



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

**CUANTIFICACIÓN DE PÉRDIDAS DE AZÚCAR EN LOS EFLUENTES DEL
PROCESO INDUSTRIAL DE UN INGENIO AZUCARERO**

Bryan Ronaldo Esquite Lainfiesta

Asesorado por el Ing. Félix René Morales Magarín

Guatemala, noviembre de 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CUANTIFICACIÓN DE PÉRDIDAS DE AZÚCAR EN LOS EFLUENTES DEL
PROCESO INDUSTRIAL DE UN INGENIO AZUCARERO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

BRYAN RONALDO ESQUITE LAINFIESTA

ASESORADO POR EL ING. FÉLIX RENÉ MORALES MAGARÍN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

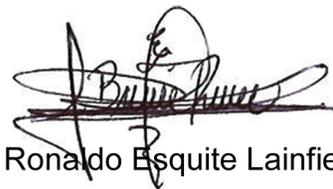
DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Álvares Mejía
EXAMINADORA	Inga. Teresa Lisely de León Arana
EXAMINADOR	Ing. César Alfonso García Guerra
SECRETARIO	Ing. Hugo Humbero Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

CUANTIFICACIÓN DE PÉRDIDAS DE AZÚCAR EN LOS EFLUENTES DEL PROCESO INDUSTRIAL DE UN INGENIO AZUCARERO

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



Bryan Ronaldo Esquite Lainfiesta

Guatemala, 20 de julio de 2011

Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
Director de Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente

Respetable Ingeniero Álvarez Mejía:

Por este medio atentamente le informo que como asesor del trabajo de graduación del estudiante universitario **Bryan Ronaldo Esquite Lainfiesta** de la carrera de ingeniería química, con carné No. **200611033**, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **“Cuantificación de pérdidas de azúcar en los efluentes del proceso industrial de un ingenio azucarero”**.

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

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,



Ing. Félix René Morales Magarín
Ingeniero Químico
Colegiado No. 1385



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

Guatemala, 10 de octubre de 2011
Ref.EIQ.TG.200.2011

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el **Acta TG-1562011-B-IF** le informo que reunidos los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del informe final del trabajo de graduación, para optar al título de **INGENIERO QUÍMICO** al estudiante universitario, **Bryan Ronaldo Esquite Lainfiesta**, identificado con carné No. **2006-11033**, titulado: **"CUANTIFICACIÓN DE PERDIDAS DE AZÚCAR EN LOS EFLUENTES DEL PROCESO INDUSTRIAL DE UN INGENIO AZUCARERO"**, el cual ha sido asesorado por el Ingeniero Félix René Morales Magarín.

Habiendo encontrado el referido informe final **satisfactorio**, se procede a recomendarle autorice al estudiante **Esquite Lainfiesta**, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAR A TODOS"



Inga. Teresa Lisely de León Arana, M.Sc.
COORDINADORA
Tribunal que revisó el informe final
Del trabajo de graduación

C.c.: archivo



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

Ref.EIQ.TG.298.2011

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **BRYAN RONALDO ESQUITE LAINFIESTA** titulado: "CUANTIFICACIÓN DE PÉRDIDAS DE AZÚCAR EN LOS EFLUENTES DEL PROCESO INDUSTRIAL DE UN INGENIO AZUCARERO". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía; C.Dr.

DIRECTOR

Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, noviembre de 2011



Cc: Archivo
WGAM/ale



DTG. 530.2011.

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **CUANTIFICACIÓN DE PÉRDIDAS DE AZÚCAR EN LOS EFLUENTES DEL PROCESO INDUSTRIAL DE UN INGENIO AZUCARERO**, presentado por el estudiante universitario **Bryan Ronaldo Esquité Lainfiesta**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, 25 de noviembre de 2011.

/gdech

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por ser la luz en mi vida y la fuente inagotable de amor y sabiduría.
- Mi padres** Por su apoyo incondicional, amor, protección, valores inculcados y ser la principal motivación en mi vida.
- Mis hermanos** Por su amistad, amor y apoyo en todo momento.
- Mis amigos** Por todos esos momentos inolvidables que compartimos.
- El ingenio azucarero** Por haberme dado la oportunidad de realizar mi trabajo de graduación dentro de sus instalaciones, además del apoyo técnico y profesional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XVII
OBJETIVOS Y/O HIPÓTESIS.....	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Proceso industrial para la obtención de azúcar	3
2.1.1. Pesado y determinación de calidad de caña	3
2.1.2. Limpieza y preparación.....	4
2.1.3. Molienda	4
2.1.4. Clarificación	5
2.1.5. Evaporación.....	5
2.1.6. Cristalización	6
2.1.7. Separación.....	6
2.1.8. Secado.....	7
2.1.9. Envasado.....	7
2.2. Pérdidas en un ingenio azucarero y su clasificación	7
2.2.1. Pérdidas determinadas	8
2.2.1.1. Pérdidas en bagazo	8
2.2.1.2. Pérdidas en cachaza	9
2.2.1.3. Pérdidas en miel final.....	10

2.2.2.	Pérdidas indeterminadas en el proceso industrial	10
2.2.2.1.	Pérdidas químicas	10
2.2.2.2.	Pérdidas físicas	11
2.2.2.3.	Pérdidas indeterminadas aparentes	12
2.3.	Flujo en canales abiertos	12
2.3.1.	Tipos de flujo en canales abiertos	13
2.3.2.	Medición de flujo en canales abiertos.....	13
2.3.2.1.	Método del flotador.....	13
2.3.2.2.	Método de rastreo con tinte.....	15
2.3.2.3.	Tablilla graduada para medir la carga hidráulica por velocidad	16
2.3.2.4.	Vertederos como medidores de flujo en canales abiertos	18
2.3.2.5.	Tipos de vertederos.....	19
3.	METODOLOGÍA	23
3.1.	Variables	23
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	25
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	25
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	26
3.5.	Técnica cuantitativa.....	27
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	32
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	37
3.8.	Análisis estadístico.....	40

4.	RESULTADOS	47
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	59
	CONCLUSIONES	69
	RECOMENDACIONES	71
	BIBLIOGRAFÍA.....	73
	APÉNDICES	77
	ANEXOS.....	111

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Uso de la regla para medir la carga por velocidad del agua	17
2.	Flujo sobre un vertedero	19
3.	Geometría de la ranura de los vertederos.....	21
4.	Diagrama de flujo de la evaluación del método analítico cuantitativo de trazas de azúcar en el agua	28
5.	Diagrama de flujo de la cuantificación de las pérdidas de azúcar en los efluentes del proceso industrial.....	30
6.	Recuperación de azúcar (balance de azúcar) en el ingenio azucarero durante el período de evaluación.....	31
7.	Medición de la profundidad del agua utilizando un vertedero como medidor de flujo	34
8.	Curva de linealidad del método analítico cuantitativo de trazas de azúcar en aguas.....	48
9.	Pérdidas promedio diarias de azúcar en mesas de lavado	51
10.	Pérdidas promedio diarias de azúcar en el canal de cachaza	51
11.	Pérdidas promedio diarias de azúcar en el canal de evaporadores de la fábrica de azúcar blanco.....	52
12.	Pérdidas promedio diarias de azúcar en el canal de condensados de la fábrica de azúcar blanco	52
13.	Pérdidas promedio diarias de azúcar en el canal general de la fábrica de azúcar blanco	53
14.	Pérdidas promedio diarias de azúcar en el canal de derrame en molinos.....	53

15.	Pérdidas promedio diarias de azúcar en la salida general de la fábrica	54
16.	Gráfica comparativa del flujo másico de azúcar promedio, al final del período total de evaluación, como pérdidas en los efluentes del proceso industrial en el ingenio azucarero	55
17.	Porcentaje de pérdida de azúcar en las mesas de lavado con respecto al azúcar que entra en la caña	55
18.	Porcentaje de pérdida de azúcar en el efluente de la salida general con respecto al rendimiento promedio de azúcar	56
19.	Diagrama del balance general de azúcar en la fábrica del ingenio azucarero, descrito en $lb_{\text{azúcar}} / ton_{\text{caña}}$	57

TABLAS

I.	Coeficientes para convertir la velocidad del flotador en la superficie a velocidad media del canal	15
II.	Tabla de conversión de las mediciones hechas con la tablilla graduada en pulgadas a velocidad del agua en pies por segundo	18
III.	Concentraciones experimentales obtenidas de las soluciones de sacarosa para determinar la exactitud, repetibilidad y linealidad del método	37
IV.	Concentraciones experimentales de la solución de sacarosa a 50 ppm para determinar la reproducibilidad del método	37
V.	Cuantificación de las pérdidas de azúcar en los efluentes del proceso industrial del ingenio azucarero	38
VI.	Datos del balance de masa general en el ingenio azucarero al finalizar el período de evaluación	39

