siguiente formula:

$$\text{Color (UI)} = \text{abs solución estandarizada} \times F1 \times 1000$$

Dónde:

F1 = Factor, según % Brix de la solución estandarizada

Este método puede ser aplicado para la determinación del color en solución del azúcar crudo, color de azúcar blanco de plantación de colores altos, colores de azúcares refinados parcialmente, color de azúcares morenos y jarabes coloreados. El método ICUMSA Oficial, está concebido para azúcares de un color mayor de 250 UI (ICUMSA, 2015). La reproducibilidad y repetibilidad del método se detalla en el Anexo B.

## II. Azúcar Blanco Sulfitado: LAB-TA-13 (4.4) – ICUMSA Método GS2/3-9 (2005) *Determinación del color en solución de azúcar blanco a pH 7.0.*

Se homogeniza la muestra de azúcar que será objeto de análisis, en una balanza digital se pesa 50 g +/-0.01 g de azúcar y se adicionan 50 g +/-0.01 g de agua destilada. Se disuelve la muestra por agitación. Se filtra la solución utilizando un filtro de membrana de nitrato de celulosa con tamaño de poro de 0.45 µm. y un prefiltro de microfibra de vidrio con tamaño de poro de 1.2 µm y con ayuda de una bomba de vacío. Con un pHmetro, se procede a ajustar el pH de la solución a 7.0 neutralizando con solución de NaOH 0.05M o Ácido clorhídrico 0.05M, según se tenga una solución ácida o alcalina, manteniendo la solución en agitación constante con un agitador magnético. A esta solución se le lee el Brix, con un refractómetro. Con un espectrofotómetro a una longitud de onda de 420 nm, se realiza un ajuste a cero utilizando agua destilada como blanco, y se lee la absorbancia de la muestra,

tanto el blanco como la lectura de la muestra se realiza con una celda de cuarzo de 1 cm. Resultados son calculados con la siguiente formula:

$$\text{Color (UI)} = \text{abs solución estandarizada} \times F1 \times 1000$$

Dónde:

F1 = Factor, según %Brix de la solución estandarizada

Este método puede ser aplicado para toda clase de azúcares cristalizados o azúcares blancos en polvo y jarabes muy puros de un color hasta 600UI (ICUMSA, 2015). La reproducibilidad y repetibilidad del método se detalla en el Anexo B.

### III. Azúcar Refinada: LAB-TA-21 (4.4) – ICUMSA Método GS2/3-9 (2005) *Determinación del color en solución de azúcar blanco a pH 7.0.*

Se homogeniza la muestra de azúcar que será objeto de análisis, en una balanza digital se pesa 80 g +/-0.01 g de azúcar y se adicionan 80 g +/-0.01 g de agua destilada. Se disuelve la muestra por agitación. Se filtra la solución utilizando un filtro de membrana de nitrato de celulosa con tamaño de poro de 0.45 µm. y un prefiltro de microfibra de vidrio con tamaño de poro de 1.2 µm y con ayuda de una bomba de vacío. Con un pHmetro, se procede a ajustar el pH de la solución a 7.0 neutralizando con solución de NaOH 0.05M o Ácido clorhídrico 0.05M, según se tenga una solución ácida o alcalina, manteniendo la solución en agitación constante con un agitador magnético. A esta solución se le lee el Brix, con un refractómetro. Con un espectrofotómetro a una longitud de onda de 420 nm, se realiza un ajuste a cero utilizando agua destilada como blanco, y se lee la absorbancia de la muestra, tanto el blanco como la lectura de la muestra se realiza con una celda de cuarzo de 10 cm. Resultados son calculados con la siguiente formula:

$$\text{Color (UI)} = \text{abs solución estandarizada} \times F1 \times 1000$$

Dónde:

F1 = Factor, según %Brix de la solución estandarizada

Este método puede ser aplicado para toda clase de azúcares cristalizados o azúcares blancos en polvo y jarabes muy puros de un color hasta 600 UI (ICUMSA, 2015). La reproducibilidad y repetibilidad del método se detalla en el Anexo B.

Se obtuvieron datos de color estandarizado para todas las muestras, bajo sus respectivas metodologías, descritas anteriormente. Estas metodologías son la máxima referencia en la industria azucarera, y dentro del mercado internacional, son las metodologías primordialmente utilizadas para la determinación de este y muchos otros parámetros de calidad; además del uso por esta industria, los métodos de ICUMSA están reconocidos por autoridades como la Comisión del Codex Alimentarius, la OIML (Organización Internacional de Metrología Legal), la UE y el Food Chemicals Codex de los EE. UU (ICUMSA, 2015), lo que hace ineludible la utilización de estos métodos para poder ser comparables a nivel mundial con clientes y laboratorios acreditados.

### 3.0 Análisis de resultados del aumento de color en azúcar almacenada en bodegas

Para cada una de las bodegas donde se almacena azúcar ensacada, se les realizó mediciones de campo e investigación de archivos de construcción de las bodegas del ingenio en estudio, para reunir la información necesaria que se contempla en cada una de las caracterizaciones realizadas, para describir la infraestructura física de las bodegas donde es almacenada el azúcar. Con los datos que se obtuvieron para cada una de las muestras de azúcar del monitoreo de color realizado y los datos del monitoreo de condiciones ambientales en cada una de las bodegas de almacenamiento, se realizó un análisis comparativo entre muestras por bodega y con relación a la temperatura y humedad relativa de cada bodega respectivamente. Además, se realizó un análisis comparativo entre bodegas de las condiciones ambientales de cada una de ellas.

Los datos de temperatura y humedad relativa que se muestran en las tablas de esta sección corresponden a los promedios de temperaturas/humedades relativas de los días entre cada monitoreo, de acuerdo al promedio mensual de cada bodega, durante el cual estuvieron almacenadas las muestras a lo largo de cada monitoreo.

Cada Bodega analizada es representada con la letra “B” seguida del número de bodega y cada Estiba analizada es representada con la letra “E” seguida por el número de estiba que representa.

Se presenta en la sección 3.4 un análisis estadístico de varianza para las diferencias de cambios de color en azúcar en bodegas, este análisis se realizó para cada tipo de azúcar que se retomó para el estudio realizado (azúcar cruda ensacada, azúcar blanca sulfitada, azúcar blanco superior y azúcar refinada).

### 3.1 Resultados de azúcar cruda ensacada

Se tomó como dato inicial de color, el dato obtenido durante el proceso de producción, y posteriormente se realizaron diez tomas de muestra de seguimiento a lo largo de un año calendario; para tres muestras en la bodega 4 y dos muestras en la bodega 5, los datos obtenidos a lo largo del periodo de almacenamiento y el monitoreo de la temperatura llevado a cabo en las bodegas correspondientes a las muestras de azúcar cruda ensacada, son los detallados en las Tabla 3.1 y Tabla 3.2. En la bodega 4, se alcanzó un 182.19% de aumento de color como máximo para la muestra de la estiba 8 (B4 E8), con un color de 1775 UI que inició con un color de 629 UI, en comparación a la bodega 5 donde se alcanzó un 101.09% de aumento de color como máximo para la muestra de la estiba 2 (B5 E2), con un color de 1482 UI que inició con un color de 737 UI; para este producto no se muestra un mayor aumento para la bodega 5 que es la que cuenta con un promedio mayor de temperatura, pero en cambio, si se demostró la tendencia de mayor desarrollo de color en la muestra que contaba con mayor color inicial. Se obtuvo para todas las muestras almacenadas en la bodega 4, porcentajes de aumento de color mayores de los que se obtuvieron para la bodega 5, aun cuando ésta bodega es la que tiene mayor promedio de temperatura en comparación a la bodega 4, lo cual indica que a pesar del impacto que puede tener la temperatura en el desarrollo de color en el almacenamiento, para el azúcar cruda ensacada no se evidencia una relación precisa entre estas variables.

Como se especifica en la sección 1.5 para el azúcar cruda ensacada no se tiene parámetro máximo de color según normativa salvadoreña, pero para clientes en el extranjero se suelen manejar valores máximos entre 1,500 a 1,800 UI<sup>§</sup>, por lo que los colores finales obtenidos para las muestras de azúcar almacenadas en la bodega 4 excederían los valores requeridos, principalmente la muestra de la estiba 4, que alcanzó un color de 1,884 UI, para la muestras de la bodega 5 estarían dentro de parámetro, pero acercándose mucho a los límites del cumplimiento.

---

<sup>§</sup> Dato obtenido del ingenio en estudio, para contratos de clientes en el extranjero, 2018.

*Tabla 3.1 Datos experimentales de aumento de color (UI) en el tiempo para azúcar cruda ensacada y monitoreo de temperatura en Bodega 4.*

Muestra	Día de muestreo	Azúcar Cruda B4 – Unidades de color UI							
		B4 E 4	% aumento de color	T°C prom B4	B4 E 6	% aumento de color	B4 E 8	% aumento de color	T°C prom B4
M0	0	702	-	27.8	682	-	629	-	29.06
M1	40	760	8.26	28.44	740	8.50	746	18.60	28.44
M2	75	1445	105.84	29.24	1126	65.10	1231	95.71	29.24
M3	113	1536	118.80	28.64	1156	69.50	1331	111.61	28.64
M4	148	1639	133.48	28.14	1174	72.14	1423	126.23	28.14
M5	180	1653	135.47	27.76	1337	96.04	1454	131.16	27.76
M6	215	1680	139.32	27.34	1372	101.17	1497	138.00	27.34
M7	255	1712	143.87	26.83	1426	109.09	1553	146.90	26.83
M8	293	1798	156.13	26.39	1491	118.62	1596	153.74	26.39
M9	328	1832	160.97	28.36	1596	134.02	1708	171.54	28.36
M10	366	1884	168.38	30.43	1647	141.50	1775	182.19	30.43

*Tabla 3.2 Datos experimentales de aumento de color (UI) en el tiempo para azúcar cruda ensacada y monitoreo de temperatura en Bodega 5.*

Muestra	Día de muestreo	Azúcar Cruda B5 – Unidades de color UI				
		B5 E1	% aumento de color	B5 E2	% aumento de color	T°C prom B5
M0	0	711	-	737	-	30.37
M1	40	824	15.89	824	11.80	30.14
M2	75	999	40.51	1027	39.35	29.82
M3	113	1044	46.84	1094	48.44	29.78
M4	148	1118	57.24	1142	54.95	28.90
M5	180	1143	60.76	1262	71.23	28.48
M6	215	1175	65.26	1286	74.49	28.64
M7	255	1199	68.64	1300	76.39	28.14
M8	293	1235	73.70	1312	78.02	28.42
M9	328	1294	82.00	1390	88.60	28.89
M10	366	1334	87.62	1482	101.09	28.54

Se realizó además el análisis de datos para el azúcar cruda ensacada, en base a promedios parciales (Tabla 3.3), un promedio realizado para los primeros cinco monitoreos, que es donde se observa una mayor temperatura promedio para ambas bodegas (B4 = 28.63°C y B5 = 31.31°C), y un promedio para los últimos cinco

monitoreos, cuando la temperatura fue menor en las bodegas (B4= 27.53°C y B5= 28.83°C).

Se muestra una tendencia ascendente más marcada durante el periodo donde la temperatura en la bodega fue mayor con aumentos entre 86 y 190 UI, mientras que, para el periodo de temperatura más baja, este comportamiento se vio disminuido con aumentos entre 38 y 64 UI.

Así también, se logra visualizar que para las muestras que iniciaron con colores de producción mayores, también presentan un mayor promedio general de aumento de color, para la muestra B4 E4, con promedio general de aumento de 118 UI, y para la muestra B5 E2, con promedio general de aumento de 75 UI.

*Tabla 3.3 Diferencias de aumento de color respecto a cada toma de muestra consecutiva, promedios parciales de aumento, y promedio general de aumento para cada muestra de azúcar cruda ensacada.*

MUESTRA	M0-M1	M1-M2	M2-M3	M3-M4	M4-M5	promedio	M5-M6	M6-M7	M7-M8	M8-M9	M9-M10	promedio	promedio general
<b>B4 E 4</b>	58	685	91	103	14	190	27	32	86	34	52	46	118
<b>B4 E 6</b>	58	386	30	18	163	131	35	54	65	105	51	62	97
<b>B4 E 8</b>	117	485	100	92	31	165	43	56	43	112	67	64	115
<b>B5 E1</b>	113	175	45	74	25	86	32	24	36	59	40	38	62
<b>B5 E2</b>	87	203	67	48	120	105	24	14	12	78	92	44	75

En las Figura 3.1 y Figura 3.2 se detallan de manera gráfica el comportamiento de cada una de las muestras, en comparación al comportamiento de las temperaturas promedio. Se puede apreciar que, para los primeros meses de seguimiento, que aproximadamente estuvieron comprendidos entre los meses de febrero/marzo a los meses de agosto/septiembre, la temperatura fue mayor por la presencia de la época del verano en el país, mientras que, para los otros meses, aproximadamente entre agosto/septiembre a febrero/marzo, los meses comprendidos corresponden a la época más fría del año en el país. Aunque para la bodega 4, los dos últimos puntos de temperatura presentan una elevación, lo que coincide con los meses de febrero/marzo que vuelve a empezar la época calurosa, y por la estructura y ubicación de la bodega se pudo generar el aumento que se ve reflejado en la Figura 3.1.

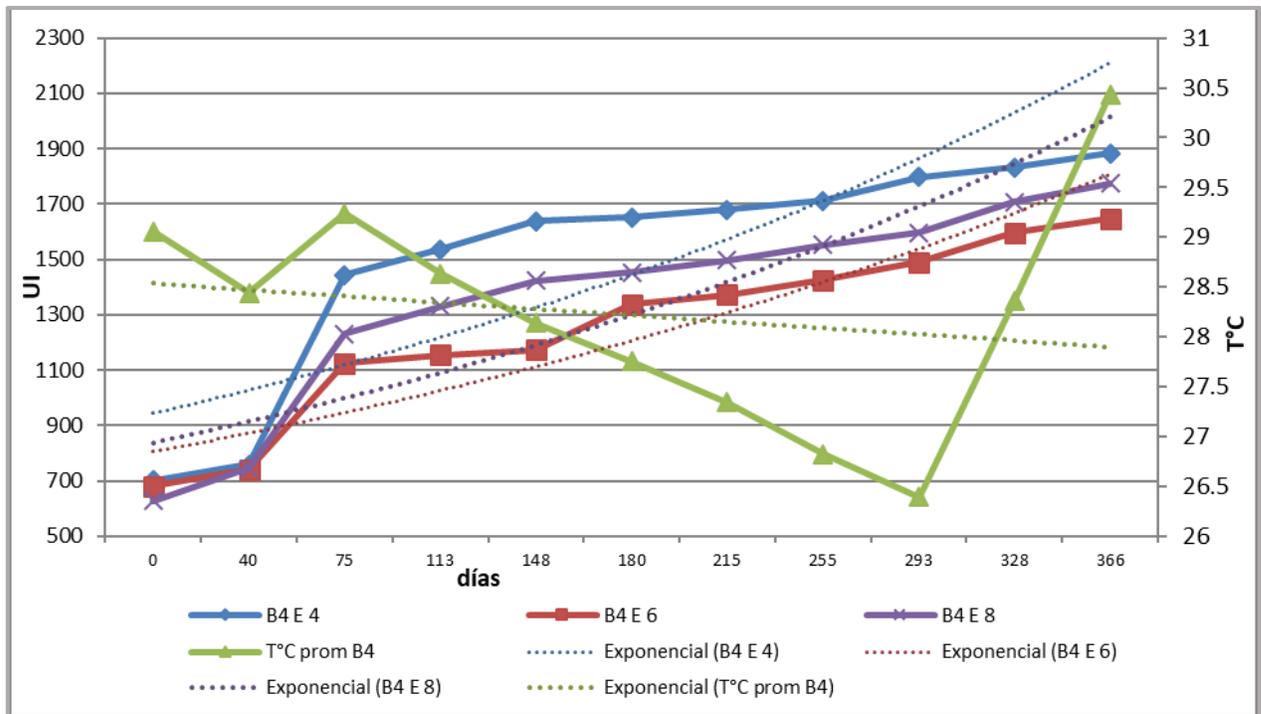


Figura 3.1 Gráfico obtenido para aumento de color (UI) en azúcar cruda ensacada en el tiempo y temperaturas (°C) promedio en bodega 4.

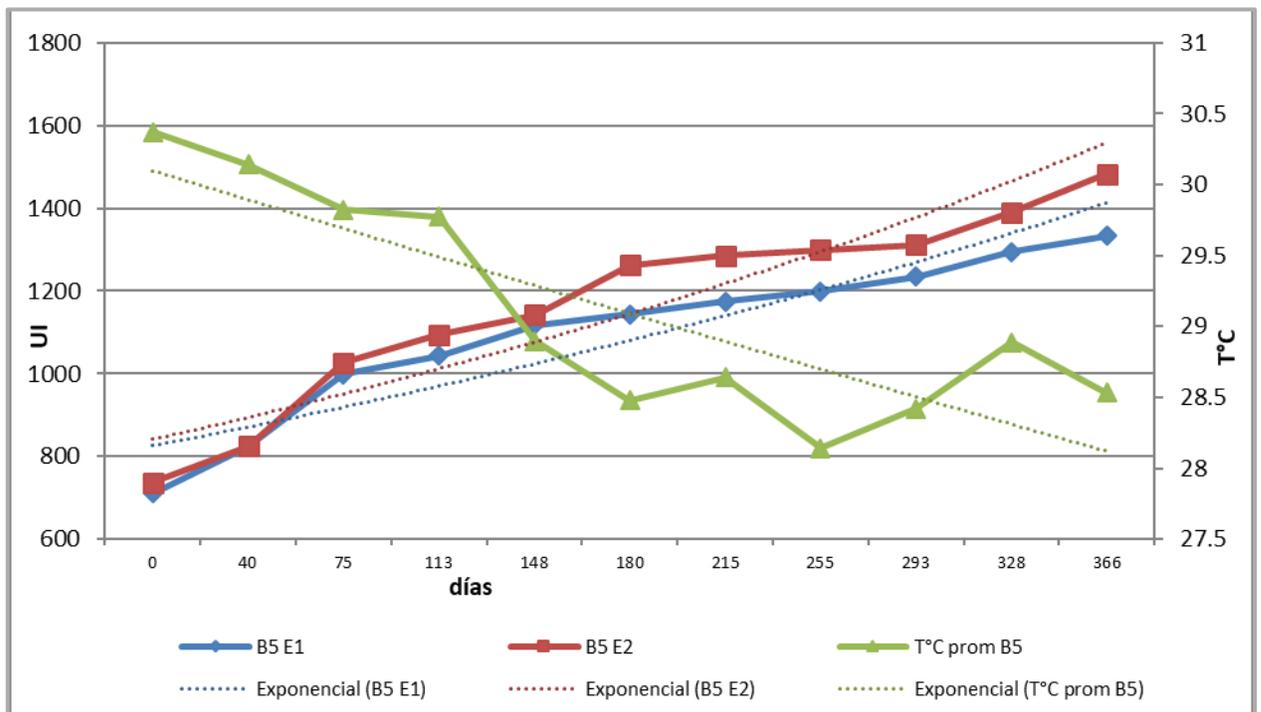


Figura 3.2 Gráfico obtenido para aumento de color (UI) en azúcar cruda ensacada en el tiempo y temperaturas (°C) promedio en bodega 5.