VII.	Concentraciones experimentales, en partes por millón de azúcar, obtenidas de las diferentes soluciones de sacarosa y los resultados de los parámetros estadísticos	47
VIII.	Parámetros estadísticos de la curva de linealidad del método analítico cuantitativo de trazas de azúcar en aguas (figura 8)	48
IX.	Concentraciones experimentales, en partes por millón de azúcar, obtenidas por dos analistas diferentes en una solución de 50 ppm de azúcar y resultados de los parámetros estadísticos	49
X.	<i>Check list</i> de cumplimiento a la evaluación del método analítico cuantitativo de trazas de azúcar en aguas.....	49
XI.	Ecuaciones determinadas para cada sistema de medición de flujo volumétrico establecido en los puntos de muestreo	50
XII.	Flujo másico promedio de azúcar como pérdidas en los efluentes evaluados del proceso industrial en el ingenio azucarero	54
XIII.	Pérdidas económicas detectadas al final del período de evaluación.....	56
XIV.	Comparación entre balances generales de azúcar en la fábrica del ingenio azucarero ($lb_{\text{azúcar}}/\text{ton}_{\text{caña}}$)	57

LISTADO DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descripción
H	Carga hidráulica sobre la cresta del vertedero
cm	Centímetros
CV	Coefficiente de variación
C	Coefficiente de vertedero
σ	Desviación estándar
SO₂	Dióxido de azufre
US\$	Dólar estadounidense
E	Error absoluto
SJM	Factor de recuperación de azúcar
Q	Flujo volumétrico
gal	Galones
°Brix	Grados Brix de una solución
°C	Grados Celsius

°F	Grados Fahrenheit
g	Gramos
x_i	i-ésimo valor de un conjunto de datos
IC	Intervalo de confianza
kg	Kilogramos
lb	Libras
l	Litros
\bar{x}	Media o promedio de un conjunto de datos
m	Metros
mg	Miligramos
ml	Mililitros
mm	Milímetros
min	Minutos
nm	Nanómetros
n	Número total de datos
ppm	Partes por millón

ft	Pies
%	Porcentaje
% v/v	Porcentaje en volumen
pH	Potencial de hidrógeno
s	Segundos
Σ	Sumatoria
ton	Toneladas

GLOSARIO

Absorbancia (A)	A = $\log (P_0/P)$ en donde P_0 es la energía radiante que incide sobre una muestra y P es la energía radiante que emite la muestra.
Bagazo	Subproducto fibroso de la caña de azúcar como resultado de la molienda de la misma.
Cachaza	Se le llama así a los lodos de fondo obtenidos en el proceso de clarificación, constituidos principalmente por sales de fosfato de calcio y magnesio, gomas, cera, cenizas y agua.
Efluente	Salida o flujos salientes de cualquier sistema que despacha flujos de agua.
Espectrofotómetro	Es un instrumento para medir la transmitancia o la absorbancia de una muestra en función de una longitud de onda determinada.
Exactitud	Proximidad entre el resultado de una medición y el valor verdadero del mesurando.

Factor SJM	Valor que indica el porcentaje de recuperación de azúcar. Es decir, un jugo (o material inicial) de pureza J y que produce un azúcar de pureza S con una miel de pureza M, el porcentaje de la sacarosa total en el material original que pasará al azúcar será $\frac{100S(J-M)}{J(S-M)}$.
Flujo volumétrico	Cantidad de líquido por unidad de tiempo que fluye un ducto o canal.
Grados de libertad	Es el número de observaciones individuales (N – 1) que se pueden variar bajo condiciones en las cuales la media y la desviación estándar, una vez que han sido determinadas, se mantienen constantes.
Intervalo de confianza (IC)	Son los valores dentro de los cuales se espera que esté la media poblacional con una probabilidad dada.
Linealidad	Correspondencia lineal entre el valor experimental y el valor real.
Miel final o melaza	Residuo líquido que se obtiene cuando las masas cocidas se procesan en una máquina centrífuga y que ya no es posible la separación de los cristales de sacarosa.

Nivel de confianza	Es la probabilidad de que la media verdadera se ubique en un intervalo dado. Suele expresarse como porcentaje.
Partes por millón (ppm)	Es el término que especifica el número de partes de un componente en un millón de partes de la mezcla a la que pertenece.
Pérdidas determinadas	Son las pérdidas que se derivan del control normal de un ingenio azucarero y que tienen lugar en el bagazo, la cachaza y la miel final.
Pérdidas indeterminadas	Son la pérdidas indicadas por la diferencia entre la cantidad de sacarosa que llega en el jugo, con la cantidad de ella que es cristalizada para ser convertida en azúcar y con la cantidad de sacarosa calculada en las determinadas.
Repetibilidad	Proximidad entre los resultados de mediciones sucesivas del mismo mesurando, realizadas bajo las mismas condiciones de medición.
Reproducibilidad	Proximidad entre los resultados de mediciones de un mismo mesurando, realizadas bajo distintas condiciones de medición.

Sacarosa	Compuesto químico orgánico de fórmula $C_{12}H_{22}O_{11}$, también denominado comúnmente como azúcar. Es un disacárido constituido por glucosa y fructosa.
Trazas	Sustancia presente en pequeñas cantidades en una solución.
Vertedero	Es una barrera de forma especial que se instala en un canal abierto, a través de la cual el fluido pasa como chorro libre al otro lado de ella.
Zafra	Período de cosecha de la caña de azúcar y recuperación del azúcar como producto.

RESUMEN

En este trabajo de graduación se determinó la cantidad de azúcar que pierde un ingenio azucarero en los efluentes del proceso industrial y se determinó el valor económico de dichas pérdidas de azúcar, para lo cual, en primer lugar, se evaluó un método analítico cuantitativo que determina la concentración de azúcar en el agua. Posteriormente se estableció el sistema de medición de flujo volumétrico en cada efluente, por lo que fue necesario construir e instalar vertederos rectangulares; además de aplicar métodos de medición de flujo con flotadores.

De esta manera se logró establecer que el método cuantitativo es confiable y con el sistema de medición de flujo volumétrico en cada efluente se logró cuantificar la cantidad de azúcar perdida por un período de cinco días. Los resultados indican que en el efluente de la salida general del ingenio azucarero la cantidad de azúcar que se pierde es del 10,3 % con respecto a la producción diaria. Además, al determinar el valor económico de dichas pérdidas, se evidenció la necesidad de brindarle mucha más atención a los efluentes como oportunidad de mejoras al proceso industrial.

OBJETIVOS

General

Cuantificar las pérdidas de azúcar en los efluentes del proceso industrial que puede tener un ingenio azucarero, durante el lapso de una semana de zafra, mediante la medición de trazas de azúcar en dichos efluentes.

Específicos

1. Evaluar un método analítico cuantitativo de trazas de azúcar en aguas mediante los criterios de exactitud, repetibilidad, reproducibilidad y linealidad del método.
2. Diseñar y establecer un sistema práctico de medición de flujo volumétrico en los efluentes de interés.
3. Determinar el flujo másico de azúcar en los efluentes del ingenio azucarero.
4. Identificar las pérdidas económicas de azúcar en el efluente de la salida general del ingenio azucarero.
5. Realizar un balance de masa general en el proceso industrial tomando en cuenta las pérdidas en el efluente de la salida general del ingenio azucarero durante el período total de estudio.

HIPÓTESIS

1. Las pérdidas promedio de azúcar en el efluente de la salida general corresponden a menos del 50% de las pérdidas indeterminadas en el ingenio azucarero.
2. Las medias experimentales del método cuantitativo de trazas de azúcar en aguas no difieren significativamente de los valores patrón.
3. Las medias experimentales del método cuantitativo de trazas de azúcar en aguas, aplicado por dos analistas en diferentes días, no difieren significativamente entre sí.

INTRODUCCIÓN

La agroindustria azucarera guatemalteca es una de las mayores productoras del país. Es de vital importancia en el aspecto económico y social ya que genera empleos para miles de trabajadores. En el afán de aumentar su productividad y seguir aportando al desarrollo de Guatemala, todos los ingenios azucareros apuestan por mejorar sus procesos y hacerlos mucho más eficientes. Es por esta razón que se interesan, entre otros aspectos, en la disminución de las pérdidas de azúcar.

Las pérdidas de azúcar que se pueden dar en el proceso productivo se clasifican en determinadas e indeterminadas. Las pérdidas determinadas son las que se establecen por el control o seguimiento que se le da a los subproductos del proceso (bagazo, cachaza y miel final). Por otro lado, las pérdidas indeterminadas son las que se establecen por medio de un balance de masa general. Existen diferentes fuentes de pérdidas de azúcar y que generalmente son reportadas como pérdidas indeterminadas. Tal es el caso de los efluentes. Éstos son un medio de transporte de pérdidas de azúcar, ya sea por arrastres, fugas o por mala operación, sin embargo muchos ingenios azucareros no les prestan el debido interés. Cabe resaltar que medir la cantidad de azúcar presente en las aguas puede permitir un mejor control en el proceso y mejorar así su productividad.

La preocupación por las pérdidas de azúcar que se tienen en los efluentes lleva poco tiempo de ser estudiada en algunos países. Tal es el caso de Cuba, que a raíz de una investigación realizada en 1998 se llegó a enfatizar la necesidad de cuantificar las pérdidas en las aguas residuales. Por otro lado,

en Colombia, la reducción de las pérdidas de azúcar en los efluentes y arrastres representó para un ingenio azucarero el incremento en la recuperación de azúcar. Ahora, al igual que estos países, en Guatemala se está empezando a abrir brecha en lo referente a este tema.

La presente investigación se enfocó en cuantificar las pérdidas de azúcar que se tuvo en un período de una semana en el último mes de la zafra 2010/2011, para lo cual se evaluó un método analítico de cuantificación de azúcar en el agua; así mismo, se estableció un sistema de medición de los flujos en cada efluente. Además de las pérdidas de azúcar como producto, también se consideró el valor económico de dichas pérdidas tomando en cuenta los criterios del ingenio donde se realizó la investigación; destacando principalmente la consideración del azúcar perdido como azúcar crudo.