El mismo análisis de seguimiento de color se realizó, pero con relación a la humedad relativa de cada bodega donde se tuvo almacenada cada muestra de azúcar cruda ensacada (Tabla 3.4 y Tabla 3.5). En este análisis se mira un alza de humedad relativa en los meses de lluvia típicos del país, aproximadamente entre julio/noviembre con humedad el promedio máximo registrado para la bodega 4 de 78.34 % y para la bodega 5 de 72.16 %, pero no se encuentra una relación marcada entre esta variable con el aumento de color en el azúcar almacenada. Se debe tener en cuenta que en las condiciones de almacenamiento influyen la protección del producto para evitar el contacto directo con la humedad relativa en cambio con temperatura no se puede evitar la interacción con el producto almacenado.

Se presenta un análisis gráfico del comportamiento de la humedad relativa para cada bodega donde se realizó en seguimiento de azúcar cruda ensacada en conjunto con el seguimiento de color para cada muestra (Figura 3.3 y Figura 3.4). Se logra ver reflejado el comportamiento de la humedad relativa para la bodega 4 con humedades relativas promedio entre 53.32 y 90.24 % y para la bodega 5 con humedades relativas promedio entre 44.44 y 72.16 %.

*Tabla 3.4 Datos experimentales de color (UI) en azúcar cruda ensacada y monitoreo de humedad relativa (%) en Bodega 4.*

Muestra	Día de muestreo	Azúcar Cruda B4 – Unidades de color UI							
		B4 E 4	% aumento de color	HR% prom B4	B4 E 6	% aumento de color	B4 E 8	% aumento de color	HR% prom B4
M0	0	702	-	59.4	682	-	629	-	53.34
M1	40	760	8.26	60.99	740	8.50	746	18.60	60.99
M2	75	1445	105.84	78.34	1126	65.10	1231	95.71	78.34
M3	113	1536	118.80	69.18	1156	69.50	1331	111.61	69.18
M4	148	1639	133.48	73.02	1174	72.14	1423	126.23	73.02
M5	180	1653	135.47	69.80	1337	96.04	1454	131.16	69.80
M6	215	1680	139.32	74.30	1372	101.17	1497	138.00	74.30
M7	255	1712	143.87	70.58	1426	109.09	1553	146.90	70.58
M8	293	1798	156.13	68.43	1491	118.62	1596	153.74	68.43
M9	328	1832	160.97	71.93	1596	134.02	1708	171.54	71.93
M10	366	1884	168.38	61.92	1647	141.50	1775	182.19	61.92

Tabla 3.5 Datos experimentales de aumento de color (UI) en el tiempo para azúcar cruda ensacada y monitoreo de humedad relativa (%) en Bodega 5.

Muestra	Día de muestreo	Azúcar Cruda B5 – Unidades de color UI				
		B5 E1	% aumento de color	B5 E2	% aumento de color	HR% prom B5
M0	0	711	-	737	-	44.44
M1	40	824	15.89	824	11.80	47.90
M2	75	999	40.51	1027	39.35	66.13
M3	113	1044	46.84	1094	48.44	65.62
M4	148	1118	57.24	1142	54.95	72.16
M5	180	1143	60.76	1262	71.23	70.30
M6	215	1175	65.26	1286	74.49	68.38
M7	255	1199	68.64	1300	76.39	64.70
M8	293	1235	73.70	1312	78.02	59.74
M9	328	1294	82.00	1390	88.60	63.55
M10	366	1334	87.62	1482	101.09	56.74

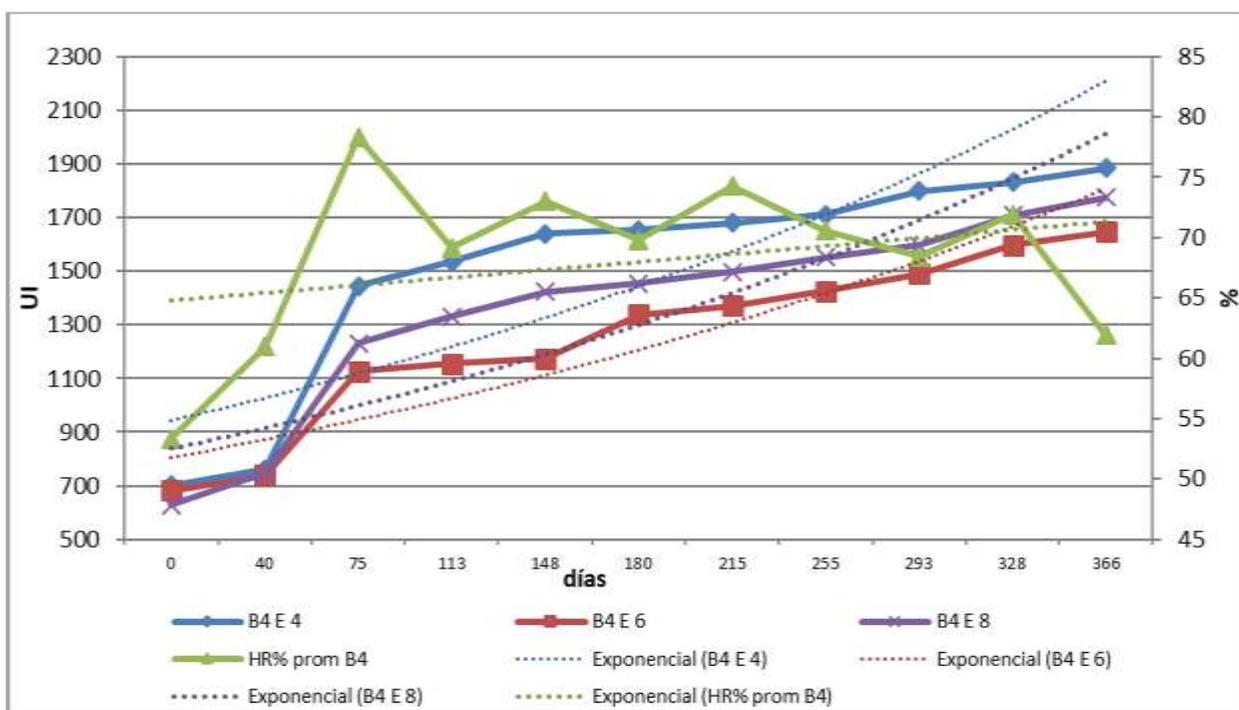


Figura 3.3 Gráfico obtenido para aumento de color (UI) en azúcar cruda ensacada en el tiempo y humedad relativa (%) promedio en Bodega 4.

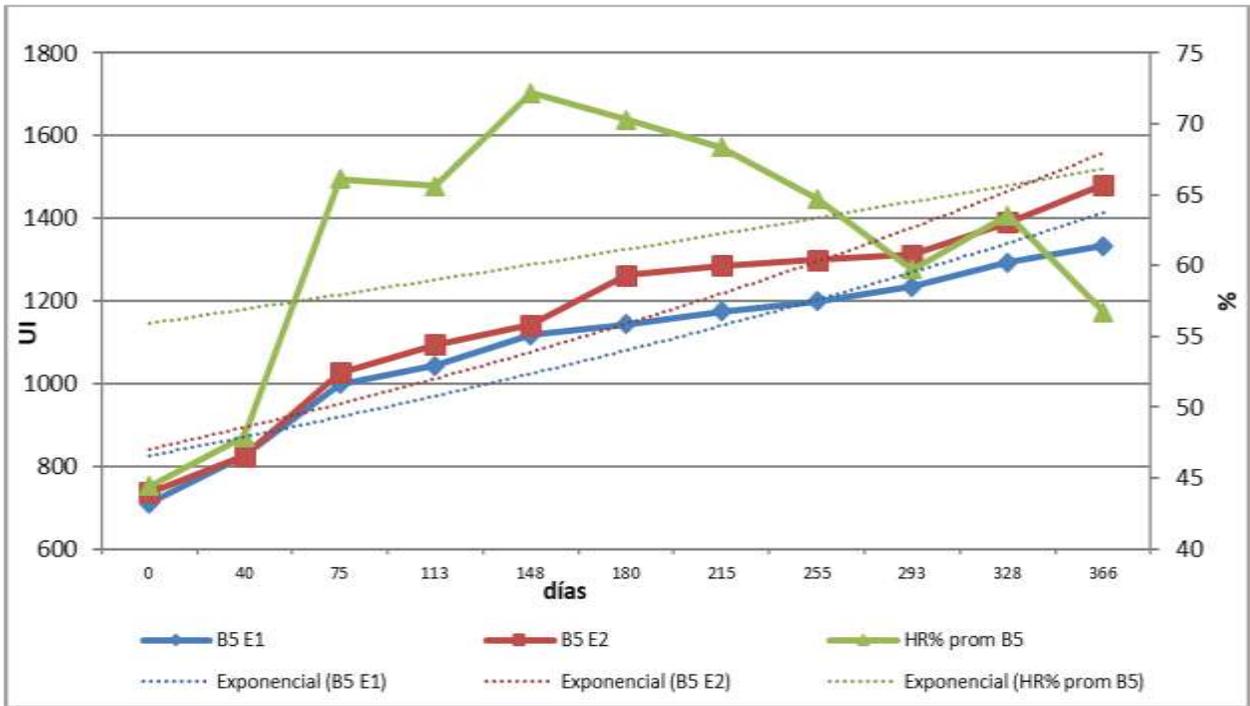


Figura 3.4 Gráfico obtenido para aumento de color (UI) en azúcar cruda ensacada en el tiempo y humedad relativa (%) promedio en Bodega 5.

### 3.2 Resultados de azúcar blanca sulfitada

Para todas las muestras de azúcar blanca sulfitada, se tomó como dato inicial de color, el dato obtenido durante el proceso de producción, y posteriormente se realizaron diez tomas de muestra de seguimiento a lo largo de un año calendario. Cinco muestras corresponden a almacenamiento en la bodega 4, cuatro muestras corresponden a almacenamiento en la bodega 5 y cinco muestras corresponden a almacenamiento en la bodega 6.

#### 3.2.1 Resultados obtenidos en azúcar blanca sulfitada almacenada en bodega 4

Los datos obtenidos a lo largo del periodo de monitoreo de almacenamiento de las muestras de azúcar blanca sulfitada y la temperatura de la bodega 4 son los datos detallados en la Tabla 3.6, para esta bodega se realizó el análisis con datos iniciales bastante bajos, por debajo de los 200 UI, entre 134 y 187 UI, lo que limitó poder visualizar el comportamiento posible en comparativo con muestras de color bajo y

color elevado desde la producción. Para la bodega 4 la muestra que alcanzó menor porcentaje de aumento de color, fue la muestra de la Estiba 9 (B4 E9) con un 62.78% que había iniciado con color de 180UI; la muestra que alcanzó el máximo aumento de color, fue la muestra de la Estiba 11 (B4 E11) con 98.11 % la cual había iniciado con color de 159UI. Aun para este aumento máximo de color, los datos obtenidos no sobrepasan las 500 UI establecidas por la norma obligatoria salvadoreña (CONACYT, 2003), cumpliendo con este parámetro a pesar del tiempo de almacenamiento.

*Tabla 3.6 Datos experimentales de aumento de color (UI) en el tiempo para azúcar blanca sulfitada y monitoreo de temperatura (°C) en Bodega 4.*

Muestra	Día de muestreo	Azúcar Blanca Sulfitada B4 – Unidades de color UI										
		B4 E8	% aumento de color	B4 E9	% aumento de color	B4 E10	% aumento de color	B4 E11	% aumento de color	B4 E12	% aumento de color	T°C prom B4
M0	0	187	-	180	-	134	-	159	-	177	-	28.66
M1	40	221	18.18	183	1.67	158	17.91	180	13.21	190	7.34	28.44
M2	75	227	21.39	221	22.78	203	51.49	239	50.31	252	42.37	29.24
M3	113	237	26.74	228	26.67	207	54.48	241	51.57	269	51.98	28.64
M4	148	247	32.09	235	30.56	214	59.70	250	57.23	273	54.24	28.14
M5	180	264	41.18	236	31.11	218	62.69	268	68.55	297	67.80	27.76
M6	215	285	52.41	249	38.33	224	67.16	267	67.92	308	74.01	27.34
M7	255	293	56.68	261	45.00	229	70.90	285	79.25	318	79.66	26.83
M8	293	296	58.29	269	49.44	235	75.37	292	83.65	325	83.62	26.39
M9	328	307	64.17	280	55.56	243	81.34	302	89.94	332	87.57	28.36
M10	366	320	71.12	293	62.78	261	94.78	315	98.11	341	92.66	30.43

Siguiendo el análisis realizado para el azúcar crudo ensacada, debido al comportamiento de la temperatura en la bodega, se elabora un análisis en base a promedios parciales (Tabla 3.7), un promedio realizado para los primeros cinco monitoreos con aumento promedio entre 11 y 24 UI, en estos primeros meses es donde se observa de manera más constante una mayor temperatura para la bodega 4 con temperaturas promedio entre 27.76 y 29.24 °C; para los últimos cinco monitoreos el promedio de aumento oscilo entre 9 y 11 UI, cuando la temperatura decae de manera más marcada con temperaturas promedio entre 26.39 y 30.43 °C.

Este análisis nos permite visualizar una tendencia ascendente durante el periodo donde la temperatura en la bodega fue mayor, mientras que, para el periodo de temperatura más baja, este comportamiento se vio disminuido.

*Tabla 3.7 Diferencia del aumento de color respecto a cada toma de muestra consecutiva, promedios parciales de aumento, y promedio general de aumento para cada muestra de azúcar blanca sulfitada almacenada en Bodega 4.*

MUESTRA	M0-M1	M1-M2	M2-M3	M3-M4	M4-M5	promedio	M5-M6	M6-M7	M7-M8	M8-M9	M9-M10	promedio	promedio general
B4 E8	34	6	10	10	17	15	21	8	3	11	13	11	13
B4 E9	3	38	7	7	1	11	13	12	8	11	13	11	11
B4 E10	24	45	4	7	4	17	6	5	6	8	18	9	13
B4 E11	21	59	2	9	18	22	9	8	7	10	13	9	16
B4 E12	13	62	17	4	24	24	11	10	7	7	9	9	16

En la figura 3.5 se detalla de manera gráfica el comportamiento de cada una de las muestras almacenada en bodega 4, en comparación al comportamiento de las temperaturas promedio para dicha bodega. Se puede apreciar que, para los primeros meses de seguimiento, que aproximadamente estuvieron comprendidos entre los meses de febrero/marzo a los meses de agosto/septiembre, la temperatura fue mayor por la presencia de la época del verano en el país, mientras que, para los otros meses, aproximadamente entre agosto/septiembre de febrero/marzo, los meses comprendidos corresponden a la época más fría del año en el país, aunque se visualizan los dos últimos puntos de temperatura donde se presenta una elevación, lo que coincide con los meses de febrero/marzo que vuelve a empezar la época calurosa. La estructura y ubicación de la bodega, pudo generar el aumento de temperatura radical que se ve reflejado en la gráfica.

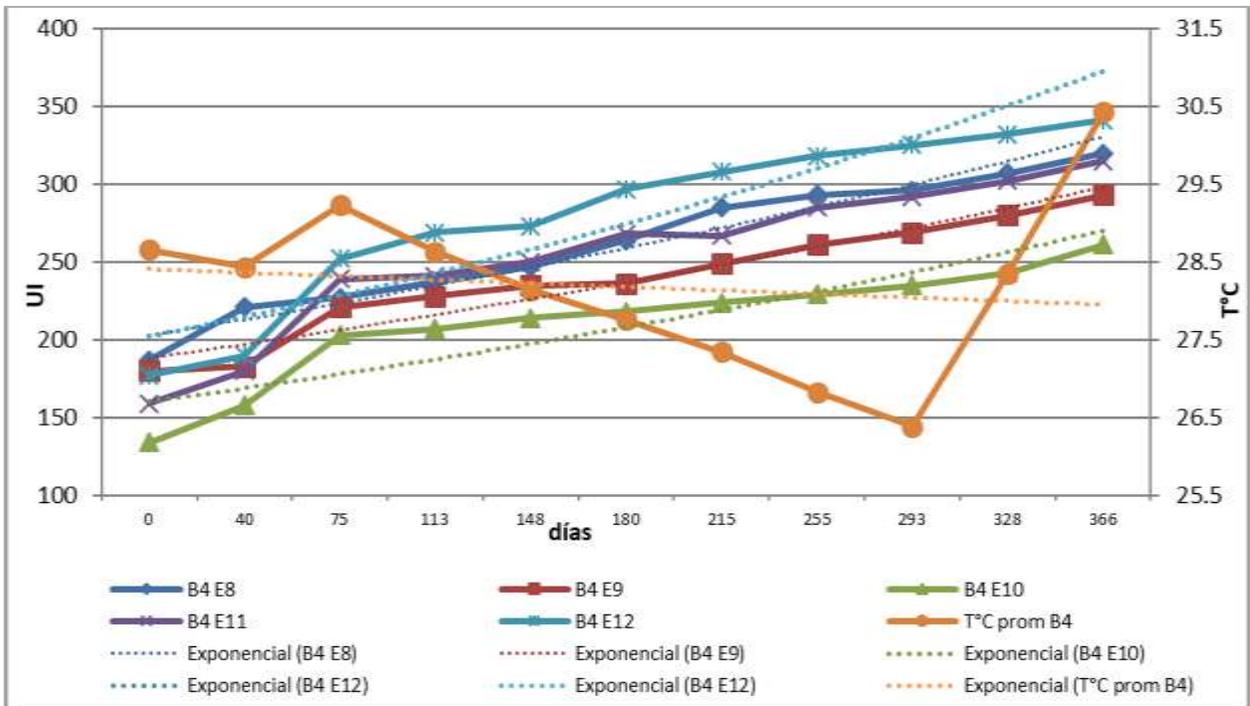


Figura 3.5 Gráfico obtenido para aumento de color (UI) en azúcar blanca sulfitada en el tiempo y temperatura (°C) promedio en Bodega 4.

Al seguimiento de color realizado, se le hizo el mismo análisis anterior, pero con relación a la humedad relativa, los datos obtenidos son mostrados en la Tabla 3.8 y mostrado de forma gráfica en la Figura 3.6. En este análisis se mira un alza de humedad relativa en los meses de lluvia típicos del país, aproximadamente entre julio-noviembre con humedades entre 57.6 y 78.34 %, aunque para esta bodega en particular la variable humedad relativa no se mira con una tendencia en concreto, ya que sus datos son muy fluctuantes, obteniendo humedades para el resto del año en monitoreo entre 61.92 y 74.30 %. Por este motivo no se encuentra una relación marcada entre la humedad relativa del ambiente y el desarrollo de color en azúcar. Se debe tener en cuenta que las condiciones en las que se protege el producto para el almacenamiento causan un mejor impacto en la protección para la variable humedad relativa que para la variable temperatura. Lo que hace menos vulnerable al azúcar a cualquier efecto que pueda realizar sobre esta.

Tabla 3.8 Datos experimentales de aumento de color (UI) en el tiempo para azúcar blanca sulfitada y monitoreo de humedad relativa (%) en Bodega 4.

Muestra	Día de muestreo	Azúcar Blanca Sulfitada B4 – Unidades de color UI										
		B4 E8	% aumento de color	B4 E9	% aumento de color	B4 E10	% aumento de color	B4 E11	% aumento de color	B4 E12	% aumento de color	HR% prom B4
M0	0	187	-	180	-	134	-	159	-	177	-	57.6
M1	40	221	18.18	183	1.67	158	17.91	180	13.21	190	7.34	60.99
M2	75	227	21.39	221	22.78	203	51.49	239	50.31	252	42.37	78.34
M3	113	237	26.74	228	26.67	207	54.48	241	51.57	269	51.98	69.18
M4	148	247	32.09	235	30.56	214	59.70	250	57.23	273	54.24	73.02
M5	180	264	41.18	236	31.11	218	62.69	268	68.55	297	67.80	69.80
M6	215	285	52.41	249	38.33	224	67.16	267	67.92	308	74.01	74.30
M7	255	293	56.68	261	45.00	229	70.90	285	79.25	318	79.66	70.58
M8	293	296	58.29	269	49.44	235	75.37	292	83.65	325	83.62	68.43
M9	328	307	64.17	280	55.56	243	81.34	302	89.94	332	87.57	71.93
M10	366	320	71.12	293	62.78	261	94.78	315	98.11	341	92.66	61.92

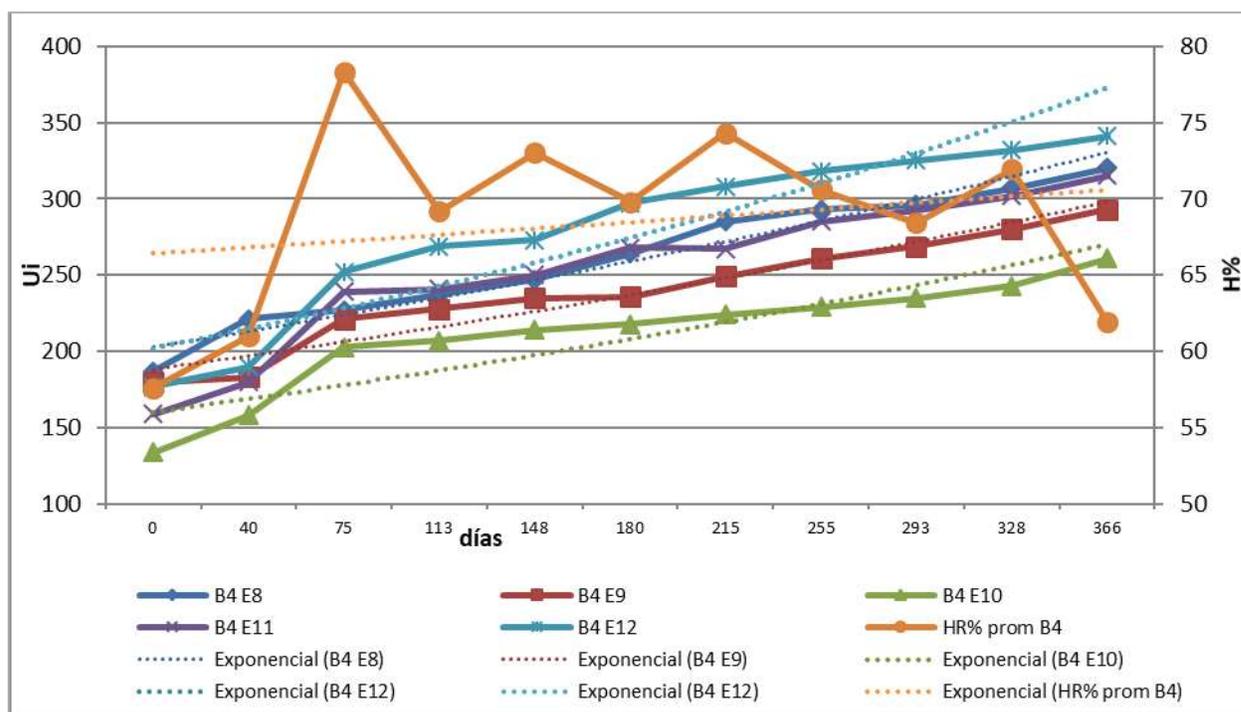


Figura 3.6 Gráfico obtenido para aumento de color (UI) en azúcar blanca sulfitada en el tiempo y humedad relativa (%) promedio en Bodega 4.

### 3.2.2 Resultados obtenidos en azúcar blanca sulfitada almacenada en bodega 5

Los datos obtenidos a lo largo del periodo de monitoreo de almacenamiento de las muestras de azúcar blanca sulfitada y la temperatura de la bodega 5 son los datos detallados en la Tabla 3.9, para esta bodega se realizó el análisis con datos iniciales arriba de los 200 UI, entre 221 y 235 UI, y uno por debajo de este mismo valor con 158 UI. La muestra de la estiba 2 fue la que alcanzó menos porcentaje de aumento de color con 41.52 % respecto a su color inicial de 224 UI; la muestra de la estiba 12 fue la que alcanzó un mayor porcentaje de aumento de color, con 72.78% respecto al color inicial 158 UI, aun con este aumento de color, los datos obtenidos no sobrepasan las 500 UI establecidas por la norma obligatoria salvadoreña (CONACYT, 2003), cumpliendo con este parámetro a pesar del tiempo de almacenamiento.

*Tabla 3.9 Datos experimentales de aumento de color (UI) en el tiempo para azúcar blanca sulfitada y monitoreo de temperatura (°C) en Bodega 5.*

Muestra	Día de muestreo	Azúcar Blanca Sulfitada B5 – Unidades de color UI								
		B5 E1	% aumento de color	B5 E2	% aumento de color	B5 E5	% aumento de color	B5 E12	% aumento de color	T°C prom B5
M0	0	235	-	224	-	221	-	158	-	29.3
M1	40	260	10.64	232	3.57	241	9.05	176	11.39	30.14
M2	75	284	20.85	259	15.63	294	33.03	207	31.01	29.82
M3	113	298	26.81	268	19.64	304	37.56	210	32.91	29.78
M4	148	312	32.77	281	25.45	326	47.51	218	37.97	28.90
M5	180	316	34.47	292	30.36	340	53.85	219	38.61	28.48
M6	215	318	35.32	293	30.80	348	57.47	222	40.51	28.64
M7	255	322	37.02	305	36.16	356	61.09	224	41.77	28.14
M8	293	340	44.68	309	37.95	359	62.44	233	47.47	28.42
M9	328	364	54.89	313	39.73	369	66.97	280	77.22	28.89
M10	366	370	57.45	317	41.52	375	69.68	273	72.78	28.54

Se elaboró un análisis en base a promedios parciales de las diferencias del aumento de color en las muestras (Tabla 3.10), un promedio realizado para los primeros cinco monitoreos, que es donde se observa de manera una mayor temperatura entre 28.48 y 30.14 °C, y un promedio para los últimos cinco monitoreos, cuando la temperatura es menor entre 28.14 y 28.89 °C.

Con este análisis podemos visualizar la tendencia ascendente durante el periodo donde la temperatura en la bodega fue mayor con promedios de aumento de color entre 12 y 24 UI, mientras que, para el periodo de temperatura más baja, este comportamiento se vio disminuido con promedios de aumento de color entre 5 y 11 UI. Durante el monitoreo, no fue la muestra mayor color inicial la que desarrolló mayor color, en cambio para esta bodega en particular, fue la muestra con menor color inicial la que desarrolló mayor aumento de color, lo que puede estar relacionado a que esta bodega presentó mayores temperaturas tal como se detalla en la sección 2.3.2.

*Tabla 3.10 Diferencias del aumento de color respecto a cada toma de muestra consecutiva, promedios parciales de aumento, y promedio general de aumento para cada muestra de azúcar blanca sulfitada almacenada en Bodega 5.*

MUESTRA	M0-M1	M1-M2	M2-M3	M3-M4	M4-M5	promedio	M5-M6	M6-M7	M7-M8	M8-M9	M9-M10	promedio	promedio general
B5 E1	25	24	14	14	4	16	2	4	18	24	6	11	14
B5 E2	8	27	9	13	11	14	1	12	4	4	4	5	9
B5 E5	20	53	10	22	14	24	8	8	3	10	6	7	15
B5 E12	18	31	3	8	1	12	3	2	9	17	23	11	12

En la Figura 3.7 se detalla de manera gráfica el comportamiento de cada una de las muestras de azúcar blanca sulfitada almacenada en bodega 5, en comparación al comportamiento de las temperaturas promedio para dicha bodega. Se puede apreciar que, para los primeros meses de seguimiento, que aproximadamente estuvieron comprendidos entre los meses de febrero/marzo a los meses de agosto/septiembre, la temperatura fue mayor por la presencia de la época del verano en el país alcanzando valores entre 28.48 y 30.14 °C, mientras que, para los otros meses, aproximadamente entre agosto/septiembre a febrero/marzo, los meses comprendidos corresponden a la época más fría del año en el país se alcanzó valores entre 28.14 y 28.89 °C.

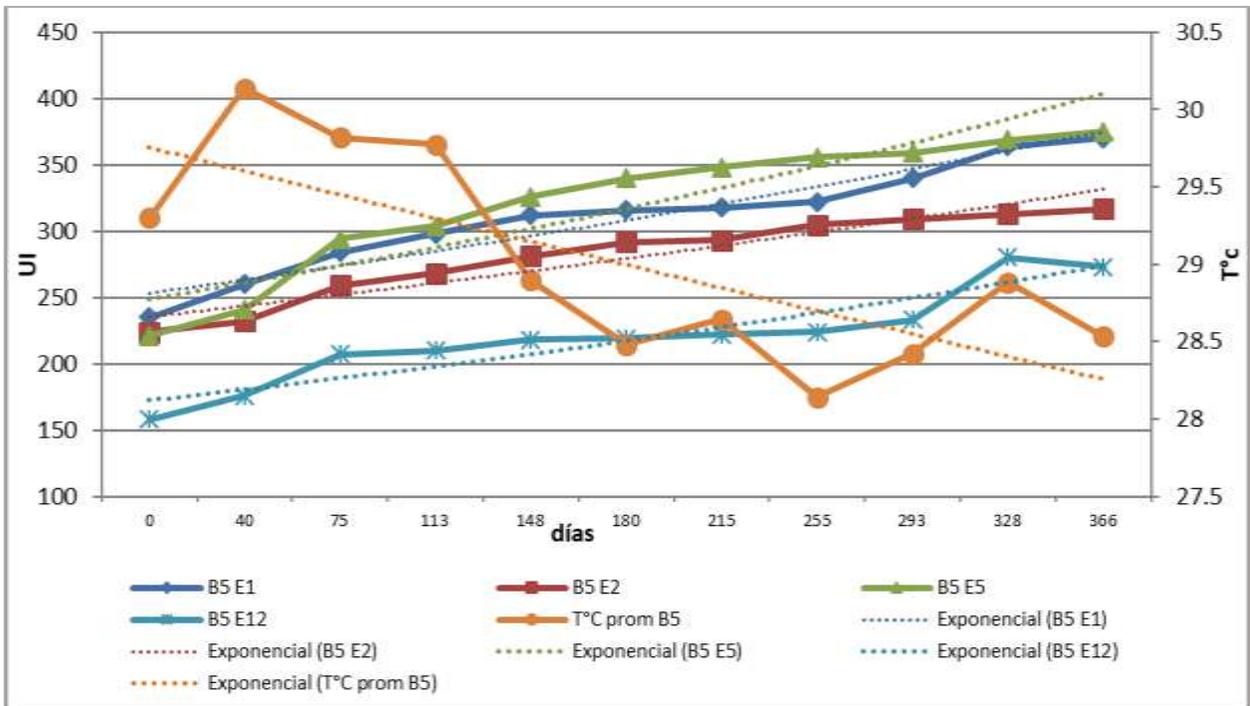


Figura 3.7 Gráfico obtenido para aumento de color (UI) en azúcar blanca sulfitada en el tiempo y temperatura (°C) promedio en Bodega 5.

Junto con el seguimiento de color realizado de las muestras, se realizó análisis de datos con relación a la humedad relativa, los datos obtenidos son mostrados en la Tabla 3.11 y mostrado de forma gráfica en la Figura 3.8. En este análisis se mira un alza de humedad relativa en los meses de lluvia típicos del país, aproximadamente entre julio-noviembre con humedades promedio entre 46.09 y 72.16 %, aunque para esta bodega en particular la variable humedad relativa no mantiene una tendencia por completo, sí es muy marcado el aumento de humedad relativa en los meses que corresponden a meses de lluvia en el país en comparación a los meses de verano con valores entre 56.74 y 68.38 %. No se encontró relación significativa en cuanto a tendencias de color y esta variable. Es de tener en cuenta que las condiciones en las que se protege el producto para el almacenamiento causan un mejor impacto en la protección para la variable humedad relativa que para la variable temperatura. Lo que hace menos vulnerable al azúcar a cualquier efecto que pueda realizar sobre esta.

Tabla 3.11 Datos experimentales de aumento de color (UI) en el tiempo para azúcar blanca sulfitada y monitoreo de humedad relativa (%) en Bodega 5.

Muestra	Día de muestreo	Azúcar Blanca Sulfitada B5 – Unidades de color UI								
		B5 E1	% aumento de color	B5 E2	% aumento de color	B5 E5	% aumento de color	B5 E12	% aumento de color	HR% prom B5
M0	0	235	-	224	-	221	-	158	-	46.9
M1	40	260	10.64	232	3.57	241	9.05	176	11.39	47.90
M2	75	284	20.85	259	15.63	294	33.03	207	31.01	66.13
M3	113	298	26.81	268	19.64	304	37.56	210	32.91	65.62
M4	148	312	32.77	281	25.45	326	47.51	218	37.97	72.16
M5	180	316	34.47	292	30.36	340	53.85	219	38.61	70.30
M6	215	318	35.32	293	30.80	348	57.47	222	40.51	68.38
M7	255	322	37.02	305	36.16	356	61.09	224	41.77	64.70
M8	293	340	44.68	309	37.95	359	62.44	233	47.47	59.74
M9	328	364	54.89	313	39.73	369	66.97	280	77.22	63.55
M10	366	370	57.45	317	41.52	375	69.68	273	72.78	56.74

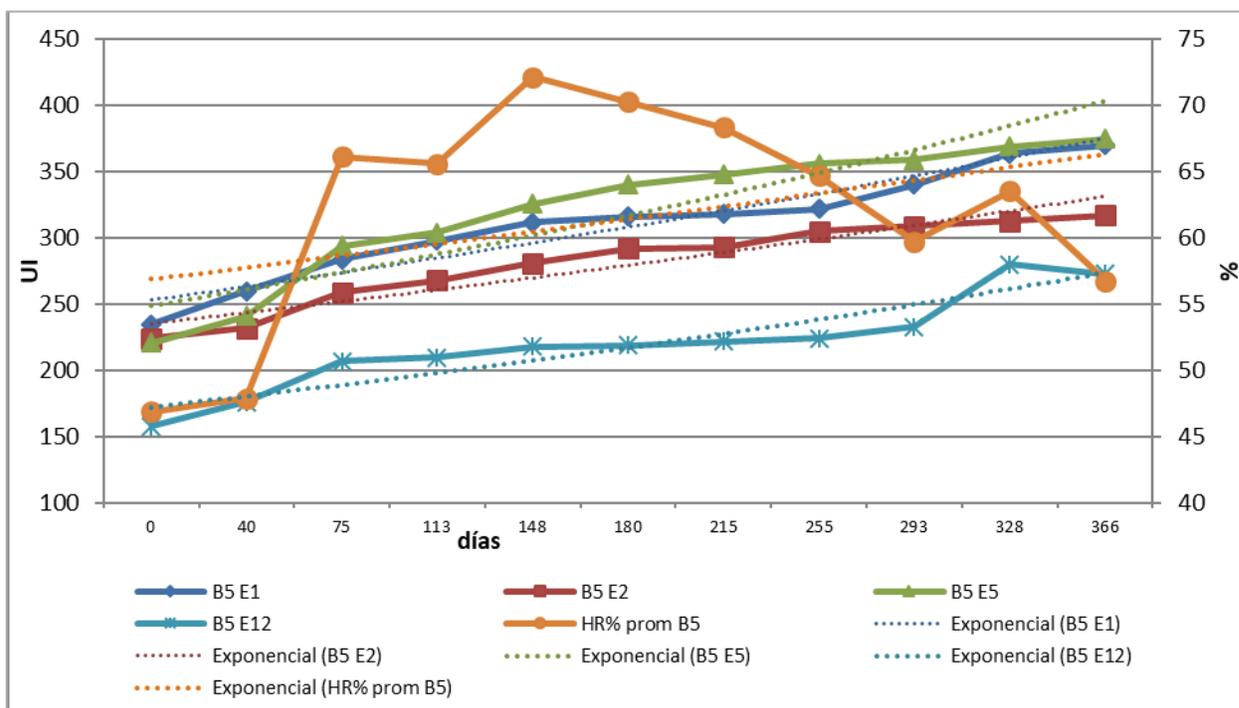


Figura 3.8 Gráfico obtenido para aumento de color (UI) en azúcar blanca sulfitada en el tiempo y humedad relativa (%) promedio en Bodega 5.

### 3.2.3 Resultados obtenidos en azúcar blanca sulfitada almacenada en bodega 6

Los datos obtenidos a lo largo del periodo de monitoreo de almacenamiento de las muestras de azúcar blanca sulfitada y la temperatura de la bodega 6 son los datos detallados en la Tabla 3.12, para esta bodega se realizó el análisis con datos iniciales por debajo de los 200 UI, entre 154 y 190 UI. y una muestra arriba de este mismo valor con 214 UI. La muestra de la estiba 10 (B6 E10) fue la muestra que alcanzó un menor porcentaje de aumento de color, con 56.84 % respecto al color inicial de 190 UI. La muestra de la estiba 5 (B6 E5) fue la que alcanzó un mayor porcentaje de aumento de color, con 129.22 % respecto al color inicial de 154 UI, aun con este aumento de color, los datos obtenidos no sobrepasan las 500 UI establecidas por la norma obligatoria salvadoreña (CONACYT, 2003), cumpliendo con este parámetro a pesar del tiempo de almacenamiento.

*Tabla 3.12 Datos experimentales de aumento de color (UI) en el tiempo para azúcar blanca sulfitada y monitoreo de temperatura (°C) en Bodega 6.*

Muestra	Día de muestreo	Azúcar Blanca Sulfitada B6 – Unidades de color UI										T°C prom B6
		B6 E5	% aumento de color	B6 E8	% aumento de color	B6 E9	% aumento de color	B6 E10	% aumento de color	B6 E12	% aumento de color	
M0	0	154	-	184	-	214	-	190	-	183	-	31.43
M1	40	182	18.18	209	13.59	244	14.02	197	3.68	204	11.48	31.44
M2	75	242	57.14	257	39.67	272	27.10	226	18.95	235	28.42	31.53
M3	113	255	65.58	260	41.30	288	34.58	237	24.74	240	31.15	31.09
M4	148	258	67.53	269	46.20	295	37.85	259	36.32	255	39.34	30.16
M5	180	269	74.68	292	58.70	296	38.32	262	37.89	257	40.44	29.74
M6	215	283	83.77	302	64.13	310	44.86	264	38.95	265	44.81	29.67
M7	255	292	89.61	309	67.93	311	45.33	268	41.05	270	47.54	28.98
M8	293	311	101.95	329	78.80	323	50.93	275	44.74	281	53.55	27.93
M9	328	337	118.83	340	84.78	349	63.08	283	48.95	291	59.02	30.60
M10	366	353	129.22	352	91.30	364	70.09	298	56.84	305	66.67	31.96

Se llevó a cabo un análisis en base a promedios parciales de las diferencias del aumento de color en las muestras (Tabla 3.13), un promedio realizado para los primeros cinco monitoreos, que es donde se observa de manera una mayor temperatura para la bodega 6 entre 29.74 y 31.53°C, y un promedio para los últimos cinco monitoreos, cuando la temperatura es menor entre 27.93 y 31.96°C.