1. ANTECEDENTES

En 1983, la Ingeniera Agroindustrial guatemalteca Flor Escalante realizó su proyecto de graduación sobre las pérdidas de sacarosa por acumulación de caña en patio y campo dentro del Ingenio Concepción, S.A. De igual forma, el Ingeniero Agroindustrial Manuel Vidal determinó en 1997, dentro de las instalaciones del Ingenio Pantaleón, las pérdidas de sacarosa mediante un análisis de % Brix y % Polarización en las etapas de fabricación de azúcar: patio de caña, molienda, clarificación, evaporación y cocimientos. Sin embargo, ambos no tomaron en cuenta las pérdidas de sacarosa en los efluentes del proceso industrial.

En cuanto a estudios internacionales, en 1998, Santiago Díaz y Karel Martín de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad de Mantanzas (Cuba) realizaron un estudio de las aguas residuales de los centrales azucareros. Ellos tomaron en cuenta cuatro centrales azucareros de la provincia de Matanzas y los resultados del trabajo demostraron la necesidad de cuantificar las pérdidas de sacarosa. Además indicaron que dichas pérdidas son necesarias incluirlas en el balance de pol de la fábrica, lo cual mejora así el control operacional con un consecuente aumento de la eficiencia económica.

En la Carta Trimestral No. 1 de CENICAÑA¹, el Gerente de Fábrica de Manuelita S.A., J. H. Cardona, menciona que desarrollaron un proyecto conjunto con CENICAÑA para identificar y cuantificar las pérdidas de sacarosa reportadas normalmente como pérdidas indeterminadas. El objetivo fue

¹ Cardona. Identificación y cuantificación de pérdidas de sacarosa reportadas normalmente como pérdidas indeterminadas. pp. 35 , 36.

establecer los métodos de muestreo y medición de los efluentes en las diferentes estaciones del proceso y cuantificar la contribución de cada uno en las pérdidas de sacarosa. Los resultados indican que en 1996 las pérdidas de sacarosa por efluentes eran aproximadamente 850 toneladas y redujeron a 350 toneladas en 2000, por lo que sobresale la importancia del proyecto.

Finalmente, Liliana Calero, Nicolás Gil y otros presentaron en 2009 su proyecto sobre los factores que inciden en las pérdidas indeterminadas del proceso de elaboración de azúcar. Entre sus conclusiones se destaca que las pérdidas físicas y mecánicas se pueden reducir con medidas de gestión, seguimiento y control de fugas, derrames o arrastres con el fin de reducir las pérdidas de sacarosa no cuantificadas.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Proceso industrial para la obtención de azúcar

La obtención de azúcar inicia desde el campo, donde es cultivada y cosechada la caña de azúcar, sin embargo, el proceso industrial abarca desde el momento que los camiones cargados con caña entran a la fábrica hasta el envasado del azúcar. El objetivo principal del proceso industrial es procesar la caña de azúcar para producir azúcar de distintas especificaciones. Los tipos de azúcar que se pueden producir son refino, blanco y crudo. A diferencia de ciertos pasos, los tres tipos de azúcar pasan por el mismo proceso general dentro de fábrica: pesado y determinación de calidad de caña, limpieza y preparación, molienda, clarificación, evaporación, cristalización, separación, secado y envasado.

2.1.1. Pesado y determinación de calidad de caña

El pesado se realiza al ingreso del área industrial y es donde las unidades que transportan la caña pasan a unas básculas de plataforma para determinar la cantidad de caña que está ingresando. Luego pasan a una estación donde se extraen muestras que son analizadas en el laboratorio y así determinar la calidad de la materia prima.

2.1.2. Limpieza y preparación

La caña es descargada en mesas de alimentación por medio de viradores de caña. Debido al proceso en campo existe presencia de materia extraña en la caña transportada, por lo tanto, para tener un proceso más limpio es necesaria lavarla. Para el lavado se utiliza agua caliente proveniente del proceso en fábrica de tal manera que se logra eliminar los sólidos, piedras y otro tipo de material extraño que se ha transportado, junto a la caña, desde el campo. Luego la caña es sometida al proceso de preparación con el fin de facilitar la extracción de jugo. Esto se realiza por medio de troceadoras, picadoras y desfibradoras, las cuales rompen y desfibran la caña.

2.1.3. Molienda

En este proceso continuo se utiliza una serie de unidades denominadas molinos o tándem de molinos, los cuales constan, cada uno, de tres rodillos o mazas que extraen el jugo a la caña previamente preparada. “Para hacer más eficiente el proceso de molienda, los jugos pobres de los molinos posteriores se recirculan en el proceso (jugos de maceración) y en el último molino se aplica agua caliente con temperatura entre 155 y 179 °F para aumentar la extracción. El bagazo es un subproducto industrial que se transporta hacia el sistema de calderas para usarlo como combustible”².

² Ingenio Magdalena. El proceso de la fabricación de azúcar. p. 4.

2.1.4. Clarificación

Posteriormente el jugo pasa a la torre de sulfitación, donde es puesta en contacto con una corriente a contraflujo de dióxido de azufre (SO_2), el cual decolora y baja el pH del jugo. Este proceso se utiliza únicamente para producir azúcar blanco. Luego se alcaliza el jugo mediante una lechada de cal previamente preparada entre 6 y 10 baume. La cal neutraliza la acidez del jugo, formando sales insolubles de calcio y magnesio con el fin de formar precipitados que se decanten en el clarificador. El siguiente paso consiste en calentar el jugo alcalizado hasta el punto de ebullición o ligeramente arriba, de tal manera que se coagulen algunas grasas y ceras que son las que precipitan formando un lodo³.

“El siguiente paso es alimentar el jugo a los clarificadores a baja velocidad para permitir la concentración de lodos y que pueden ser extraídos por gravedad. Generalmente los clarificadores utilizados son los Rapi Door 444. En la etapa final de este proceso se utilizan coladores vibratorios con malla 110 mesh para la eliminación de bagacillo y evitar que llegue al producto final”⁴.

2.1.5. Evaporación

La evaporación se realiza en evaporadores de múltiple efecto, donde el vapor y el jugo se encuentran en cámaras separadas. La finalidad de esta etapa es remover el agua del jugo claro (con 15 °Brix) y producir meladura como producto principal con 62 °Brix.

³ Cutz. Determinación de la pérdida de azúcar por exceso de lavado en una centrífuga semiautomática 1.22m x 0.76m Ingenio Trinidad. pp. 10.

⁴ Ingenio Magdalena. El proceso de la fabricación de azúcar. p. 2.

“Un múltiple efecto consiste en una serie de vasos o cuerpos ordenados de tal manera que cada cuerpo subsiguiente tiene un vacío más alto, lo que hace que el líquido ebulle a una temperatura más baja; los vapores de un cuerpo hacen hervir el jugo del siguiente y el vapor del último pasan a un condensador”⁵.

2.1.6. Cristalización

Este proceso es llevado a cabo por la concentración de la meladura y mieles intermedias en tres etapas llamadas cocimientos, usando equipos conocidos como tachos. “Este es un proceso demorado que industrialmente se acelera introduciendo al tacho unos granos microscópicos de azúcar, denominados semillas”⁶. El producto que pasa de los tachos a las centrifugas se denomina masa cocida.

2.1.7. Separación

La separación consiste en retirar de los cristales de azúcar las mieles restantes por medio de un equipo denominado centrífuga. Este equipo consiste básicamente en un cilindro que gira a gran velocidad, provocando que la miel pase a través de las telas que posee, mientras que los cristales de azúcar quedan atrapados. Las mieles de las masas A y B son recirculadas a los tachos y la miel de la masa C, denominada miel final o melaza, es vendida para la producción de alcohol.

⁵ Cutz. Determinación de la pérdida de azúcar por exceso de lavado en una centrífuga semiautomática 1.22m x 0.76m Ingenio Trinidad. p. 13

⁶ Ingenio Magdalena. El proceso de la fabricación de azúcar. p. 3.

2.1.8. Secado

“En el proceso de centrifugado se utiliza agua de condensado para lavar el azúcar, lo cual da como resultado humedades entre 0,3 % y 0,6%, por lo que es necesario pasarla por un proceso de secado para alcanzar niveles entre 0,2% para azúcar crudo y 0,03% para azúcares blancos”⁷.

2.1.9. Envasado

El azúcar blanco es envasado en sacos de 50 kg o en sacos jumbo de 1400 kg para ser comercializado local e internacionalmente. En cuanto al azúcar crudo, se almacena en bodegas y es transportado a granel para ser exportado.

2.2. Pérdidas en un ingenio azucarero y su clasificación

Las pérdidas que se obtienen en los ingenios azucareros se clasifican en dos grupos:

- Pérdidas determinadas
- Pérdidas indeterminadas

Las pérdidas determinadas son las que tienen lugar en el bagazo, la cachaza y en la miel final o melaza. Ahora bien, las pérdidas indeterminadas son calculadas por un balance de masa, resultado obtenido por la diferencia entre el total de sacarosa que llega en el jugo, con la cantidad de ella que es cristalizada para ser convertida en azúcar y con la cantidad de sacarosa calculada en las pérdidas determinadas. Las pérdidas indeterminadas se

⁷ Ingenio Magdalena. El proceso de la fabricación de azúcar. p. 4.

pueden clasificar en químicas o microbiológicas, físicas⁸ y pérdidas indeterminadas aparentes⁹.

2.2.1. Pérdidas determinadas

Estas pérdidas se determinan debido a los procedimientos establecidos en el laboratorio de fábrica. Las pérdidas en el bagazo se obtienen utilizando los análisis de Pol de bagazo (contenido de sacarosa) y el peso del bagazo producido. De igual forma se calculan las pérdidas en la cachaza, ya que también se registran valores de Pol en cachaza y peso de cachaza producida. Por último, las pérdidas en la miel final se obtienen con la ayuda del volumen y la densidad de la miel final, además de su contenido de sacarosa (Pol de miel final).

2.2.1.1. Pérdidas en bagazo

Este tipo de pérdida corresponde a la sacarosa presente en la caña y que no se ha logrado extraer en el tándem de molinos. Acra Corporation menciona que algunos de los factores que contribuyen a la pérdida de sacarosa en el bagazo son¹⁰:

- Grado de preparación de la caña
- Porcentaje de fibra en caña
- Presión en los molinos
- Abertura de los molinos
- Alimentación y temperatura del agua de imbibición
- Sistema de maceración que se emplee utilizando los jugos de los molinos
- Mantenimiento y operación del tándem de molinos

⁸ Ramos. Pérdidas indeterminadas en el proceso de elaboración del azúcar de caña. p. 10.

⁹ Calero. Factores que inciden en las pérdidas indeterminadas del proceso de elaboración de azúcar. p. 665.

¹⁰ Acra Corporation. Las pérdidas de azúcar son dinero. p. 52, 53.

Acra Corporation realizó cálculos de las pérdidas que se pueden obtener en el bagazo y determinó que por cada décima que aumente el Pol de bagazo se pierden 31,3 toneladas de azúcar por cada 100 000 toneladas de caña¹¹.

2.2.1.2. Pérdidas en cachaza

Las pérdidas en cachaza se deben principalmente a la ineficiencia en la operación de los filtros de cachaza, los cuales se encargan de lavar y agotar la cachaza para recuperar el máximo de sacarosa que va impregnada en esta. Los factores de operación que influyen negativamente en las pérdidas en cachaza son los siguientes:

- Vacío defectuoso en los filtros de cachaza
- Tubos de succión saturados
- Telas rotas o saturadas del filtro de cachaza
- Presión deficiente del agua de lavado
- Espesor inadecuado de la torta de cachaza
- Velocidades altas del tambor del filtro
- El grado de mantenimiento de los equipos

De esta forma, por cada décima (0,1) de aumento en el Pol de cachaza se producirá una pérdida de 4,2 toneladas de azúcar¹².

¹¹ Acra Corporation. Las pérdidas de azúcar son dinero. p. 54

¹² Acra Corporation. Las pérdidas de azúcar son dinero. p. 66

2.2.1.3. Pérdidas en miel final

El azúcar que va en la miel final no se considera como pérdida irrecuperable debido a que forma parte de un subproducto que tiene valor, sin embargo el exceso de azúcar que va a las mieles finales afecta directamente al rendimiento en el azúcar comercial. Por lo tanto, en el balance de azúcar en fábrica, las pérdidas en la miel final se toman en cuenta. De esta forma, cuanto más azúcar vaya a las mieles finales, menos azúcar comercial se producirá.

2.2.2. Pérdidas indeterminadas en el proceso industrial

2.2.2.1. Pérdidas químicas

La sacarosa, al ser un disacárido, en presencia de agua y en un medio ácido, se puede hidrolizar, dando como resultado la transformación de sacarosa en glucosa y fructosa (es decir en sus monosacáridos primarios). A estos azúcares se les denomina azúcares invertidos o reductores. La sacarosa es bastante estable en un medio neutro y puede soportar temperaturas hasta cierto límite sin alteraciones apreciables¹³.

La inversión de la sacarosa se da por la acidez, la temperatura y el tiempo durante el cual los materiales se encuentran bajo esas condiciones. A temperaturas de 50 a 60 °C la inversión es baja, a 70 °C es perceptible y a temperaturas mayores de 80 °C es considerable¹⁴. La descomposición por estos factores puede darse principalmente en la clarificación y evaporación¹⁵. Según Ramos, con la acidez normal del jugo que circula en el evaporador, las pérdidas por inversión pueden ser de 0,1 % / hora, a 120 °C.

¹³ Ramos. Pérdidas indeterminadas en el proceso de elaboración del azúcar de caña. p. 10

¹⁴ *Ibíd.* p. 11.

¹⁵ Calero. Factores que inciden en las pérdidas indeterminadas del proceso de elaboración de azúcar. p. 665.

Por otro lado, la presencia de diferentes poblaciones de microorganismos también invierte la sacarosa en sus monosacáridos primarios. Ramos menciona que cuando la cachaza no es eliminada en forma continua y eficiente, ésta se fermenta por acción bacteriana produciéndose pérdidas de sacarosa¹⁶. Cualquier retención o acumulación de cachaza tendrá como consecuencia una acidificación de jugo en los compartimientos inferiores.

2.2.2.2. Pérdidas físicas

Éstas están “asociadas con fugas y desbordes de materiales intermedios o arrastres en condensados y en los efluentes del proceso fabril”¹⁷. Los altos niveles de material en la operación normal pueden ocasionar arrastre que contaminan el agua condensada con pérdidas de sacarosa. En la misma línea, Ramos menciona que existe la posibilidad de arrastre de pequeñas gotas de jugo o meladura por las rápidas corrientes de los vapores producto de la evaporación¹⁸. Estas gotitas son muy ligeras y las corrientes de vapor las arrastra fácilmente hacia la calandria del cuerpo siguiente donde contaminarán el agua condensada de ese cuerpo, o hacia el condensador en el último efecto donde se irán con el agua de enfriamiento. Además, cuando hay tubos flojos o rotos en la calandria de los tachos se puede dar la contaminación del agua condensada.

Por otro lado, se pueden dar pérdidas indeterminadas por la mala operación en las centrífugas. Entre estas está la utilización de telas o cedazos con tamaños incorrectos o cedazos rotos, ya que estos pueden llegar a permitir

¹⁶ Ramos. Pérdidas indeterminadas en el proceso de elaboración del azúcar de caña. p. 11

¹⁷ Calero. Factores que inciden en las pérdidas indeterminadas del proceso de elaboración de azúcar. p.665

¹⁸ Ramos. Pérdidas indeterminadas en el proceso de elaboración del azúcar de caña. p.11

el paso de los cristales de azúcar hacia las mieles con una recirculación innecesaria. También se pueden dar pérdidas cuando no se controla la carga en las centrífugas, ocurriendo así el desbordamiento de las masas¹⁹.

2.2.2.3. Pérdidas indeterminadas aparentes

Estas son atribuidas a “errores en pesajes de los materiales del balance o en las determinaciones analíticas, muestreos no representativos, cálculos incorrectos, o a la estimación errada de materiales en existencia, entre otras. Estas pueden llegar a ser una parte importante de las pérdidas; sin embargo, se pueden reducir si se establecen sistemas de verificación de pesos, análisis y resultados”²⁰.

2.3. Flujo en canales abiertos

Un canal abierto es un sistema de flujo en el que la superficie superior del fluido está expuesta a la atmósfera. Los ríos son ejemplo claro de canales abiertos naturales, mientras que otros ejemplos de canales son los canales pluviales al costado de las carreteras. “En la industria, es frecuente utilizar canales abiertos para conducir el agua de enfriamiento o los refrigerantes de los intercambiadores de calor y llevarlos lejos de los sistemas de maquinado”²¹.

¹⁹ Ramos. Pérdidas indeterminadas en el proceso de elaboración del azúcar de caña. p. 11.

²⁰ Calero. Factores que inciden en las pérdidas indeterminadas del proceso de elaboración de azúcar. p. 665.

²¹ Mott. Mecánica de fluidos. p.443

2.3.1. Tipos de flujo en canales abiertos

Según Mott²², el flujo en canales abiertos se clasifica en:

- **Flujo estable y uniforme.** Ocurre cuando el flujo volumétrico, denominado descarga, permanece constante en la sección de interés y la profundidad del fluido no cambia. Este tipo de flujo se logra cuando no varía la sección transversal del canal a lo largo de su longitud. Este tipo de canal se llama prismático.
- **Flujo estable variado.** Ocurre cuando la descarga permanece constante, pero la profundidad del fluido varía a lo largo de la sección de interés. Esto sucede si el canal no es prismático.
- **Flujo inestable variado.** Ocurre cuando la descarga cambia con el tiempo, originando así modificaciones en la profundidad del fluido, sea canal prismático o no.

2.3.2. Medición de flujo en canales abiertos

2.3.2.1. Método del flotador

Este es un método fácil de aplicar y muy conveniente en ausencia de equipo sofisticado. El primer paso consiste en ubicar un tramo uniforme, tanto en ancho como en profundidad, de aproximadamente 100 pies de longitud. Es conveniente colocar marcas o banderillas en el punto inicial y en el punto donde se cumple la longitud seleccionada, esto con el fin de facilitar las mediciones.