Con este análisis se logra representar la tendencia ascendente durante el periodo donde la temperatura en la bodega fue mayor, con promedios de aumento de color entre 14 y 23 UI; mientras que, en el periodo de temperatura más baja, este comportamiento se vio disminuido con promedios de aumento de color entre 7 y 17 UI.

*Tabla 3.13 Diferencias del aumento de color respecto a cada toma de muestra consecutiva, promedios parciales de aumento, y promedio general de aumento para cada muestra de azúcar blanca sulfitada almacenada en Bodega 6.*

MUESTRA	M0-M1	M1-M2	M2-M3	M3-M4	M4-M5	promedio	M5-M6	M6-M7	M7-M8	M8-M9	M9-M10	promedio	promedio general
B6 E5	28	60	13	3	11	23	14	9	19	26	16	17	20
B6 E8	25	48	3	9	23	22	10	7	20	11	12	12	17
B6 E9	30	28	16	7	1	16	14	1	12	26	15	14	15
B6 E10	7	29	11	22	3	14	2	4	7	8	15	7	11
B6 E12	21	31	5	15	2	15	8	5	11	10	14	10	12

En la Figura 3.9 se detalla de manera gráfica el comportamiento de cada una de las muestras de azúcar blanca sulfitada almacenada en bodega 6, en comparación al comportamiento de las temperaturas promedio para dicha bodega. Se puede apreciar que, para los primeros meses de seguimiento, que aproximadamente estuvieron comprendidos entre los meses de febrero/marzo a los meses de agosto/septiembre, la temperatura fue mayor por la presencia de la época del verano en el país entre 29.74 y 31.53 °C, mientras que, para los otros meses, aproximadamente entre agosto/septiembre a febrero/marzo, los meses comprendidos corresponden a la época más fría del año en el país con temperaturas entre 27.93 y 31.96 °C, aunque se visualizan los dos últimos puntos de temperatura donde se presenta una elevación, lo que coincide con los meses de febrero/marzo que vuelve a empezar la época calurosa.

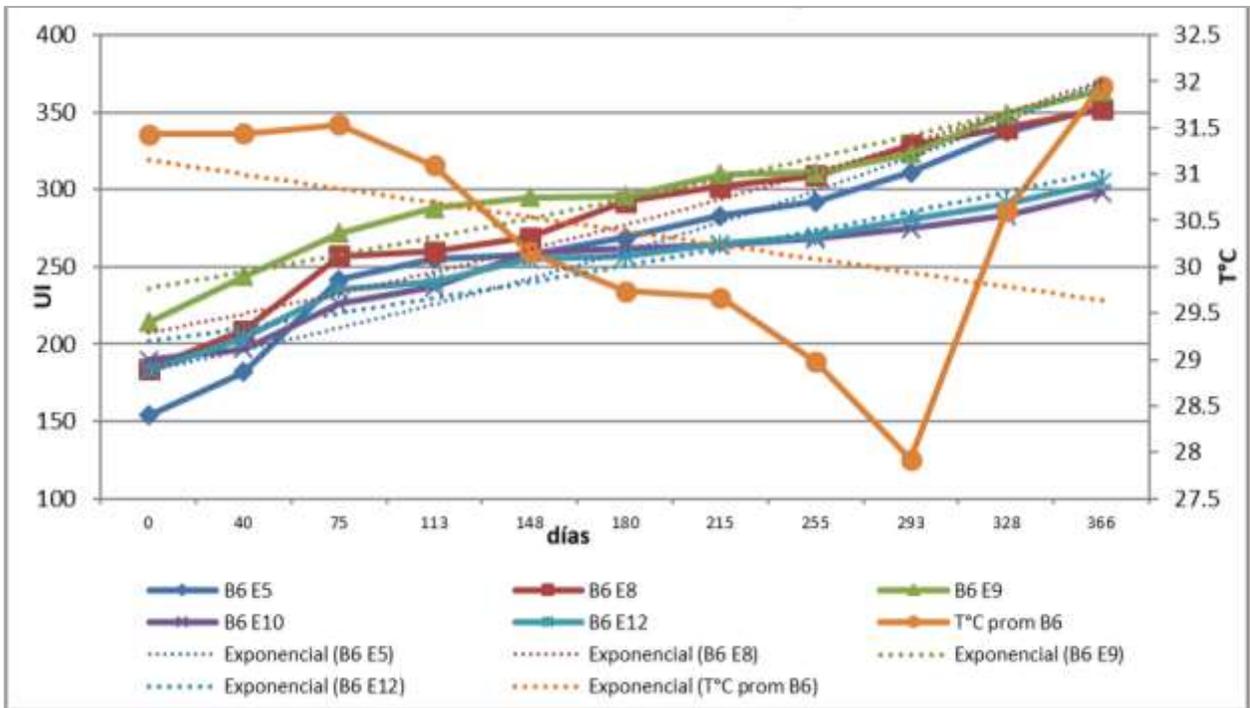


Figura 3.9 Gráfico obtenido para aumento de color (UI) en azúcar blanca sulfitada en el tiempo y temperatura (°C) promedio en Bodega 6.

En paralelo con el seguimiento de color realizado de las muestras, se realizó un monitoreo de la humedad relativa, los datos obtenidos son mostrados en la Tabla 3.14 y mostrado de forma gráfica en la Figura 3.10. En este análisis se mira un alza de humedad relativa en los meses de lluvia típicos del país, aproximadamente entre julio-noviembre con valores entre 43.71 y 65.95 % y para los meses de época seca en el país, se tuvieron valores entre 50.79 y 63.43 %; aunque para esta bodega esta variable no marca una tendencia precisa. No se encontró relación significativa en cuanto a tendencias de color y humedad relativa. Es de tener en cuenta que las condiciones en las que se protege el producto para el almacenamiento previenen un impacto grande en el azúcar, y protege principalmente para la variable humedad relativa, que necesita entrar en contacto más directo con el azúcar para generar inconvenientes al producto.

Tabla 3.14 Datos experimentales de aumento de color (UI) en el tiempo para azúcar blanca sulfitada y monitoreo de humedad relativa (%) en Bodega 6.

Muestra	Día de muestreo	Azúcar Blanca Sulfitada B6 – Unidades de color UI										
		B6 E5	% aumento de color	B6 E8	% aumento de color	B6 E9	% aumento de color	B6 E10	% aumento de color	B6 E12	% aumento de color	HR% prom B6
M0	0	154	-	184	-	214	-	190	-	183	-	43.71
M1	40	182	18.18	209	13.59	244	14.02	197	3.68	204	11.48	44.05
M2	75	242	57.14	257	39.67	272	27.10	226	18.95	235	28.42	60.91
M3	113	255	65.58	260	41.30	288	34.58	237	24.74	240	31.15	60.14
M4	148	258	67.53	269	46.20	295	37.85	259	36.32	255	39.34	65.95
M5	180	269	74.68	292	58.70	296	38.32	262	37.89	257	40.44	63.05
M6	215	283	83.77	302	64.13	310	44.86	264	38.95	265	44.81	63.43
M7	255	292	89.61	309	67.93	311	45.33	268	41.05	270	47.54	61.17
M8	293	311	101.95	329	78.80	323	50.93	275	44.74	281	53.55	60.07
M9	328	337	118.83	340	84.78	349	63.08	283	48.95	291	59.02	61.31
M10	366	353	129.22	352	91.30	364	70.09	298	56.84	305	66.67	50.79

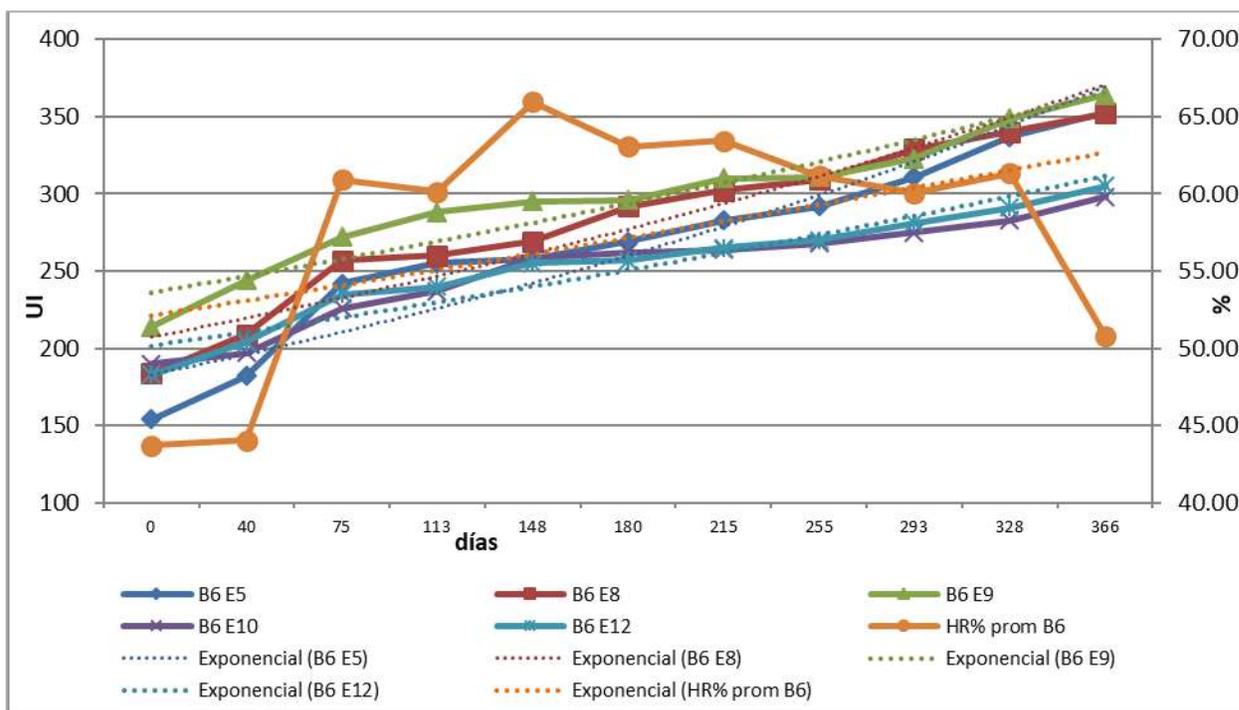


Figura 3.10 Gráfico obtenido para aumento de color (UI) en azúcar blanca sulfitada en el tiempo y humedad relativa (%) promedio en Bodega 6.

### 3.3 Resultados de azúcar producida en refinería.

Para todas las muestras de azúcar producida en la refinería, se tomó como dato inicial de color, el dato obtenido durante el proceso de producción, y posteriormente se realizaron diez tomas de muestra de seguimiento a lo largo de un año calendario. Para azúcar blanco superior corresponden dos muestras a almacenamiento en la bodega 3 y tres muestras a la bodega 3; para azúcar refinada tres muestras corresponden a almacenamiento en la bodega 5 y una muestra corresponde a almacenamiento en la bodega 6.

#### **3.3.1** *Resultados obtenidos en azúcar blanco superior almacenada en bodega 3 y almacenada en bodega 6*

Los datos obtenidos a lo largo del periodo de almacenamiento y el monitoreo de la temperatura llevado a cabo en las bodegas correspondientes a las muestras de azúcar blanco superior, son los detallados en las Tabla 3.15 y Tabla 3.16. Para la bodega 3 se alcanzó un porcentaje mínimo de aumento de color de la muestra de la estiba 2 (B3 E2) con 113.16 % respecto a su color inicial de 38 UI; y el porcentaje máximo de aumento de color en la estiba 1 (B3 E1) con 121.18 % respecto a su color inicial de 85 UI. Para la bodega 6 se alcanzó un porcentaje mínimo de aumento de color de la muestra de la estiba 1 (B6 E1) con 70.27 % respecto a su color inicial de 37 UI; y el porcentaje máximo de aumento de color en la estiba 5 (B6 E5) con 141.38 % de aumento respecto al color inicial de 29 UI, aun con este aumento de color, los datos obtenidos no sobrepasan las 300 UI establecidas por la norma obligatoria salvadoreña (CONACYT, 2003), cumpliendo con este parámetro a pesar del tiempo de almacenamiento.

Se realizó el análisis de datos para este producto en base a promedios parciales, un promedio realizado para los primeros cinco monitoreos (Tabla 3.17), que es donde se observa una mayor temperatura para ambas bodegas, y un promedio para los últimos cinco monitoreos, cuando la temperatura fue menor en las bodegas.

Lo que esto nos muestra, es una tendencia ascendente más marcada durante el periodo donde la temperatura en la bodega fue mayor con promedios de aumento de color entre 3 y 15 UI, mientras que, para el periodo de temperatura más baja,

este comportamiento se vio disminuido con promedios de aumento de color entre 2 y 6 UI. Entre bodegas se distingue una leve diferencia en lo promedios de aumento de color, la bodega 6 es mayor, esto se puede deber a su condición de mayor temperatura en comparación a las temperaturas de la bodega 3.

*Tabla 3.15 Datos experimentales de aumento de color (UI) en el tiempo para azúcar blanca superior y monitoreo de temperatura (°C) en Bodega 3.*

Muestra	Día de muestreo	Azúcar Blanco Superior B3 – Unidades de color UI				
		B3 E1	% aumento de color	B3 E2	% aumento de color	T°C prom B3
M0	0	85	-	38	-	26.8
M1	40	128	50.59	45	18.42	31.44
M2	75	132	55.29	48	26.32	29.90
M3	113	145	70.59	51	34.21	29.58
M4	148	151	77.65	54	42.11	28.67
M5	180	158	85.88	54	42.11	28.25
M6	215	165	94.12	55	44.74	**
M7	255	168	97.65	68	78.95	28.25
M8	293	169	98.82	72	89.47	27.76
M9	328	178	109.41	75	97.37	29.63
M10	366	188	121.18	81	113.16	30.12

*Tabla 3.16 Datos experimentales de aumento de color (UI) en el tiempo para azúcar blanca superior y monitoreo de temperatura (°C) en Bodega 6.*

Muestra	Día de muestreo	Azúcar Blanco Superior B6 – Unidades de color UI						
		B6 E1	% aumento de color	B6 E3	% aumento de color	B6 E5	% aumento de color	T°C prom B6
M0	0	37	-	60	-	29	-	28.4
M1	40	40	8.11	75	25.00	37	27.59	33.04
M2	75	44	18.92	76	26.67	37	27.59	31.53
M3	113	47	27.03	82	36.67	41	41.38	31.09
M4	148	49	32.43	87	45.00	45	55.17	30.16
M5	180	51	37.84	96	60.00	48	65.52	29.74
M6	215	52	40.54	100	66.67	50	72.41	29.67
M7	255	55	48.65	101	68.33	53	82.76	28.98
M8	293	58	56.76	107	78.33	58	100.00	27.93
M9	328	59	59.46	112	86.67	63	117.24	30.60
M10	366	63	70.27	119	98.33	70	141.38	31.96

\*\* El dato faltante para el monitoreo de condiciones ambientales, para la bodega 3, es debido a que para ese mes el equipo con el que se realizaba el monitoreo tuvo un desperfecto y no se lograron recuperar los datos obtenidos con este equipo.

*Tabla 3.17 Diferencias del aumento de color respecto a cada toma de muestra consecutiva, promedios parciales de aumento, y promedio general de aumento para cada muestra de azúcar blanca superior almacenada en bodega en bodegas.*

MUESTRA	M0-M1	M1-M2	M2-M3	M3-M4	M4-M5	promedio	M5-M6	M6-M7	M7-M8	M8-M9	M9-M10	promedio	promedio general
<b>B3 E1</b>	43	4	13	6	7	15	7	3	1	9	10	6	10
<b>B3 E2</b>	7	3	3	3	0	3	1	13	4	3	6	5	4
<b>B6 E1</b>	3	4	3	2	2	3	1	3	3	1	4	2	3
<b>B6 E3</b>	15	1	6	5	9	7	4	1	6	5	7	5	6
<b>B6 E5</b>	8	0	4	4	3	4	2	3	5	5	7	4	4

En la Figuras 3.11 y Figura 3.12 se detallan de manera gráfica el comportamiento de cada una de las muestras, en comparación al comportamiento de las temperaturas promedio. Se puede apreciar que, para los primeros meses de seguimiento, que aproximadamente estuvieron comprendidos entre los meses de febrero/marzo a los meses de agosto/septiembre, la temperatura fue mayor por la presencia de la época del verano en el país con temperaturas entre 26.8 y 31.44 °C para la bodega 3 y entre 28.4 y 33.04 °C para la bodega 6, mientras que, para los otros meses, aproximadamente entre agosto/septiembre a febrero/marzo, los meses comprendidos corresponden a la época más fría del año en el país con temperaturas entre 27.76 y 30.12 °C para la bodega 3 y para la bodega 6 entre 27.93 y 31.96 °C. Aunque para la bodega 3, los dos últimos puntos de temperatura presentan una elevación, lo que coincide con los meses de febrero/marzo que vuelve a empezar la época calurosa, y por la estructura y ubicación de la bodega, se pudo generar el aumento que se ve reflejado en la gráfica.

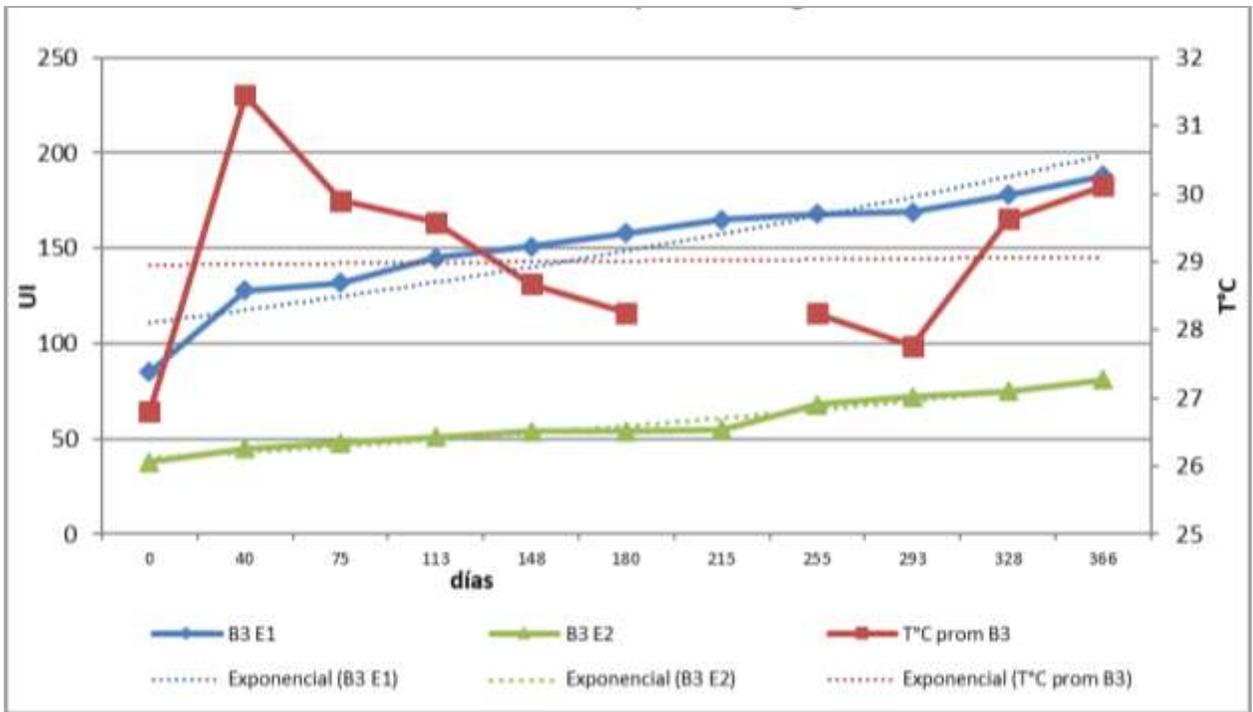


Figura 3.11 Gráfico obtenido para aumento de color (UI) en azúcar blanca superior en el tiempo y temperatura (°C) promedio en Bodega 3.