²² Mott. Mecánica de fluidos. p. 445

Realizado esto, se procede a calcular el área promedio de la sección transversal del canal. Posteriormente, se emplea algún flotador y se deja correr libremente en la corriente del fluido. Se toma el tiempo desde el punto cero hasta el final de trayecto seleccionado. Es importante colocar el flotador en el medio de la corriente del canal para evitar que rebote en las paredes o quede atrapado en la maleza. Se recomienda repetir este procedimiento varias veces y tomar el valor promedio²³.

Edward C. Martin menciona en su artículo que el flujo del fluido o caudal “se determina por medio de la velocidad de la corriente multiplicado por el área de la sección transversal del canal”²⁴. La velocidad de la corriente se obtiene dividiendo la distancia recorrida por el flotador y el tiempo que tomó dicho recorrido. Sin embargo, la velocidad medida en la superficie de la corriente es mayor a la velocidad promedio del fluido, por lo tanto es necesario corregir dicha velocidad por medio de un coeficiente. Dicho coeficiente por el cual debe ser multiplicada la velocidad superficial está en función de la profundidad del agua en el canal. Martin muestra una lista de coeficientes que extrajo del Manual sobre Manejo del Agua, USDI/BOR, 1997, y se detallan en la Tabla I²⁵.

²³ Martin. Cómo medir el flujo de agua en los canales de riego a cielo abierto y en las tuberías de compuertas. p. 2.

²⁴ *Ibíd.*

²⁵ *Ibíd.*

Tabla I. **Coeficientes para convertir la velocidad del flotador en la superficie a velocidad media del canal.**

Profundidad promedio (ft)	Coeficiente
1	0,66
2	0,68
3	0,70
4	0,72
5	0,74
6	0,76
9	0,77
12	0,78
15	0,79
20	0,80

Fuente: Martin, Edward. Cómo medir el flujo de agua en los canales de riego a cielo abierto y en las tuberías de compuerta. p. 2.

2.3.2.2. Método de rastreo con tinte

Este método se aplica exactamente igual que el método del flotador, con la única diferencia que se utiliza un tinte en lugar del flotador, para aplicar este método es necesario cerciorarse que el tinte utilizado sea visible en el fluido; en contraste con el método del flotador, el método del rastreo con tinte no necesita los coeficientes de corrección dados en la tabla I²⁶.

²⁶ Martin. Cómo medir el flujo de agua en los canales de riego a cielo abierto y en las tuberías de compuertas. p. 2.

2.3.2.3. Tablilla graduada para medir la carga hidráulica por velocidad

Martin refiere este método como uno de los más ventajosos por ser relativamente barato y bastante preciso²⁷, es utilizado para medir la carga de agua por velocidad en un canal; utiliza una regla graduada para medir la profundidad del agua. Cabe destacar que sólo es aplicable a velocidades entre 1,5 y 10 ft/s.

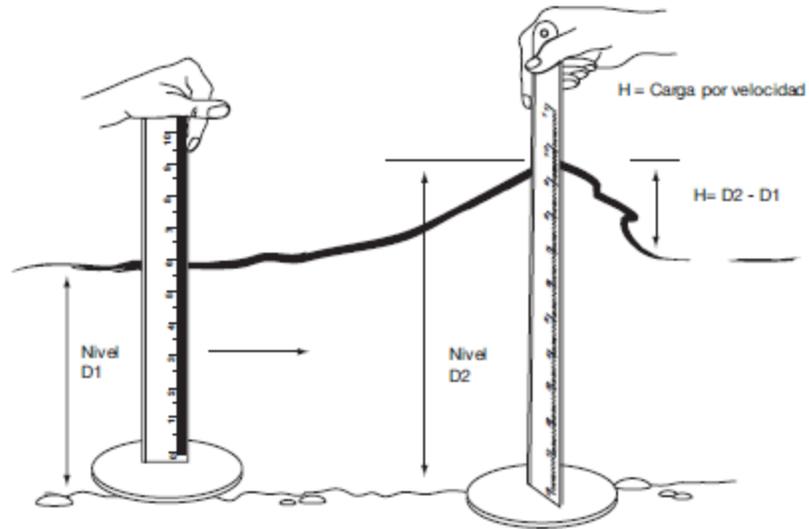
El procedimiento que describe Martin para obtener el caudal del canal es²⁸:

- Coloque la tablilla o regla con el lado delgado en la misma dirección de la corriente. Registre la profundidad del agua (profundidad normal).
- Coloque la regla en contra de la dirección de la corriente. Esto provocará un poco de turbulencia y el nivel del agua “saltará” causando que el nivel del agua se eleve. Registre el nivel otra vez (profundidad con turbulencia).
- Sustraiga el valor de la profundidad normal al valor de la profundidad con turbulencia y el resultado será la altura del salto.
- Encuentre la velocidad correspondiente en la tabla II.
- Multiplique la velocidad por el área de la sección transversal del canal para obtener el caudal.

²⁷ *Ibid.*

²⁸ *Ibid.* p. 3.

Figura 1. **Uso de la regla para medir la carga por velocidad del agua**



Fuente: Martin, Edward. Cómo medir el flujo de agua en los canales de riego a cielo abierto y en las tuberías de compuerta. p. 3.

Tabla II. **Tabla de conversión de las mediciones hechas con la tablilla graduada en pulgadas a velocidad del agua en pies por segundo**

Salto (pulgadas)	Velocidad (ft/s)
½	1,6
1	2,3
2	3,3
3	4,0
4	4,6
5	5,2
6	5,7
7	6,1
8	6,5
9	6,9
10	7,3
11	7,7
12	8,0
15	9,0
18	9,8

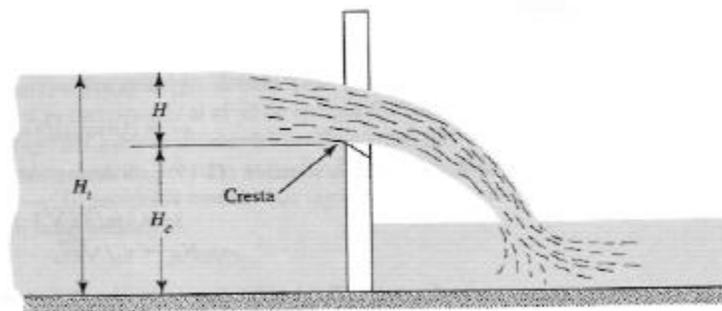
Fuente: Martin, Edward. Cómo medir el flujo de agua en los canales de riego a cielo abierto y en las tuberías de compuerta. p. 3.

2.3.2.4. Vertederos como medidores de flujo en canales abiertos

Un vertedero es un medidor de flujo ampliamente utilizado en canales abiertos. Este consiste en una barrera especial que se instala en el canal, a través de la cual el fluido pasa como chorro libre al otro lado de ella. Generalmente están hechos de una hoja delgada de metal con la cuya

“superficie superior o cresta se corta con un ángulo agudo para asegurar que el fluido salte como chorro libre, lo que se llama napa”²⁹.

Figura 2. **Flujo sobre un vertedero**



Fuente: Mott, Robert. Mecánica de fluidos. p. 462.

2.3.2.5. Tipos de vertederos

Mott³⁰ señala la siguiente clasificación de vertederos:

- **Vertedero rectangular.** Tiene una cresta de longitud L que se extiende a todo lo ancho del canal en el que se halla instalado. Para su diseño se requiere:
 - La altura de la cresta sobre el fondo del canal es $H_c \geq 3 H_{\max}$
 - La carga mínima sobre la cresta es $H_{\min} > 0,2 \text{ pie}$
 - La carga máxima sobre la cresta es $H_{\max} < L/3$

²⁹ Mott. Mecánica de fluidos. p. 462

³⁰ Ibíd. pp. 463, 464.

La ecuación de medición es:

$$Q = 3,33LH^{3/2}$$

Donde L y H están en pies y Q en pies³/s.

- **Vertedero contraído.** Es un vertedor rectangular que tiene sus lados extendidos hacia adentro por los lados del canal a una distancia de al menos $2H_{\max}$. Para su diseño se requiere:
 - La altura de la cresta sobre el fondo del canal es $H_c \geq 2 H_{\max}$
 - La carga mínima sobre la cresta es $H_{\min} > 0,2 \text{ pie}$
 - La carga máxima sobre la cresta es $H_{\max} < L/3$

La ecuación de medición es:

$$Q = 3,33(L - 0,2H)H^{3/2}$$

Donde L y H están en pies y Q en pies³/s.

- **Vertedero Cipolletti.** Está contraído respecto a los lados de la corriente, en una distancia de al menos $2H_{\max}$ y tiene sus lados con pendiente hacia afuera. Aplica los mismos requerimientos de diseño que el vertedor rectangular contraído.

La ecuación de medición es:

$$Q = 3,367LH^{3/2}$$

Donde L y H están en pies y Q en pies³/s.

- **Vertedero triangular.** Es utilizado para flujos volumétricos bajos porque la ranura en forma de V produce una carga H más grande, que puede obtenerse con una ranura rectangular. Los ángulos comúnmente más utilizados de la ranura en V son de 60° y 90°.

La ecuación teórica simplificada es:

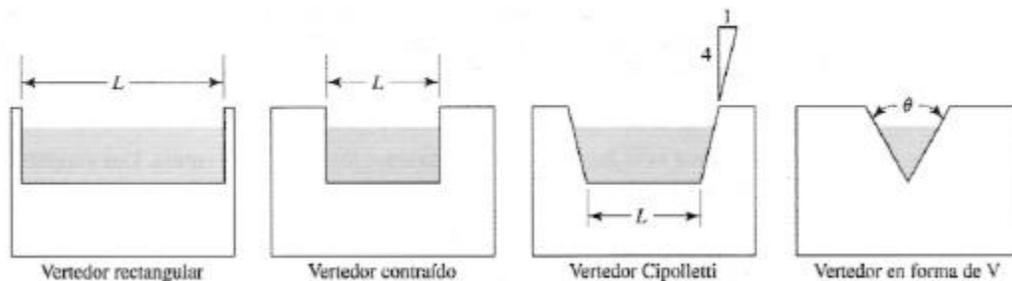
$$Q = 4,28 C \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) H^{5/2}$$

Según Mott³¹, el valor nominal de C es 0,58, obteniéndose las siguientes ecuaciones:

$$Q = 1,43H^{5/2} \quad 60^\circ \text{ ranura}$$

$$Q = 2,48H^{5/2} \quad 90^\circ \text{ ranura}$$

Figura 3. **Geometría de la ranura de los vertederos**



Fuente: Robert, Mott. Mecánica de fluidos. p. 463.

³¹ Mott. Mecánica de fluidos. p. 464

3. METODOLOGÍA

3.1. Variables

3.1.1. Trazas de azúcar (Tz)

Definición conceptual.

Cantidad minúscula de una sustancia en una mezcla.

Definición operacional.

- Objetivo: Evaluar un análisis cuantitativo de trazas de azúcar en aguas mediante criterios de exactitud, repetibilidad, reproducibilidad y linealidad del método.
- Dimensión de la variable: Cantidad de azúcar presente en los efluentes del proceso industrial del ingenio azucarero.
- Indicador: mg/l.

3.1.2. Flujo volumétrico (Q)

Definición conceptual.

Es el volumen de un fluido que pasa por un conducto en un tiempo determinado.

Definición operacional.

- Objetivo: Diseñar y establecer un sistema práctico de medición de flujo volumétrico en los efluentes de interés.
- Dimensión de la variable: Volumen de los efluentes por unidad de tiempo.
- Indicador: l/min.

3.1.3. Flujo másico de azúcar (F)

Definición conceptual.

Es la cantidad de masa que pasa por un área dada en un tiempo determinado.

Definición operacional.

- Objetivo: Determinar el flujo másico de azúcar en los efluentes del ingenio azucarero.
- Dimensión de la variable: Unidad de masa de azúcar por unidad de tiempo.
- Indicador: lb/min.

3.1.4. Pérdidas de Azúcar (Ps)

Definición conceptual.

Cantidad de sacarosa que no es aprovechada en el proceso industrial de producción de azúcar.

Definición operacional:

- Objetivo: Cuantificar las pérdidas de azúcar en los efluentes del proceso industrial que puede tener un ingenio azucarero durante el lapso de una semana de zafra mediante la medición de trazas de azúcar en dichos efluentes.
- Dimensión de la variable: Cantidad de azúcar presente en los efluentes del ingenio azucarero.
- Indicador: lb/ton caña.

3.2. Delimitación del campo de estudio

3.2.1. Enfoque de la investigación

La investigación es cuantitativa ya que se planteó realizar mediciones y cuantificar las pérdidas de azúcar presentes en los efluentes del proceso industrial de un ingenio azucarero, además de la medición del caudal de dichos efluentes.

3.2.2. Nivel de investigación

La investigación es descriptiva debido a que, a partir de mediciones, se buscó mostrar la cantidad de sacarosa que se pierde en los efluentes del proceso industrial como pérdidas indeterminadas.

3.2.3. Tipo de investigación

Es una investigación aplicada debido a que se utilizaron los conocimientos de Ingeniería Química para alcanzar los objetivos propuestos y de esta manera concluir en base a los resultados obtenidos.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador
- Asesor
- Jefe de laboratorio
- Supervisor de laboratorio
- Analistas de laboratorio

3.4. Recursos materiales disponibles

3.4.1. Equipo

- Espectrofotómetro
- Celda de 10 mm
- Equipo de Baño María
- Papel filtro whatman 91
- Cronómetro
- Cinta métrica
- Balanza analítica
- Equipo de cómputo

3.4.2. Cristalería

- Pipetas de 5 ml
- Embudos
- Beakers de 50, 100 y 500 ml
- Tubos de ensayo
- Frascos toma muestras de 100 ml
- Cubeta aforada de 2000 ml
- Goteros

3.4.3. Reactivos

- Ácido sulfúrico al 95-98 % v/v
- Reactivo antrona
- Tierra silíceo

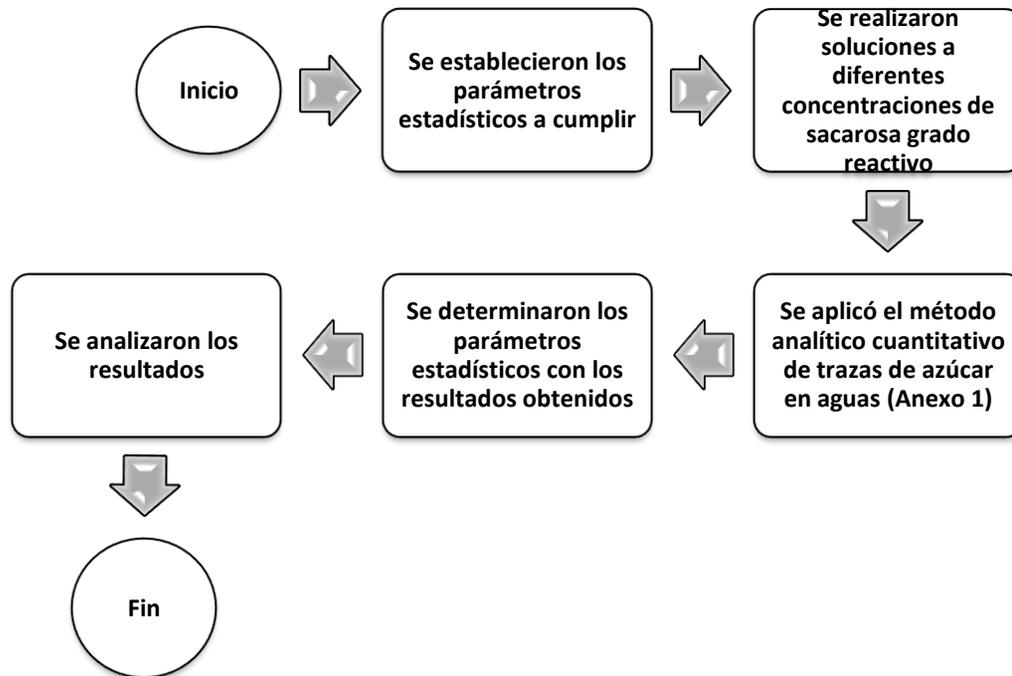
3.5. Técnica cuantitativa

Fase I. Evaluación del método analítico de trazas de azúcar.

La técnica de la evaluación que fue aplicada consistió en cuatro pasos.

- Se establecieron las condiciones a cumplir. En este caso, se tomó un nivel de confianza del noventa y cinco por ciento para los datos estadísticos. Los coeficientes de variación debían ser menores al diez por ciento y los errores relativos menores al cinco por ciento. Por otro lado, se estableció que el coeficiente de correlación debía ser mayor a 0,98.
- Se aplicó el método de trazas de azúcar en aguas descrito en el Anexo1. Para obtener evaluar la exactitud, repetibilidad y linealidad del método se realizó el análisis en cuatro muestras de diferente concentración con seis repeticiones cada una (4x6). En cuanto a la reproducibilidad, el análisis se realizó con dos muestras de igual concentración con seis repeticiones cada una (2x6). El total de análisis realizados corresponden a 36.
- Posteriormente se determinaron los parámetros estadísticos. Error relativo, error absoluto y t de Student para exactitud. Desviación estándar y coeficiente de variación para la repetibilidad. La reproducibilidad también se evaluó con la t de Student, mientras que la linealidad se determinó por medio del coeficiente de correlación.
- Finalmente se procedió a la valoración de los resultados por comparación de los parámetros estadísticos obtenidos con las condiciones preestablecidas.