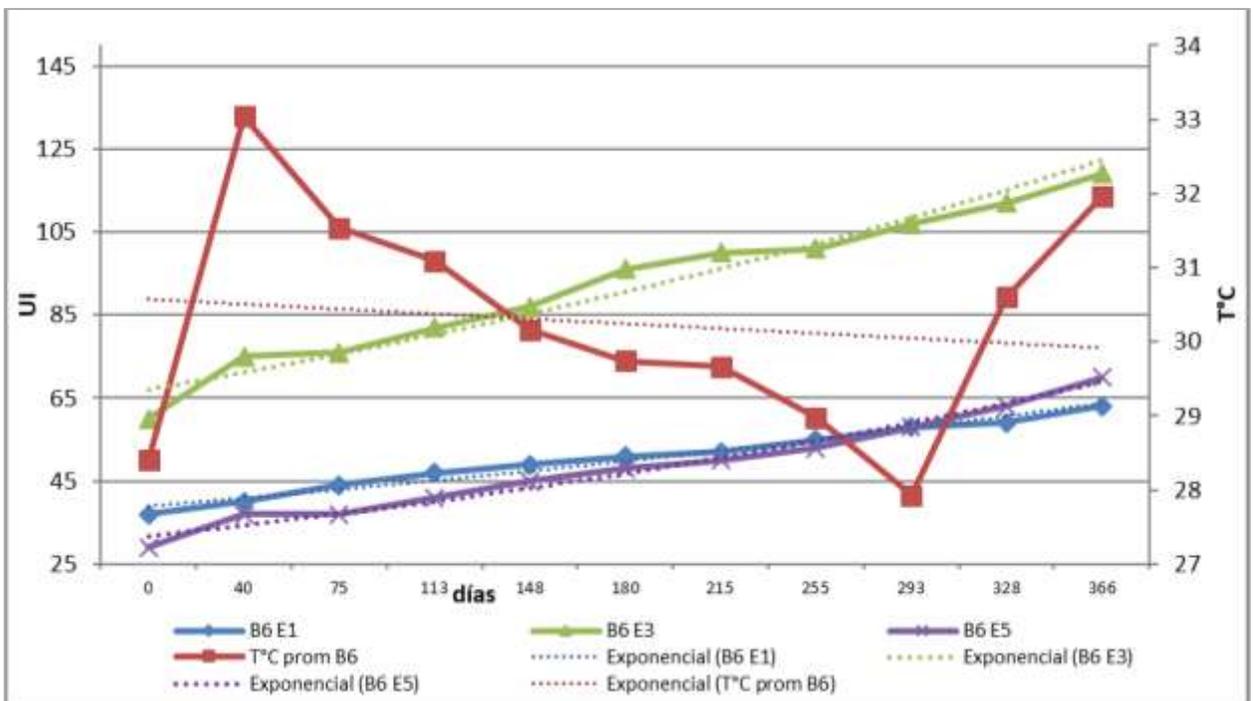


Figura 3.12 Gráfico obtenido para aumento de color (UI) en azúcar blanca superior en el tiempo y temperatura (°C) promedio en Bodega 6.

El mismo análisis de seguimiento de color se realizó, pero con relación a la humedad relativa de cada bodega donde se tuvo almacenada cada muestra de azúcar blanco superior (Tabla 3.18 y Tabla 3.19). En este análisis se mira un alza de humedad relativa en los meses de lluvia típicos del país aproximadamente entre julio-noviembre con valores entre 56.26 y 76.35 % para la bodega 3 y valores entre 44.05 y 65.95 % para la bodega 6. No se encuentra una relación marcada entre la humedad relativa y el aumento de color durante el almacenamiento. Además, el producto tiene una protección de plástico que los resguarda de las condiciones ambientales, pero mayormente contra la variable humedad relativa. Lo que hace menos vulnerable al azúcar a cualquier efecto que pueda realizar sobre esta.

Se presenta un análisis gráfico del comportamiento de la humedad relativa para cada bodega donde se realizó el seguimiento de azúcar blanco superior en conjunto con el seguimiento de color para cada muestra (Figura 3.13 y Figura 3.14). Se logra ver reflejado el comportamiento de la humedad relativa para ambas bodegas.

*Tabla 3.18 Datos experimentales de aumento de color (UI) en el tiempo para azúcar blanca superior y monitoreo de humedad relativa (%) en Bodega 3.*

Muestra	Día de muestreo	Azúcar Blanco Superior B3 – Unidades de color UI				
		B3 E1	% aumento de color	B3 E2	% aumento de color	HR% prom B3
M0	0	85	-	38	-	56.80
M1	40	128	50.59	45	18.42	56.26
M2	75	132	55.29	48	26.32	72.76
M3	113	145	70.59	51	34.21	71.32
M4	148	151	77.65	54	42.11	76.35
M5	180	158	85.88	54	42.11	73.60
M6	215	165	94.12	55	44.74	††
M7	255	168	97.65	68	78.95	65.62
M8	293	169	98.82	72	89.47	63.85
M9	328	178	109.41	75	97.37	68.69
M10	366	188	121.18	81	113.16	56.36

†† El dato faltante para el monitoreo de condiciones ambientales, para la bodega 3, es debido a que para ese mes el equipo con el que se realizaba el monitoreo tuvo un desperfecto y no se lograron recuperar los datos obtenidos con este equipo.

Tabla 3.19 Datos experimentales de aumento de color (UI) en el tiempo para azúcar blanca superior y monitoreo de humedad relativa (%) en Bodega 6.

Muestra	Día de muestreo	Azúcar Blanco Superior B6 – Unidades de color UI						
		B6 E1	% aumento de color	B6 E3	% aumento de color	B6 E5	% aumento de color	HR% prom B6
M0	0	37	-	60	-	29	-	45.30
M1	40	40	8.11	75	25.00	37	27.59	44.05
M2	75	44	18.92	76	26.67	37	27.59	60.91
M3	113	47	27.03	82	36.67	41	41.38	60.14
M4	148	49	32.43	87	45.00	45	55.17	65.95
M5	180	51	37.84	96	60.00	48	65.52	63.05
M6	215	52	40.54	100	66.67	50	72.41	63.43
M7	255	55	48.65	101	68.33	53	82.76	61.17
M8	293	58	56.76	107	78.33	58	100.00	60.07
M9	328	59	59.46	112	86.67	63	117.24	61.31
M10	366	63	70.27	119	98.33	70	141.38	50.79

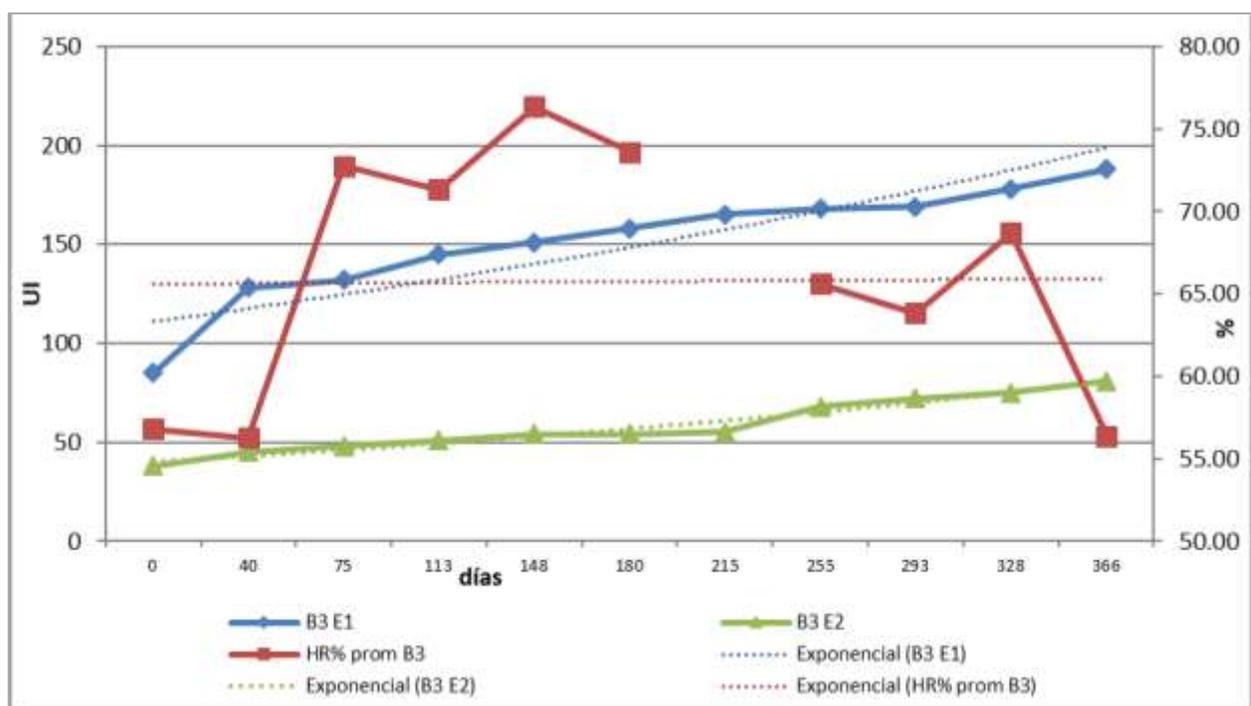


Figura 3.13 Gráfico obtenido para aumento de color (UI) en azúcar blanca superior en el tiempo y humedad relativa (%) promedio en Bodega 3.

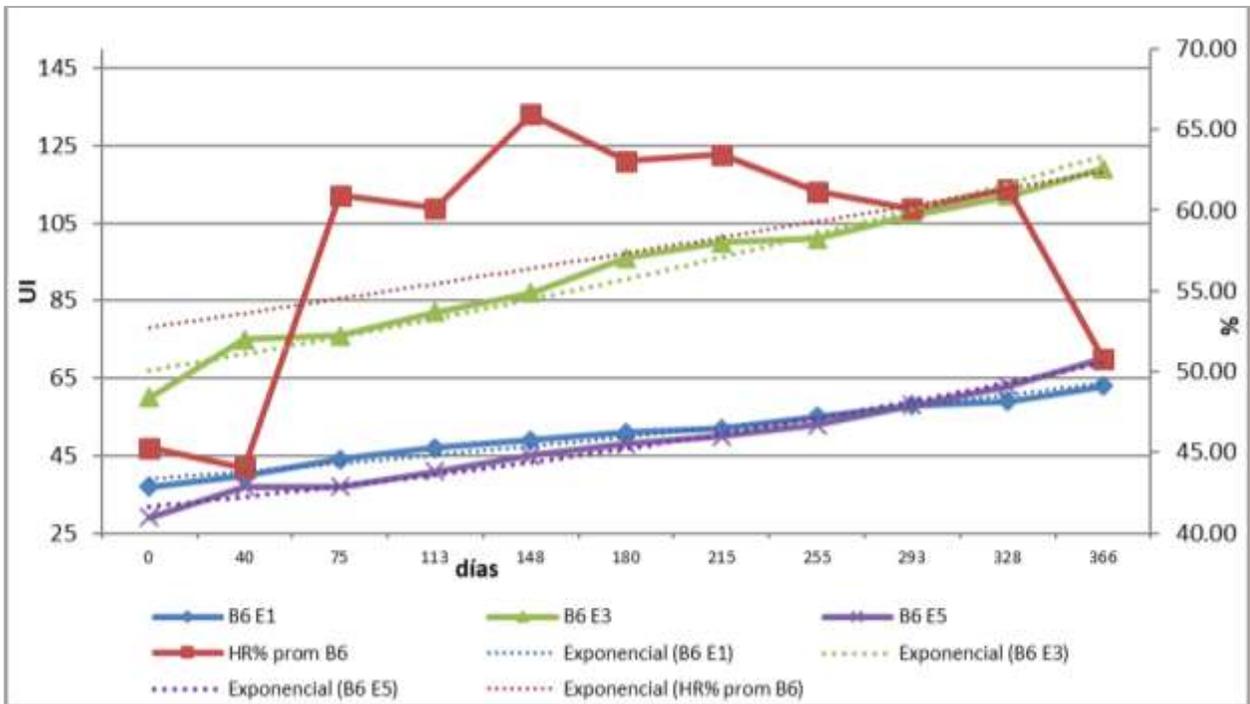


Figura 3.14 Gráfico obtenido para aumento de color (UI) en azúcar blanca superior en el tiempo y humedad relativa (%) promedio en Bodega 6.

### 3.3.2 Resultados obtenidos en azúcar refinada almacenada en bodega 5 y bodega 6.

Se tomó como dato inicial de color, el dato obtenido durante el proceso de producción, y posteriormente se realizaron diez tomas de muestra de seguimiento a lo largo de un año calendario; para una muestra almacenada en bodega 6 y tres muestras almacenadas en bodega 5, los datos obtenidos en el periodo de almacenamiento y el monitoreo de la temperatura llevado a cabo en las bodegas correspondientes a las muestras de azúcar refinada, son los detallados en la Tabla 3.20 y Tabla 3.21, se puede observar que para la muestra de la bodega 6 (B6 E2), no se vio aumento a lo largo del monitoreo, en comparación con las otras muestras de azúcar refinada, se nota que esta muestra tiene menos cantidad de impurezas y con mayor Pol, aunque el color inicial no era el más bajo para las muestras en estudio, logró permanecer más estable. El porcentaje de aumento mínimo alcanzado para las muestras de azúcar refinada es de 144.44 % respecto a su color inicial de 27 UI, el porcentaje de aumento máximo alcanzado para este tipo de azúcar es un incremento porcentual muy alto de 371.43 %, respecto a su color inicial

de 7 UI, para la muestra de la bodega 5 estiba 2 (B5 E2), aun con este aumento de color, los datos obtenidos no sobrepasan las 80 UI establecidas por la norma obligatoria salvadoreña (CONACYT, 2003), cumpliendo con este parámetro a pesar del tiempo de almacenamiento.

*Tabla 3.20 Datos experimentales de aumento de color (UI) en el tiempo para azúcar refinada y monitoreo de temperatura (°C) en Bodega 5.*

Muestra	Día de muestreo	Azúcar Refinada B5 – Unidades de color UI						
		B5 E2	% aumento de color	B5 E3	% aumento de color	B5 E4	% aumento de color	T°C prom B5
M0	0	7	-	27	-	8	-	28.9
M1	40	14	100.00	35	29.63	13	62.50	31.32
M2	75	16	128.57	36	33.33	15	87.50	29.82
M3	113	17	142.86	38	40.74	16	100.00	29.78
M4	148	17	142.86	42	55.56	16	100.00	28.90
M5	180	20	185.71	44	62.96	17	112.50	28.48
M6	215	25	257.14	50	85.19	17	112.50	28.64
M7	255	27	285.71	58	114.81	20	150.00	28.14
M8	293	28	300.00	63	133.33	23	187.50	28.42
M9	328	30	328.57	65	140.74	25	212.50	28.89
M10	366	33	371.43	66	144.44	29	262.50	30.43

*Tabla 3.21 Datos experimentales de aumento de color (UI) en el tiempo para azúcar refinada y monitoreo de temperatura (°C) en Bodega 6.*

Muestra	Día de muestreo	Azúcar Refinada B6 – Unidades de color UI		
		B6 E2	% aumento de color	T°C prom B6
M0	0	12	-	28.4
M1	40	15	25.00	33.04
M2	75	16	33.33	31.53
M3	113	16	33.33	31.09
M4	148	16	33.33	30.16
M5	180	16	33.33	29.74
M6	215	16	33.33	29.67
M7	255	16	33.33	28.98
M8	293	16	33.33	27.93
M9	328	16	33.33	30.60
M10	366	16	33.33	31.96

Se realizó el análisis de datos para este producto en base a promedios parciales (Tabla 3.22), un promedio realizado para los primeros cinco monitoreos muestra aumentos promedio entre 1 y 3 UI, que es donde se observa una mayor temperatura para ambas bodegas (28.48 y 31.32 °C y 28.4 y 33.0 °C respectivamente para bodega 5 y 6), y un promedio para los últimos cinco monitoreos, cuando la temperatura fue menor en las bodegas (28.14 y 30.43 °C y 27.93 y 31.96 °C respectivamente para bodega 5 y 6).

Debido a la alta pureza de este tipo de producto, el aumento de color se ve disminuido de manera general, pero de igual forma este análisis nos muestra como de un color en azúcar bajo se llega a colores altos, con porcentajes de aumento de color altos; se logra visualizar que para la muestra que inició con color de producción mayor (27 UI), la muestra B5 E3, presentó un mayor promedio general de aumento de color con 4 UI promedio de aumento entre cada monitoreo.

*Tabla 3.22 Diferencias del aumento de color respecto a cada toma de muestra consecutiva, promedios parciales de aumento, y promedio general de aumento para cada muestra de azúcar refinada almacenada en Bodega 6.*

MUESTRA	M0-M1	M1-M2	M2-M3	M3-M4	M4-M5	promedio	M5-M6	M6-M7	M7-M8	M8-M9	M9-M10	promedio	promedio general
B6 E2	3	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
B5 E2	7	2	1	0	3	3	5	2	1	2	3	3	3
B5 E3	8	1	2	4	2	3	6	8	5	2	1	4	4
B5 E4	5	2	1	0	1	2	0	3	3	2	4	2	2

En las figuras 3.15 y 3.16 se detallan de manera gráfica el comportamiento de cada una de las muestras, en comparación al comportamiento de las temperaturas promedio. Se puede apreciar que, para los primeros meses de seguimiento, que aproximadamente estuvieron comprendidos entre los meses de febrero/marzo a los meses de agosto/septiembre, la temperatura fue mayor por la presencia de la época del verano en el país con temperaturas entre 28.48 y 31.32 °C y 28.4 y 33.0 °C respectivamente para bodega 5 y 6, mientras que, para los otros meses, aproximadamente entre agosto/septiembre a febrero/marzo los meses comprendidos corresponden a la época más fría del año en el país con temperaturas entre 28.14 y 30.43 °C para la bodega 5 y temperaturas entre 27.93 y 31.96 °C para bodega 6. Aunque para la bodega 6, los dos últimos puntos de temperatura

presentan una elevación, lo que coincide con los meses de febrero/marzo que vuelve a empezar la época calurosa.