Figura 4. **Diagrama de flujo de la evaluación del método analítico cuantitativo de trazas de azúcar en el agua**



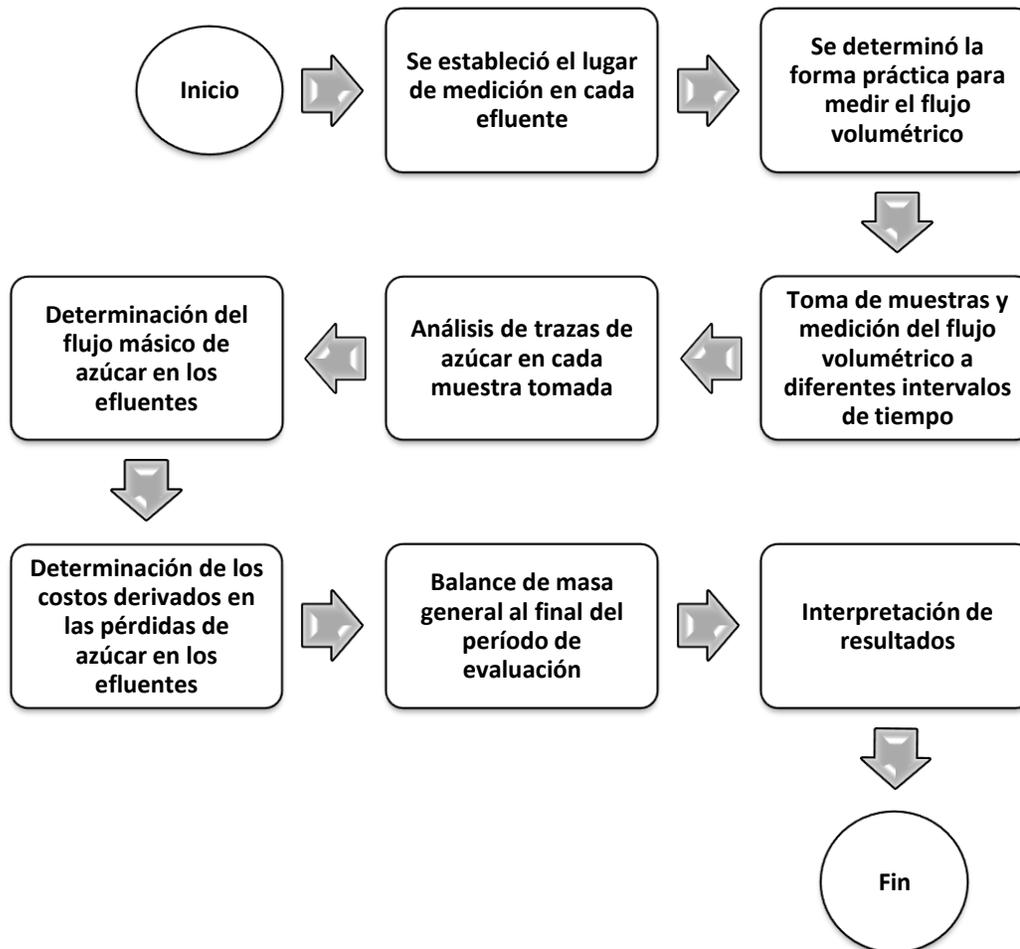
Fuente: elaboración propia

Fase II. Cuantificación de las pérdidas de azúcar.

- Se establecieron los puntos de medición o toma de muestras correspondiendo a: mesas de lavado, canal de cachaza, canal de evaporadores, condensados y canal general de la fábrica de azúcar blanco, canal de derrame en molinos, pileta de enfriamiento y salida general del proceso industrial.
- En las mesas de lavado se midió el flujo correspondiente a los galones por minuto bombeados.

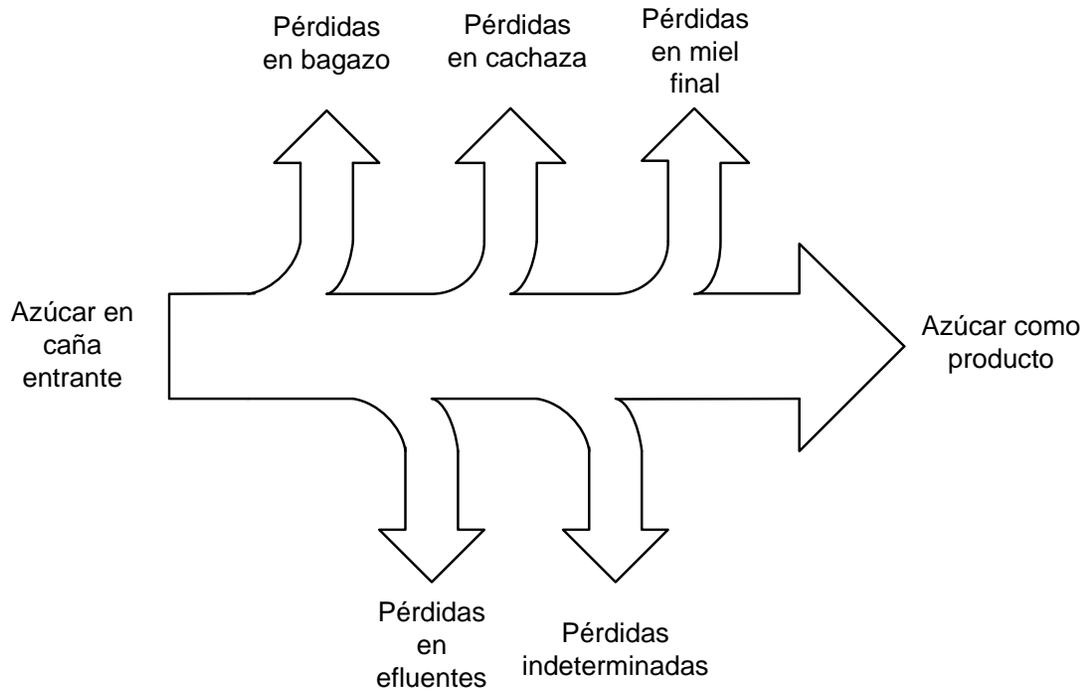
- En los canales de cachaza, evaporadores y condensados de la fábrica de azúcar blanco se diseñaron, calibraron e instalaron vertederos para la medición de los flujos volumétricos.
- En el canal general de la fábrica de azúcar blanco y en la salida general se aplicó el método del flotador para medir el flujo volumétrico. Mientras que en el canal de derrame en molinos se aplicó un método volumétrico para determinar el flujo.
- A cada punto se le tomaron cuatro muestras a diferentes horas al día para determinar las trazas de azúcar y se midió su respectivo flujo volumétrico. Esto se realizó por un período de 5 días, obteniendo así 20 muestras para cada punto y 160 muestras en total con todos los puntos.
- Con los datos de concentración de azúcar (mg/l) y los flujos volumétricos de los efluentes, se calculó el flujo másico de azúcar.
- Los flujos másicos promedio de azúcar se transformaron en pérdidas de azúcar (lb/ton caña) y se determinó a cuánto ascienden las pérdidas económicas con el flujo másico de azúcar que se pierde al final del proceso industrial (en la salida general).
- Por último se realizó un balance de masa total al final del período de evaluación tomando en cuenta las pérdidas totales estimadas de azúcar presentes en el efluente final o salida general.

Figura 5. Diagrama de flujo de la cuantificación de las pérdidas de azúcar en los efluentes del proceso industrial.



Fuente: elaboración propia

Figura 6. **Recuperación de azúcar (balance de azúcar) en el ingenio azucarero durante el período de evaluación.**



Fuente: elaboración propia

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

3.6.1. Evaluación del método analítico cuantitativo

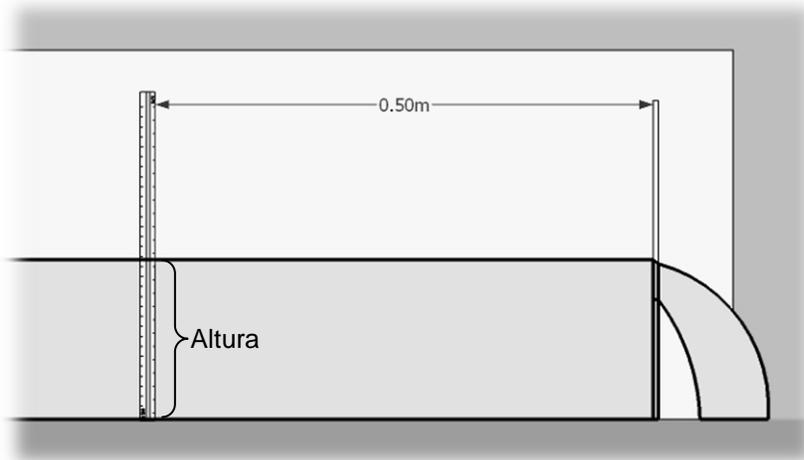
- Exactitud, repetibilidad y linealidad.
 - Se realizaron cuatro soluciones de sacarosa (grado reactivo) con las concentraciones definidas: 25, 50, 75 y 100 ppm de pol, correspondientes a la tabla de calibración del método cuantitativo.
 - Se preparó el reactivo de antrona, agregando 0,2 g de antrona a 100 ml de ácido sulfúrico al 95 - 98 % v/v.
 - Se aplicó por sextuplicado el método analítico cuantitativo descrito en el Anexo 1 para determinar las trazas de azúcar de las soluciones anteriormente preparadas.
 - Se tabularon los datos y se analizaron los parámetros estadísticos.

- Reproducibilidad.
 - Se realizó una solución de 1000 ml con concentración de 50 ppm de sacarosa.
 - Por triplicado y con dos analistas diferentes se aplicó el método cuantitativo de trazas de azúcar a la solución anteriormente preparada.
 - Se repitió el paso anterior al día siguiente.
 - Se tabularon y se analizaron los parámetros estadísticos.