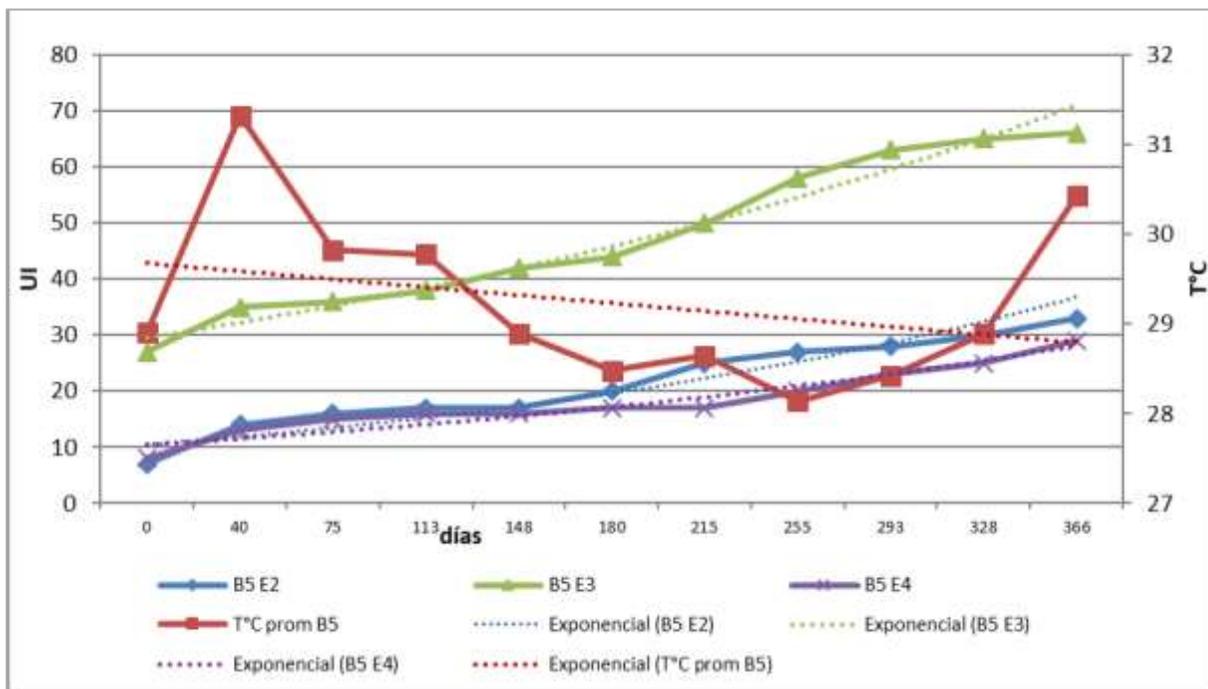


Figura 3.15 Gráfico obtenido para aumento de color (UI) en azúcar refinada en el tiempo y temperatura (°C) promedio en Bodega 5.

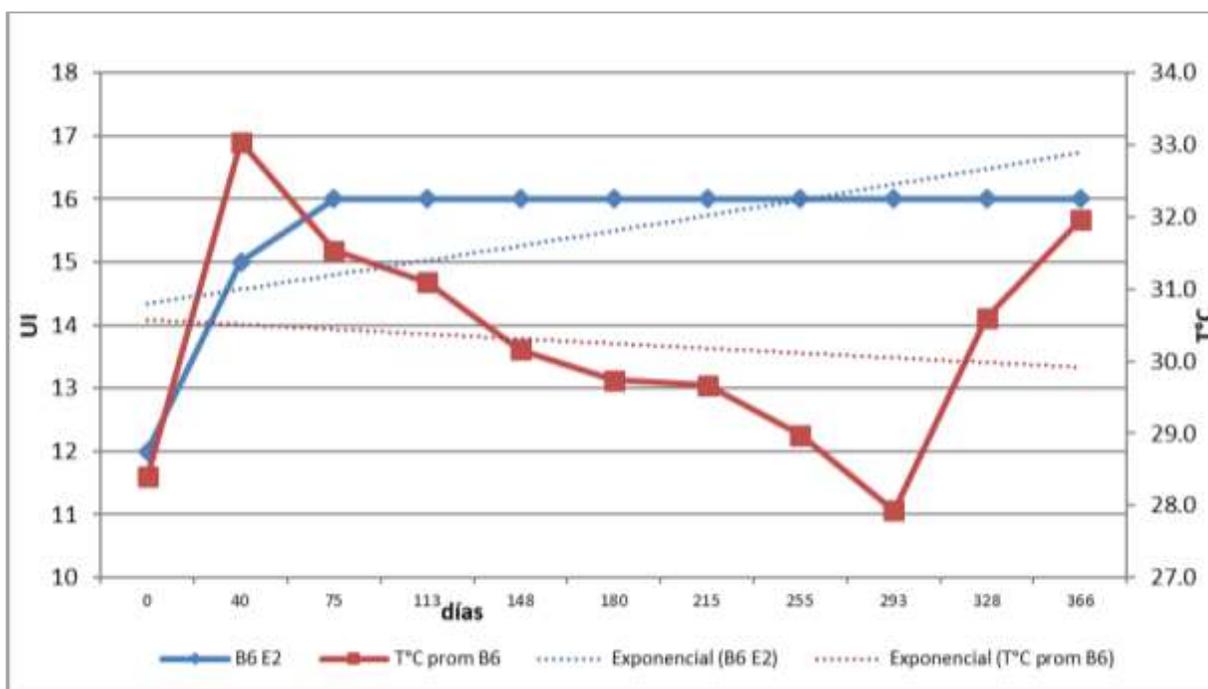


Figura 3.16 Gráfico obtenido para aumento de color (UI) en azúcar refinada en el tiempo y temperatura (°C) promedio en Bodega 6.

El mismo análisis de seguimiento de color se realizó, pero con relación a la humedad relativa de cada bodega donde se tuvo almacenada cada muestra de azúcar refinada (Tabla 3.23). En este análisis se mira un alza de humedad relativa en los meses de lluvia típicos del país, aproximadamente entre julio/noviembre con valores entre 47.90 y 72.16 % para la bodega 5 y valores entre 39.97 y 65.95 % para bodega 6. No se encuentra una relación marcada entre la humedad relativa con el aumento de color durante el a. Además, como fue explicado anteriormente, el producto tiene una protección almacenamiento. El plástico que los resguarda de las condiciones ambientales, pero mayormente contra la variable humedad relativa. Lo que hace menos vulnerable al azúcar a cualquier efecto que pueda realizar sobre esta.

Se presenta un análisis gráfico del comportamiento de la humedad relativa para cada bodega donde se realizó en seguimiento de azúcar refinada en conjunto con el seguimiento de color para cada muestra (Figura 3.17 y Figura 3.18). Se logra ver reflejado el comportamiento de la humedad relativa para ambas bodegas, aunque con un mayor énfasis para la bodega 5.

*Tabla 3.23 Datos experimentales de aumento de color (UI) en el tiempo para azúcar refinada y monitoreo de humedad relativa (%) en Bodega 5.*

Muestra	Día de muestreo	Azúcar Refinada B5 – Unidades de color UI						
		B5 E2	% aumento de color	B5 E3	% aumento de color	B5 E4	% aumento de color	HR% prom B5
M0	0	7	-	27	-	8	-	49.20
M1	40	14	100.00	35	29.63	13	62.50	47.90
M2	75	16	128.57	36	33.33	15	87.50	66.13
M3	113	17	142.86	38	40.74	16	100.00	65.62
M4	148	17	142.86	42	55.56	16	100.00	72.16
M5	180	20	185.71	44	62.96	17	112.50	70.30
M6	215	25	257.14	50	85.19	17	112.50	68.38
M7	255	27	285.71	58	114.81	20	150.00	64.70
M8	293	28	300.00	63	133.33	23	187.50	59.74
M9	328	30	328.57	65	140.74	25	212.50	63.55
M10	366	33	371.43	66	144.44	29	262.50	56.74

Tabla 3.24 Datos experimentales de aumento de color (UI) en el tiempo para azúcar refinada y monitoreo de humedad relativa (%) en Bodega 6.

Muestra	Día de muestreo	Azúcar Refinada B6 – Unidades de color UI		
		B6 E2	% aumento de color	HR% prom B6
M0	0	12	-	39.97
M1	40	15	25.00	44.05
M2	75	16	33.33	60.91
M3	113	16	33.33	60.14
M4	148	16	33.33	65.95
M5	180	16	33.33	63.05
M6	215	16	33.33	63.43
M7	255	16	33.33	61.17
M8	293	16	33.33	60.07
M9	328	16	33.33	61.31
M10	366	16	33.33	50.79

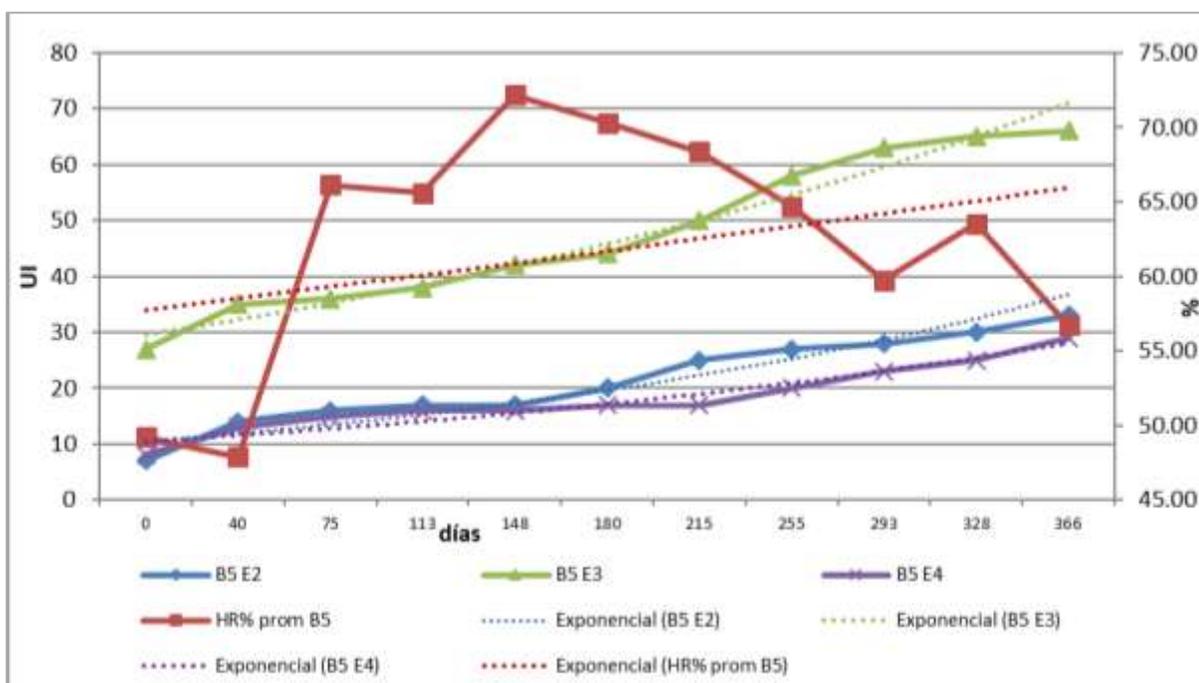


Figura 3.17 Gráfico obtenido para aumento de color (UI) en azúcar refinada en el tiempo y humedad relativa (%) promedio en Bodega 5.

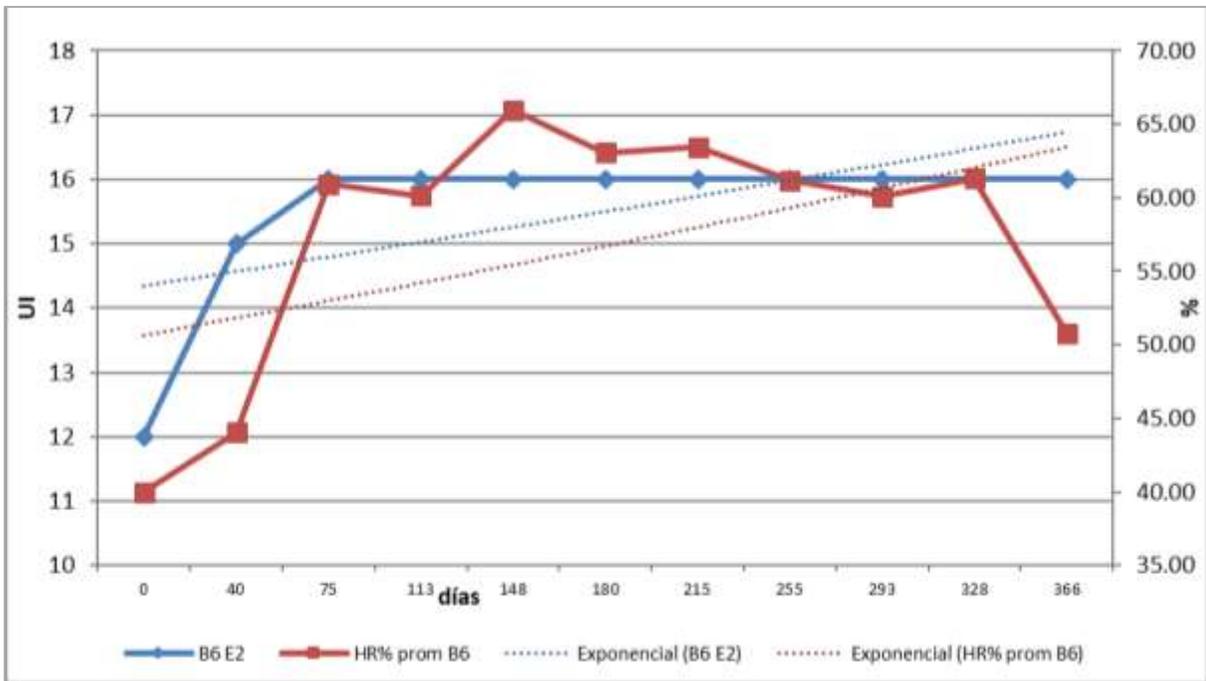


Figura 3.18 Gráfico obtenido para aumento de color (UI) en azúcar refinada en el tiempo y humedad relativa (%) promedio en Bodega 6.

### 3.4 Análisis estadístico (ANOVA) para las diferencias de cambios de color de azúcar almacenada en bodegas.

Se realizó un análisis de varianza para demostrar estadísticamente las diferencias de color que se produjeron en cada bodega para todos los tipos de azúcar en investigación, para cada muestreo y para cada muestra, con el objetivo de revelar si existe o no diferencia significativa entre el almacenamiento en las diferentes bodegas. Se establecieron para la interpretación de los resultados, una Hipótesis Alternativa (H1) y una Hipótesis Nula (H0):

- H1: Si existen diferencias significativas entre los cambios de color en azúcar almacenada entre bodegas
- H0: No existen diferencias significativas entre los cambios de color en azúcar almacenada entre bodegas

Se realizaron los cálculos para los vapores de “p” que es el indicativo para saber si se acepta o rechaza la hipótesis nula, para cada uno de los análisis realizados.

a) *Análisis de varianza para las diferencias de cambios de color en azúcar cruda ensacada.*

Para las muestras analizadas de azúcar cruda ensacada, los resultados obtenidos demuestran que con un nivel de confianza del 99%, se acepta la hipótesis nula (H0), lo que quiere decir que para el juego de datos analizados no existen diferencias significativas entre bodegas para el cambio de color en azúcar almacenada, ya que “p” dio como resultado > 0.05, para todas las muestras analizadas.

*Tabla 3.25 ANOVA para muestras de azúcar cruda ensacada Bodega 4 (B4) y Bodega 5 (B5).*

ANOVA AZUCAR CRUDA ENSACADA B4 - B5						
		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
m1	Entre grupos	598.533	1	598.533	0.675	0.471
	Dentro de grupos	2658.667	3	886.222		
	Total	3257.200	4			
m2	Entre grupos	130416.133	1	130416.133	8.361	0.063
	Dentro de grupos	46792.667	3	15597.556		
	Total	177208.800	4			
m3	Entre grupos	374.533	1	374.533	0.358	0.592
	Dentro de grupos	3142.667	3	1047.556		
	Total	3517.200	4			
m4	Entre grupos	120.000	1	120.000	0.078	0.798
	Dentro de grupos	4612.000	3	1537.333		
	Total	4732.000	4			
m5	Entre grupos	12.033	1	12.033	0.002	0.967
	Dentro de grupos	17817.167	3	5939.056		
	Total	17829.200	4			
m6	Entre grupos	58.800	1	58.800	1.103	0.371
	Dentro de grupos	160.000	3	53.333		
	Total	218.800	4			
m7	Entre grupos	963.333	1	963.333	7.142	0.076
	Dentro de grupos	404.667	3	134.889		
	Total	1368.000	4			
m8	Entre grupos	1984.533	1	1984.533	4.910	0.113
	Dentro de grupos	1212.667	3	404.222		
	Total	3197.200	4			
m9	Entre grupos	276.033	1	276.033	0.212	0.676
	Dentro de grupos	3905.167	3	1301.722		
	Total	4181.200	4			
m10	Entre grupos	104.533	1	104.533	0.207	0.680
	Dentro de grupos	1512.667	3	504.222		
	Total	1617.200	4			

b) *Análisis de varianza para las diferencias de cambios de color en azúcar blanca sulfitada.*

Para las muestras analizadas de azúcar blanca sulfitada, los resultados obtenidos demuestran que con un nivel de confianza del 99%, se acepta la hipótesis nula (H0), lo que quiere decir que para el juego de datos analizados no existen diferencias significativas entre bodegas para el cambio de color en azúcar almacenada, ya que “p” dio como resultado > 0.05, para todas las muestras analizadas.

*Tabla 3.26 ANOVA para muestras de azúcar blanca sulfitada Bodega 4 (B4), Bodega 5 (B5) y Bodega 6 (B6).*

ANOVA AZUCAR BLANCA SULFITADA B4 - B5 - B6						
		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
m1	Entre grupos	48.807	2	24.404	0.260	0.776
	Dentro de grupos	1033.550	11	93.959		
	Total	1082.357	13			
m2	Entre grupos	153.664	2	76.832	0.253	0.781
	Dentro de grupos	3335.550	11	303.232		
	Total	3489.214	13			
m3	Entre grupos	6.514	2	3.257	0.112	0.895
	Dentro de grupos	319.200	11	29.018		
	Total	325.714	13			
m4	Entre grupos	106.107	2	53.054	1.703	0.227
	Dentro de grupos	342.750	11	31.159		
	Total	448.857	13			
m5	Entre grupos	81.629	2	40.814	0.535	0.600
	Dentro de grupos	839.800	11	76.345		
	Total	921.429	13			
m6	Entre grupos	166.657	2	83.329	3.578	0.064
	Dentro de grupos	256.200	11	23.291		
	Total	422.857	13			
m7	Entre grupos	29.357	2	14.679	1.313	0.308
	Dentro de grupos	123.000	11	11.182		
	Total	152.357	13			
m8	Entre grupos	150.829	2	75.414	2.978	0.093
	Dentro de grupos	278.600	11	25.327		
	Total	429.429	13			
m9	Entre grupos	118.179	2	59.089	1.155	0.350
	Dentro de grupos	562.750	11	51.159		
	Total	680.929	13			
m10	Entre grupos	50.464	2	25.232	0.968	0.410
	Dentro de grupos	286.750	11	26.068		
	Total	337.214	13			

c) *Análisis de varianza para las diferencias de cambios de color en azúcar blanco superior.*

Para las muestras analizadas de azúcar blanco superior, los resultados obtenidos demuestran que con un nivel de confianza del 99%, se acepta la hipótesis nula (H0), lo que quiere decir que para el juego de datos analizados no existen diferencias significativas entre bodegas para el cambio de color en azúcar almacenada, ya que “p” dio como resultado > 0.05, para todas las muestras analizadas.

*Tabla 3.27 ANOVA para muestras de azúcar blanco superior Bodega 3 (B3) y Bodega 6 (B6).*

ANOVA AZUCAR BLANCO SUPERIOR B3 - B6						
		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
m1	Entre grupos	320.133	1	320.133	1.333	0.332
	Dentro de grupos	720.667	3	240.222		
	Total	1040.800	4			
m2	Entre grupos	4.033	1	4.033	1.320	0.334
	Dentro de grupos	9.167	3	3.056		
	Total	13.200	4			
m3	Entre grupos	16.133	1	16.133	0.885	0.416
	Dentro de grupos	54.667	3	18.222		
	Total	70.800	4			
m4	Entre grupos	.833	1	.833	0.273	0.638
	Dentro de grupos	9.167	3	3.056		
	Total	10.000	4			
m5	Entre grupos	1.633	1	1.633	0.092	0.781
	Dentro de grupos	53.167	3	17.722		
	Total	54.800	4			
m6	Entre grupos	3.333	1	3.333	0.441	0.554
	Dentro de grupos	22.667	3	7.556		
	Total	26.000	4			
m7	Entre grupos	38.533	1	38.533	2.195	0.235
	Dentro de grupos	52.667	3	17.556		
	Total	91.200	4			
m8	Entre grupos	5.633	1	5.633	1.844	0.268
	Dentro de grupos	9.167	3	3.056		
	Total	14.800	4			
m9	Entre grupos	6.533	1	6.533	0.684	0.469
	Dentro de grupos	28.667	3	9.556		
	Total	35.200	4			
m10	Entre grupos	4.800	1	4.800	1.029	0.385
	Dentro de grupos	14.000	3	4.667		
	Total	18.800	4			

d) *Análisis de varianza para las diferencias de cambios de color en azúcar refinada.*

Para las muestras analizadas de azúcar refinada, los resultados obtenidos demuestran que con un nivel de confianza del 99%, se acepta la hipótesis nula (H0), lo que quiere decir que para el juego de datos analizados no existen diferencias significativas entre bodegas para el cambio de color en azúcar almacenada, ya que “p” dio como resultado  $> 0.05$ , para todas las muestras analizadas; a excepción del muestreo 9, donde por tener todas las muestras la misma diferencia en cambio de color, el resultado fue nulo.

*Tabla 3.28 ANOVA para muestras de azúcar refinada Bodega 5 (B5) y Bodega 6 (B6).*

ANOVA AZUCAR REFINADA B5 - B6						
		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
m1	Entre grupos	10.083	1	10.083	4.321	0.173
	Dentro de grupos	4.667	2	2.333		
	Total	14.750	3			
m2	Entre grupos	.333	1	.333	1.000	0.423
	Dentro de grupos	.667	2	.333		
	Total	1.000	3			
m3	Entre grupos	1.333	1	1.333	4.000	0.184
	Dentro de grupos	.667	2	.333		
	Total	2.000	3			
m4	Entre grupos	1.333	1	1.333	0.250	0.667
	Dentro de grupos	10.667	2	5.333		
	Total	12.000	3			
m5	Entre grupos	3.000	1	3.000	3.000	0.225
	Dentro de grupos	2.000	2	1.000		
	Total	5.000	3			
m6	Entre grupos	10.083	1	10.083	0.976	0.427
	Dentro de grupos	20.667	2	10.333		
	Total	30.750	3			
m7	Entre grupos	14.083	1	14.083	1.363	0.363
	Dentro de grupos	20.667	2	10.333		
	Total	34.750	3			
m8	Entre grupos	6.750	1	6.750	1.688	0.324
	Dentro de grupos	8.000	2	4.000		
	Total	14.750	3			
m9	Entre grupos	3.000	1	3.000		
	Dentro de grupos	0.000	2	0.000		
	Total	3.000	3			
m10	Entre grupos	5.333	1	5.333	2.286	0.270
	Dentro de grupos	4.667	2	2.333		
	Total	10.000	3			

### 3.4.1 Análisis de correlación entre color de azúcar y tiempo de almacenaje.

En la bibliografía se encuentra información dando por hecho que existe una relación entre la variable color de azúcar, que sufre un cambio con respecto a la variable tiempo de almacenaje; por lo que se ha realizado un análisis de correlación de Pearson, el cual se ejecutó para comprobar estadísticamente el grado de relación que tienen estas dos variables.

Para todos los análisis de correlación de Pearson se calculó valores de significancia, que es el indicativo para saber si se cuenta con una correlación significativa para cada uno de los análisis realizados. Con un nivel de significancia del 0.01, se confirma con este análisis que para todas las muestras se obtiene una correlación entre 0.93 – 0.99, lo cual da un nivel de correlación positivo entre las variables estudiadas. Solamente para una muestra de azúcar refinada, la muestra de la bodega 6, estiba 2, que no tuvo cambio en todo el monitoreo, dio como resultado un valor de 0.596, el cual es un poco bajo, pero sigue siendo muestra de una correlación positiva entre variables.

a) *Para Azúcar Cruda Ensacada:*

*Tabla 3.29 Correlación de Pearson para azúcar cruda ensacada-tiempo de almacenaje*

CORRELACION DE PEARSON AZUCAR CRUDA ENSACADA - TIEMPO DE ALMACENAJE						
		ColorB5E1	ColorB5E2	ColorB4E4	ColorB4E6	ColorB4E8
Tiempo almacenaje	Correlación de Pearson	0.953**	0.961**	0.864**	0.961**	0.919**
	Sig. (bilateral)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	N	11	11	11	11	11
**. La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).						

b) *Para Azúcar Blanca Sulfitada:*

*Tabla 3.30 Correlación de Pearson para azúcar blanca sulfitada Bodega 4 (B4) - tiempo de almacenaje*

CORRELACION DE PEARSON AZUCAR BLANCA SULFITADA - TIEMPO DE ALMACENAJE B4						
		Color B4E8	Color B4E9	Color B4E10	Color B4E11	Color B4E12
Tiempo almacenaje	Correlación de Pearson	0.987**	0.978**	0.924**	0.948**	0.948**
	Sig. (bilateral)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	N	11	11	11	11	11
**. La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).						

Tabla 3.31 Correlación de Pearson para azúcar blanca sulfitada  
Bodega 5 (B5) - tiempo de almacenaje

CORRELACION DE PEARSON AZUCAR BLANCA SULFITADA - TIEMPO DE ALMACENAJE B5					
		Color B5E1	Color B5E2	Color B5E5	Color B5E12
Tiempo almacenaje	Correlación de Pearson	0.972**	0.944**	0.940**	0.941**
	Sig. (bilateral)	0.00	0.00	0.00	0.00
	N	11	11	11	11
**. La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).					

Tabla 3.32 Correlación de Pearson para azúcar blanca sulfitada  
Bodega 6 (B6) - tiempo de almacenaje

CORRELACION DE PEARSON AZUCAR BLANCA SULFITADA - TIEMPO DE ALMACENAJE B6						
		Color B6E5	Color B6E8	Color B6E9	Color B6E10	Color B6E12
Tiempo almacenaje	Correlación de Pearson	0.966**	0.976**	0.966**	0.959**	0.968**
	Sig. (bilateral)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	N	11	11	11	11	11
**. La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).						

c) Para Azúcar Blanco Superior:

Tabla 3.33 Correlación de Pearson para azúcar blanco superior -tiempo de almacenaje

CORRELACION DE PEARSON AZUCAR BLANCO SUPERIOR - TIEMPO DE ALMACENAJE						
		Color B3E1	Color B3E2	Color B6E1	Color B6E3	Color B6E5
Tiempo almacenaje	Correlación de Pearson	0.931**	0.974**	0.993**	0.988**	0.988**
	Sig. (bilateral)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	N	11	11	11	11	11
**. La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).						

d) Para Azúcar Refinada:

Tabla 3.34 Correlación de Pearson para azúcar refinada -tiempo de almacenaje

CORRELACION DE PEARSON AZUCAR REFINADA - TIEMPO DE ALMACENAJE					
		Color B6E2	Color B5E2	Color B5E3	Color B5E4
Tiempo almacenaje	Correlación de Pearson	0.596	0.981**	0.985**	0.958**
	Sig. (bilateral)	0.053	0.00	0.00	0.00
	N	11	11	11	11
**. La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).					

# Observaciones

---

La investigación bibliográfica desarrollada junto con el análisis resultados de los datos obtenidos con el monitoreo de variables ambientales y monitoreo del desarrollo de color para muestras de azúcar cruda ensacada, azúcar blanca sulfitada, azúcar blanco superior y azúcar refinada, sirven de base para realizar las siguientes observaciones:

1. Una gran cantidad de factores que afectan el color final del azúcar son muy complejos y poco controlables, principalmente los componentes que inician su actividad desde la caña de azúcar, como los pigmentos (sección 1.5.4); esto no quiere decir que bajo las condiciones apropiadas de operación no puedan ser disminuidos de tal manera que se obtengan mejores resultados de color en el producto final.
2. Cada etapa tiene sus principales compuestos y reacciones no deseadas que llevan a generar color, los compuestos, pigmentos y azúcares reductores que son propios de la caña de azúcar, y que siguen en el proceso hasta afectar el producto final, no pueden ser tratados individualmente, pero en cada etapa del proceso se reúnen las condiciones propicias de manera física y fisicoquímica para ajustar el producto y llevarlo a las características deseadas (Sección 1.5.8 a sección 1.5.13).
3. La etapa crítica del proceso en cuanto a la formación de color en el azúcar es el tratamiento de jugo, a pesar de todas las posibles configuraciones de tratamiento que cada fábrica puede implementar, estas no aseguran la calidad del producto en su totalidad, pero manteniendo cada una de las variables operativas dentro de control, en especial la temperatura entre 103 y 105°C y pH cercano al neutro, sin sobrepasar 8.5, las condiciones se vuelven aptas para lograr los resultados esperados.

4. En la actualidad no se encuentran muchas innovaciones a nivel mundial para el almacenaje de azúcar empacada, por lo que, garantizando las condiciones de temperatura y humedad relativa se puede llegar a tener el impacto positivo deseado para minimizar el aumento de color del azúcar durante el tiempo que deba pasar almacenada.

# Conclusiones

---

El control de cada una de las muestras de azúcar que se llevó a cabo para ésta investigación y el monitoreo de las condiciones ambientales dentro de cada bodega, aportaron la información base para las siguientes conclusiones:

1. Se caracterizó cada una de las bodegas en estudio, estructuralmente todas son similares, sólo cambian en tamaño y la capacidad de almacenamiento; pero aun con la similitud en la parte estructural, las características ambientales de Temperatura y Humedad Relativa, sí tienen una diferencia, en promedio de 2.49°C entre las temperatura más baja 28.12°C de la bodega 4 y la más alta 30.62°C de la bodega 6, y de 11.99% entre la humedad relativa más baja 57.90% de la bodega 6 y la más alta 69.89% de la bodega 4.
2. No se muestra una tendencia general para todos los tipos de azúcar y cada bodega de almacenamiento, qué demuestre que el azúcar al tener un color inicial de producción mayor tendrá también un mayor porcentaje de aumento de color, así se tiene:
  - a. Azúcar cruda ensacada: la muestra de la bodega 5 estiba 2 sí se comprobó esta teoría, ya que inició con 737 UI y alcanzó 101.09% de aumento, a diferencia de la muestra de la estiba 1, almacenada en la misma bodega, que iniciando con un color de 711 UI alcanzó el 87.62% de aumento.
  - b. Azúcar blanco superior: la muestra almacenada en la bodega 3 estiba 1, sí se comprobó también dado que inició con 85 UI y alcanzó 121.18% de aumento, a diferencia de la muestra de la estiba 2, almacenada en la misma bodega, que iniciando con 38 UI alcanzó el 113.16% de aumento.
  - c. Azúcar blanca sulfitada: no cumple con la premisa inicial de mayor color inicial mayor porcentaje de aumento a lo largo del tiempo, se observa que las muestras almacenadas en la bodega 4 , la estiba 8 fue la que inició con un mayor color, de 187 UI y aumentó 71.12%, en cambio la muestra de la estiba 11 fue la que alcanzó un aumento de 98.11% habiendo comenzado con color

de 159 UI; en la bodega 5, también se comportó sin tendencia aparente, la muestra de la estiba 1 fue la que inició con un mayor color, de 235 UI y aumentó 57.45%, en cambio la muestra de la estiba 12 fue la que alcanzó un aumento de 72.78% habiendo comenzado con color de 158 UI; en la bodega 6, también se comportó de igual manera, la muestra de la estiba 9 fue la que inició con un mayor color, de 214 UI y aumentó 70.09%, en cambio la muestra de la estiba 5 fue la que alcanzó un aumento de 129.22% habiendo comenzado con color de 154 UI.

- d. Azúcar cruda: las muestras monitoreadas en la bodega 4, tampoco cumplen con esta premisa, ya que la muestra de la estiba 4 fue la que inició con un mayor color, de 702 UI y aumentó 168.38%, en cambio la muestra de la estiba 8 fue la que alcanzó un aumento de 182.19% habiendo comenzado con color de 624 UI.
- e. Azúcar refinada: las muestras monitoreadas en la bodega 5, tampoco cumplen la premisa, dado que se observó que la muestra de la estiba 3 fue la que inició con un mayor color, de 27 UI y aumentó 144.44%, en cambio la muestra de la estiba 2 fue la que alcanzó un aumento de 371.43% habiendo comenzado con color de 7 UI.

3. Los productos de refinería contienen menos impurezas que puedan provocar color, a diferencia de los otros tipos de azúcares, esto puede ser causante de disminuir el comportamiento típico del color durante el almacenamiento, aunque por tener valores de color bajos, los aumentos que se dan en este tipo de azúcar logran mayor porcentaje respecto al color inicial, como la muestra de azúcar refinada de la bodega 5 estiba 2, con 371.43% de aumento, esta muestra inició con 7 UI y llegó a 33 UI.

4. La humedad relativa es la única condición ambiental que sobrepasa los límites que se recomiendan en la literatura para almacenamiento de azúcar, 60% de humedad relativa; para los datos promedio anual obtenidos en el monitoreo realizado, solamente la bodega 6 queda por debajo del 60% recomendado, con 57.90% promedio anual.

5. La temperatura recomendada para almacenamiento de azúcar, según la literatura no debe exceder los 38°C. Para el ingenio en estudio, ningún valor promedio anual de las bodegas excede ese valor, la bodega 6 es la que monitoreo con mayor temperatura promedio de 30.62°C. Aun para los valores promedio mensuales de todas las bodegas analizadas, el rango de en las bodegas es de temperaturas entre 26.39 y 33.04 °C, sin exceder los 38°C recomendados.
  
6. Los aumentos de color alcanzados para el azúcar cruda ensacada, luego de un año de almacenamiento durante el estudio, excedieron los valores que se establecen como especificaciones requeridas por los clientes internacionales que compran este tipo de azúcar; para este producto no se tiene parámetro máximo de color según normativa salvadoreña, el valor máximo especificado por los clientes es entre 1,500 a 1,800 UI (*Datos obtenidos del ingenio en estudio, para contratos de clientes en el extranjero, 2018*), por lo que los colores finales obtenidos para las muestras de azúcar almacenadas en la bodega 4 excederían los valores requeridos, principalmente la muestra de la estiba 4, que alcanzó un color de 1,884 UI; para la muestras de la bodega 5 estarían dentro de parámetro, pero acercándose mucho a los límites del cumplimiento con color para la muestra de la estiba 1 de 1,334 UI y la muestra de la estiba 2 con color 1,482 UI.
  
7. Los aumentos de color obtenidos para el azúcar blanco sulfitada, luego de un año de almacenamiento durante el estudio, no excedieron el parámetro de calidad establecido por la Norma Salvadoreña Obligatoria NSO 67.20.01:03, Azúcares. Especificaciones, que detalla para azúcar blanco sulfitado un valor máximo para color de 500 UI. Los colores máximos alcanzados por bodega fueron: para bodega 4 la muestra de la estiba 8 con color de 320 UI, para bodega 5 la muestra de la estiba 5 con color de 375 UI y para bodega 6 la muestra de la estiba 9 con color de 364 UI.

8. Los aumentos de color obtenidos para el azúcar blanco superior, luego de un año de almacenamiento durante el estudio, no excedieron el parámetro de calidad establecido por la Norma Salvadoreña Obligatoria NSO 67.20.01:03, Azúcares. Especificaciones, que detalla para azúcar blanco superior un valor máximo para color de 300 UI. Los colores máximos alcanzados por bodega fueron: para bodega 3 la muestra de la estiba 1 con color de 188 UI y para bodega 6 la muestra de la estiba 3 con color de 119 UI.
  
9. Los aumentos de color obtenidos para el azúcar refinada, luego de un año de almacenamiento durante el estudio, no excedieron el parámetro de calidad establecido por la Norma Salvadoreña Obligatoria NSO 67.20.01:03, Azúcares. Especificaciones, que detalla para azúcar refinada un valor máximo para color de 80 UI. El color máximo alcanzado fue para bodega 5 la muestra de la estiba 3 con color de 66 UI. Parte de este producto puede ser producido para su comercialización en el extranjero, por lo que su parámetro de calidad a cumplir cambia de acuerdo con lo establecido por los clientes, al igual que con el azúcar cruda ensacada; para este producto se establece un valor de cumplimiento de 45 UI (*Datos obtenidos del ingenio en estudio, para contratos de clientes en el extranjero, 2018*).

# Recomendaciones

---

1. El manejo agronómico del cultivo de la caña de azúcar, aunque no es una etapa crítica del proceso para la formación del color, debe tener de igual forma el máximo control posible sobre sus variables: control de plagas, aplicación de madurantes y manejo agronómico en general, así como sus condiciones de cosecha para disminuir de esta manera, su afectación posterior en el proceso productivo.
2. Se debe tener el máximo control operativo posible en las variables y etapas críticas del proceso, en especial en la clarificación del jugo con temperaturas entre 103 y 105°C y pH cercano al 7, que no exceda el 8.5; y en la clarificación del licor de refinería una temperatura aproximadamente de 85°C y pH 6 y 6.8. Además, la dosificación correcta de cada uno de los productos químicos utilizados para la separación de color como la cal, azufre, floculante, etc. ya que es en estas etapas donde se logra la mayor disminución de sustancias que pueden aumentar el color del azúcar al final del proceso.
3. Las condiciones de almacenamiento del ingenio en estudio son en gran parte de sus características estructurales las recomendadas por la bibliografía, por lo que para poder mejorar condiciones ambientales de almacenamiento se deben considerar mejoras de hermeticidad y acondicionamiento ambiental que asegure las condiciones de temperatura y humedad relativa apropiadas para disminuir lo más posible la degradación del color durante el tiempo que el azúcar sea resguardada en estas. Aunque bajo un escenario de instalación de un equipo especializado, se necesitarían al menos dos enfriadores de agua tipo chiller, con capacidad de 63 Ton para cada bodega, lo cual solo en equipos significaría aproximadamente \$100,000 más mano de obra, e inversión en infraestructura de bodegas para sellar y asegurar la hermeticidad total del espacio y un aumento en los gastos de operación debido al gasto de energía eléctrica.

4. Se deberá analizar el costo-beneficio de la instalación de un sistema de enfriamiento, ya que de las condiciones ambientales estudiadas, solo la humedad relativa presenta valores por arriba del valor recomendado por la bibliografía (60%), con 57.90% promedio anual. En cambio para temperatura el valor recomendado por la bibliografía (38°C) no fue excedido, alcanzando para la bodega 6 que según el monitoreo es la que cuenta con mayor temperatura promedio anual, un valor de 30.62°C.
5. Dado que la bibliografía recomienda que la estructura de las bodegas sea de mampostería, se recomienda que la parte metálica de la estructura que tienen las bodegas del ingenio en estudio, se pueda adecuar de tal manera que cumplan con esta recomendación, de no ser factible por razones estructurales por la altura de algunas de las bodegas, se recomienda un estudio de alguna variedad de tipo de materiales que tengan la propiedad aislante de las condiciones ambientales, para realizar un mejor acondicionamiento de esta manera; pudiendo lograr temperaturas más estables dentro de las bodegas durante todo el año, acortando el rango actual de 26.39 y 33.04 °C.

# Referencias Bibliográficas

---

- Azúcares.Especificaciones, NSO: 67.20.01:03 (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT 18 de Marzo de 2003).
- Barrientos Aquino, E. M. (Mayo de 2005). Trabajo de Graduación. *Incidencia de las Variables Climatológicas (Humedad y Temperatura) en el Deterioro del Color del Azúcar Guatemalteco*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Chen, J. C. (1999). *Manual del Azúcar de Caña*. D.F. México: LIMUSA, S.A. de C.V.
- Comisión del Codex Alimentarius. (1997). Código Internacional Recomendado de Prácticas. *Principios Generales de Higiene de los Alimentos*. Roma, Italia.
- CONACYT, MINECO, MIFIC, SIC, MIEC. (5 de Octubre de 2006). Reglamento Técnico Centroamericano. *Industria de alimentos y bebidas procesados. Buenas practicas de manufactura. Principios generales*. Centroamerica.
- Cultivo de Caña de Azúcar: Caña de Azúcar* . (18 de mayo de 2018). Obtenido de Caña de Azúcar: <http://xn--caadeazucar-2db.net/cultivo/>
- Cultivo de la Caña de Azúcar: EcuRed*. (15 de Mayo de 2018). Obtenido de EcuRed Conocimientos con todos y para todos: [https://www.ecured.cu/Cultivo\\_de\\_la\\_ca%C3%B1a\\_de\\_az%C3%BAcar](https://www.ecured.cu/Cultivo_de_la_ca%C3%B1a_de_az%C3%BAcar)
- Hernández, M. (10 de Septiembre de 2010). *Meteoares*. Obtenido de Blogspot: <http://meteoares.blogspot.com/2010/09/que-es-la-humedad-relativa-como-varia.html>
- Herrera Alfaro, O. F.; García Cárcamo, R. A.; Renderos Arrué, J. C. (2016). *Evaluación Sobre el Desarrollo del Color en el Almacenamiento de Azúcar*. San Salvador, El Salvador: Universidad Centroamericana José Simeón Cañas.
- Honig, P. (1969). *Principios de Tecnología Azucarera Tomo I*. D.F. México: Compañía Editorial Continental, S.A.
- Honig, P. (1969). *Principios de Tecnología Azucarera Tomo II*. D.F. México: Compañía Editorial Continental, S.A.
- Honig, P. (1969). *Principios de Tecnología Azucarera, Tomo III*. D. F. México: Compañía Editorial Continental, S.A.
- ICUMSA, I. C. (2015). *Libro de Métodos*. Berlin, Alemania: Bartens.
- Larrahondo, J. E. (1995). *Calidad de la Caña de Azúcar, El Cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia*. Cali, Colombia: CENICAÑA, CENTRO DE INVESTIGACION DE LA CAÑA DE AZUCAR DE COLOMBIA.
- Larrahondo, J. E. (27 de May de 2009). Impact of extraneous matter on post-harvest sucrose losses and quality. *Sugar Technologist*.

Ley de la Producción, Industrialización y Comercialización de la Agroindustria Azucarera de El Salvador, N° 490 (Organo Legislativo 26 de Julio de 2001).

Lima de Aguiar, C., Bodoni Rocha, A. L., Rodrigues Jambassi, J., Sampaio Baptista, A., & Bergamin Lima, R. (2015). Factors Affecting Color Formation During. *Focusing on Modern Food Industry, Volume 5*.

Ministerio de Salud. (1 de Febrero de 2013). Norma Técnica de Alimentos. San Salvador, El Salvador.

Reglamento de Distribución de Asignaciones anuales de Azúcar para los Mercados Interno, Preferencial y Mundial, Decreto N° 18 (Organo Legislativo 26 de Julio de 2001).

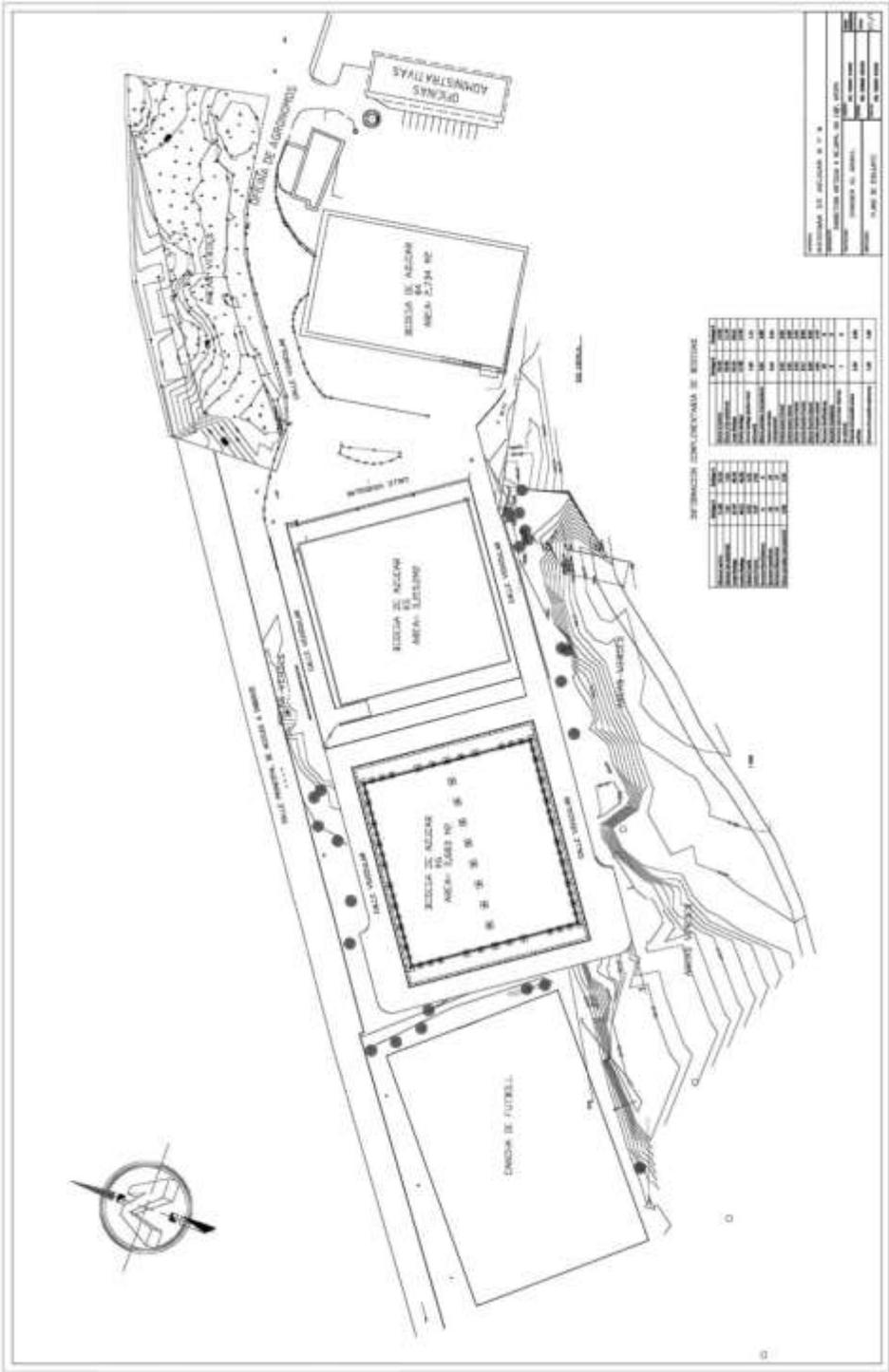
Reglamento del Sistema de Pago de Caña de Azúcar, Decreto N° 490 (Organo Legislativo 26 de Julio de 2001).

Rein, P. (2012). *Ingeniería de la Caña de Azúcar*. Berlin: Bartens.

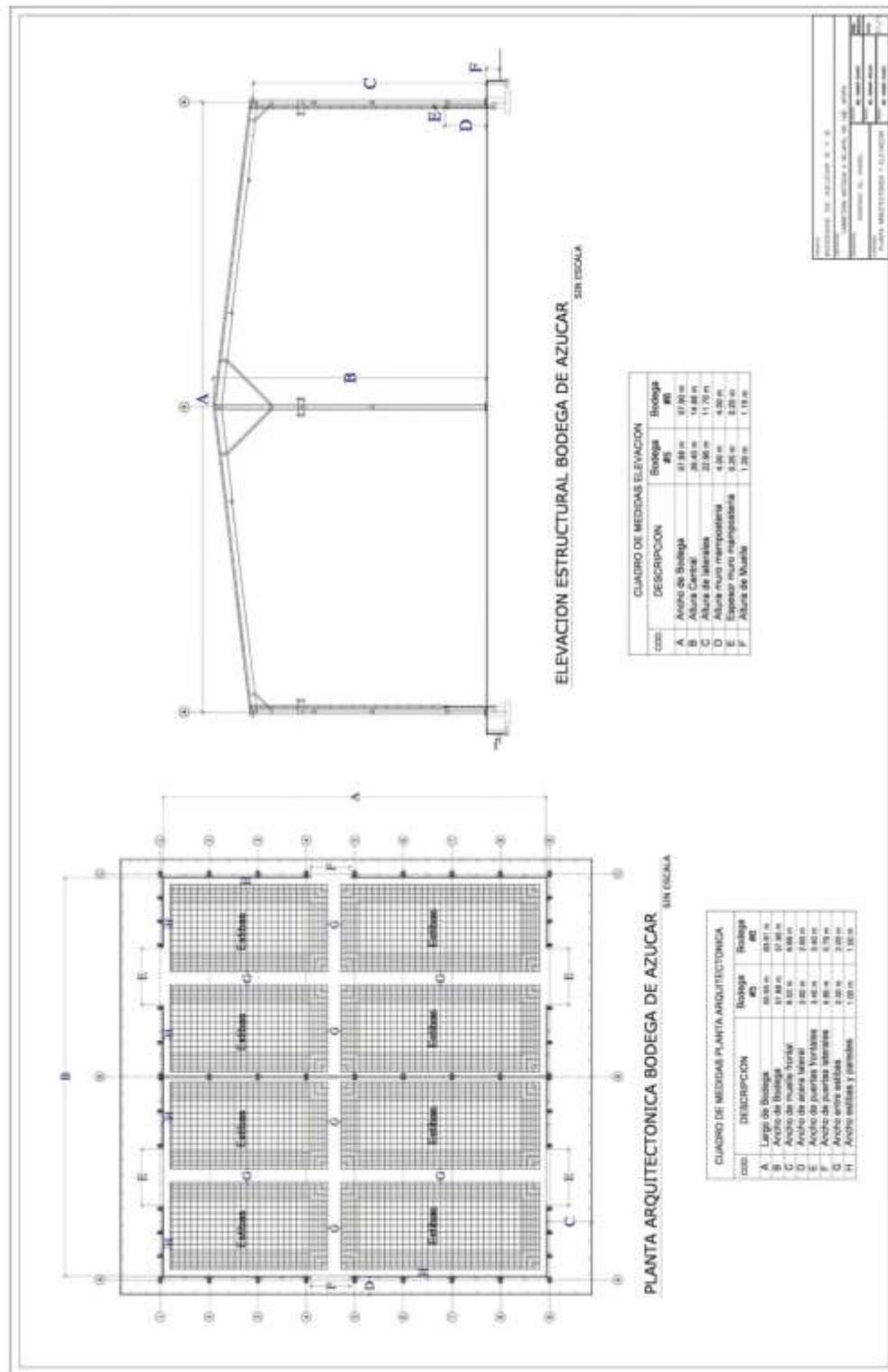
Smith, I. A. (1990). A Survey of Colour Input and Formation in Process. *Proceedings of The South African Sugar Technologists' Association*.

# ANEXOS

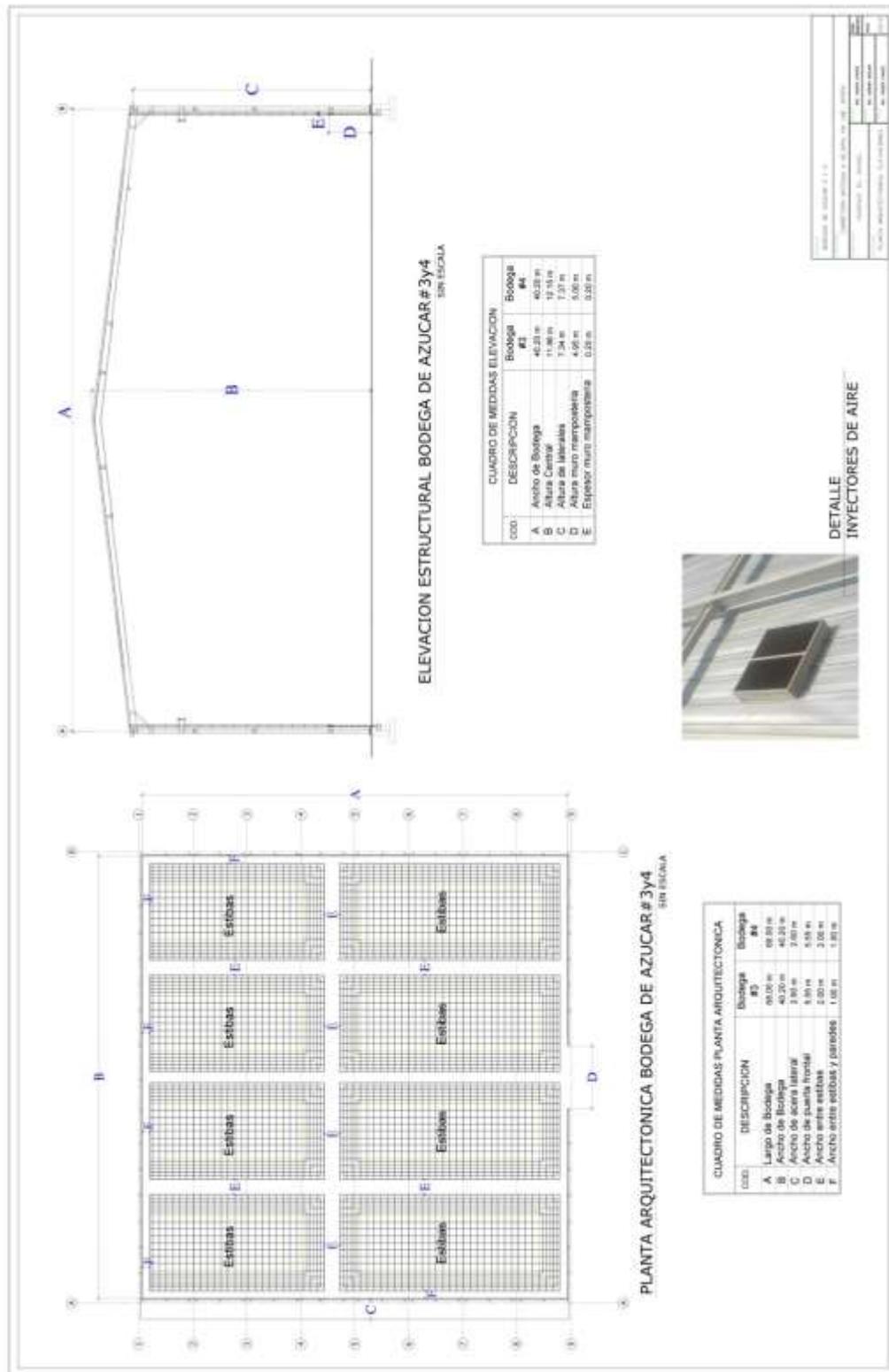
Anexo A – Planos de ubicación y distribución de bodegas del ingenio en estudio  
 A-1 Plano de ubicación de las bodegas del ingenio en estudio.



A-2 Plano de distribución de las bodegas del ingenio en estudio Bodega 5 y Bodega 6.



A-3 Plano de distribución de las bodegas del ingenio en estudio Bodega 3 y Bodega 4



Anexo B – Repetibilidad y Reproducibilidad del análisis de color para muestras de azúcar crudo y azúcar Blanca y Refinada (ICUMSA, 2015)

**Repetibilidad y reproducibilidad para azúcar crudo<sup>8</sup>, azúcar moreno<sup>1</sup> y jarabes coloreados<sup>1</sup>**

Muestra y rango de color	Repetibilidad ( <i>r</i> )	Reproducibilidad ( <i>R</i> )
Azúcar crudo		
500–2000	110	380
2000–7000	300	960
Azúcar moreno y jarabe coloreado		
2200–2600	130	370
4300–5600	190	1350
34000–42000	1900	5230

**Precisión.** Para azúcares con valores de color ICUMSA hasta 50 IU<sub>7,0</sub> la diferencia absoluta entre dos resultados, obtenidos bajo condiciones de repetibilidad, no deberá ser mayor que 3 IU<sub>7,0</sub>.<sup>8</sup>

Para azúcares con valores de color ICUMSA hasta 50 IU<sub>7,0</sub> la diferencia absoluta entre dos resultados, obtenidos bajo condiciones de reproducibilidad, no deberá ser mayor que 7 IU<sub>7,0</sub>.<sup>8</sup>

Para azúcares con valores de color ICUMSA entre 50 y 200 IU<sub>7,0</sub> la diferencia absoluta entre dos resultados, obtenidos bajo condiciones de repetibilidad, no deberá ser mayor que 9 IU<sub>7,0</sub>.<sup>9</sup>

Para azúcares con valores de color ICUMSA entre 50 y 200 IU<sub>7,0</sub> la diferencia absoluta entre dos resultados, obtenidos bajo condiciones de reproducibilidad, no deberá ser mayor que 22 IU<sub>7,0</sub>.<sup>9</sup>

Para azúcares con valores de color ICUMSA entre 200 y 600 IU<sub>7,0</sub> la diferencia absoluta entre dos resultados, obtenidos bajo condiciones de repetibilidad, no deberá ser mayor que 44 IU<sub>7,0</sub>.<sup>9</sup>

Para azúcares con valores de color ICUMSA entre 200 y 600 IU<sub>7,0</sub> la diferencia absoluta entre dos resultados, obtenidos bajo condiciones de reproducibilidad, no deberá ser mayor que 109 IU<sub>7,0</sub>.<sup>9</sup>