3.6.2. Sistema de medición de flujo

- Mesas de lavado: el flujo de agua se consideró constante y se utilizó el valor de agua que era bombeada 2220 gal/min (8392 l/min).
- Canales de cachaza, evaporadores y condensados de la fábrica de blanco: se midió la altura del agua con respecto al fondo del canal, a una distancia de 50 cm del vertedero (Figura 7), realizando tres mediciones y tomando el promedio. Dicha altura se insertó en las ecuaciones determinadas por calibración para cada vertedero, proporcionando así el flujo requerido; estas ecuaciones se presentan en la sección de resultados.
- Canal general de blanco: conociendo el ancho del canal (0,79 m), se midió la profundidad del agua para determinar el área de sección transversal, luego se aplicó el método del flotador midiendo el tiempo de recorrido por un trayecto establecido de 1,6 m, para lo cual se realizaron tres mediciones de tiempo y se tomó el promedio; esto proporcionó la velocidad del fluido y se corrigió por un factor de 0,85. Multiplicando la velocidad del fluido por la sección transversal se obtuvo el flujo volumétrico.
- Canal de derrame en molinos: se aplicó un método volumétrico midiendo el tiempo requerido para captar cierta cantidad de líquido en un recipiente. Luego, con la ayuda de un beacker de 2000 ml, se determinó el volumen captado y se procedió a dividir entre el tiempo. De esta forma se obtuvo el flujo volumétrico.

Figura 7. **Medición de la profundidad del agua utilizando un vertedero como medidor de flujo**



Fuente: elaboración propia.

- Salida general: se tomó un sector uniforme de dicha salida a evaluar. Luego, conociendo el ancho del canal (2,70 m), se midieron tres profundidades diferentes y se tomó el valor promedio para determinar el área de sección transversal. Seguido de esto, se aplicó el método del flotador midiendo el tiempo de recorrido por un trayecto establecido de 15,55 m, para lo cual se realizaron tres mediciones de tiempo y se tomó el promedio. Esto proporcionó la velocidad superficial del fluido y se corrigió, a velocidad media, utilizando el factor correspondiente de la tabla I. Multiplicando la velocidad media del fluido por la sección transversal se obtuvo el flujo volumétrico.

3.6.3. Calibración de los vertederos rectangulares contraídos

- Se instaló cada uno de los vertederos en el lugar apropiado para la medición.
- Luego, en seis corridas, se midió el tiempo requerido para captar cierta cantidad de líquido en un recipiente; posteriormente, con la ayuda de un beacker de 2000 ml, se determinó el volumen captado y se procedió a dividir entre el tiempo. De esta forma se obtuvo el flujo volumétrico.
- A cada corrida descrita anteriormente, se midió la altura del agua con respecto el fondo del canal a una distancia de 50 cm del vertedero (Figura 4).
- Teniendo los distintos valores de flujo volumétrico y altura del agua se determinó el coeficiente promedio de cada vertedero aplicando las siguientes ecuaciones. (Referirse a las Figuras 2 y 3)

$$Q = CLH^{3/2}$$

$$C = \frac{Q}{LH^{3/2}}$$

Donde:

Q = flujo volumétrico (m^3/s).

L = Ancho de la cresta (m).

H = Diferencia de la altura del agua con respecto al fondo del canal y la altura de la cresta. Este valor es conocido como carga (m).

C = Coeficiente del vertedero (m/s).

3.6.4. Cuantificación de las pérdidas de sacarosa

- Se tomaron cuatro muestras diarias, a diferentes horas, de 100 ml en cada uno de los 8 efluentes evaluados por un período de una semana y se anotó el flujo volumétrico respectivo siguiendo el sistema de medición descrito en la sección 3.6.2.
- A cada muestra se le aplicó el método cuantitativo para determinar las trazas de azúcar (Anexo 1).
- Se determinó el flujo másico de sacarosa presente en los efluentes, así como las pérdidas (lb) por tonelada de caña entrante.
- Se tabularon y analizaron los resultados.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Fase I. Evaluación del método cuantitativo de trazas de azúcar.

Tabla III. **Concentraciones experimentales obtenidas de las soluciones de sacarosa para determinar la exactitud, repetibilidad y linealidad del método**

Repetición	Soluciones de Sacarosa			
	25 ppm	50 ppm	75 ppm	100 ppm
1	M _{1,A}	M _{1,B}	M _{1,C}	M _{1,D}
2	M _{2,A}	M _{2,B}	M _{2,C}	M _{2,D}
3	M _{3,A}	M _{3,B}	M _{3,C}	M _{3,D}
4	M _{4,A}	M _{4,B}	M _{4,C}	M _{4,D}
5	M _{5,A}	M _{5,B}	M _{5,C}	M _{5,D}
6	M _{6,A}	M _{6,B}	M _{6,C}	M _{6,D}
Promedio	Ma	Mb	Mc	Md

Fuente: elaboración propia

Tabla IV. **Concentraciones experimentales de la solución de sacarosa a 50 ppm para determinar la reproducibilidad del método**

Día	Repetición	Analista 1	Analista 2
1	1	A _{1,1,1}	A _{1,1,2}
	2	A _{1,2,1}	A _{1,2,2}
	3	A _{1,3,1}	A _{1,3,2}
	Promedio	A _{1,1}	A _{1,2}
2	1	A _{2,1,1}	A _{2,1,2}
	2	A _{2,2,1}	A _{2,2,2}
	3	A _{2,3,1}	A _{2,3,2}
	Promedio	A _{2,1}	A _{2,2}

Fuente: elaboración propia

Fase II. Cuantificación de pérdidas de azúcar.

Tabla V. **Cuantificación de las pérdidas de azúcar en los efluentes del proceso industrial del ingenio azucarero**

Día	Muestra	Rango de horario del muestreo	Concentración de Azúcar (mg/l)	Flujo volumétrico del efluente (L/min)	Flujo másico de azúcar en el efluente (lb/día)
1	1	07:00 a 09:00	$T_{Z_{1,1}}$	$Q_{1,1}$	$F_{1,1}$
	2	10:00 a 12:00	$T_{Z_{1,2}}$	$Q_{1,2}$	$F_{1,2}$
	3	13:00 a 15:00	$T_{Z_{1,3}}$	$Q_{1,3}$	$F_{1,3}$
	4	15:00 a 16:00	$T_{Z_{1,4}}$	$Q_{1,4}$	$F_{1,4}$
2	1	07:00 a 09:00	$T_{Z_{2,1}}$	$Q_{2,1}$	$F_{2,1}$
	2	10:00 a 12:00	$T_{Z_{2,2}}$	$Q_{2,2}$	$F_{2,2}$
	3	13:00 a 15:00	$T_{Z_{2,3}}$	$Q_{2,3}$	$F_{2,3}$
	4	15:00 a 16:00	$T_{Z_{2,4}}$	$Q_{2,4}$	$F_{2,4}$
3	1	07:00 a 09:00	$T_{Z_{3,1}}$	$Q_{3,1}$	$F_{3,1}$
	2	10:00 a 12:00	$T_{Z_{3,2}}$	$Q_{3,2}$	$F_{3,2}$
	3	13:00 a 15:00	$T_{Z_{3,3}}$	$Q_{3,3}$	$F_{3,3}$
	4	15:00 a 16:00	$T_{Z_{3,4}}$	$Q_{3,4}$	$F_{3,4}$
4	1	07:00 a 09:00	$T_{Z_{4,1}}$	$Q_{4,1}$	$F_{4,1}$
	2	10:00 a 12:00	$T_{Z_{4,2}}$	$Q_{4,2}$	$F_{4,2}$
	3	13:00 a 15:00	$T_{Z_{4,3}}$	$Q_{4,3}$	$F_{4,3}$
	4	15:00 a 16:00	$T_{Z_{4,4}}$	$Q_{4,4}$	$F_{4,4}$
5	1	07:00 a 09:00	$T_{Z_{5,1}}$	$Q_{5,1}$	$F_{5,1}$
	2	10:00 a 12:00	$T_{Z_{5,2}}$	$Q_{5,2}$	$F_{5,2}$
	3	13:00 a 15:00	$T_{Z_{5,3}}$	$Q_{5,3}$	$F_{5,3}$
	4	15:00 a 16:00	$T_{Z_{5,4}}$	$Q_{5,4}$	$F_{5,4}$

Fuente: elaboración propia.

Nota:

Esta misma tabla se llevó para cada uno de los siete puntos de muestreo.

Tabla VI. **Datos del balance de masa general en el ingenio azucarero al finalizar el período de evaluación**

Corriente	Valor (lb azúcar/ton caña)
Entrada de caña	A1
Pérdida en cachaza	P1
Pérdida en bagazo	P2
Pérdida en miel final	P3
Pérdida en efluente (salida general)	P4
Pérdida indeterminada	P5
Azúcar producida	B1

Fuente: elaboración propia

3.8. Análisis estadístico

- Media. Es la medida de tendencia central que se define como el promedio aritmético de un conjunto de valores. Su ecuación es:

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

Donde:

\bar{x} = Media de un conjunto de datos.

x_i = i-ésimo valor de un conjunto de datos.

n = Número total de datos.

La media se utilizó para calcular el promedio de todas las observaciones de cada variable.

- Desviación estándar. Es la medida de variabilidad que indica el promedio de las desviaciones de los valores con respecto a la media. Su ecuación es:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Donde:

σ = Desviación estándar.

\bar{x} = Media de un conjunto de datos.

x_i = i-ésimo valor de un conjunto de datos.

n = Número total de datos.

La desviación estándar se utilizó para determinar qué tanto se dispersan los valores de las observaciones con respecto a la media para cada variable

- Coeficiente de variación. Es el porcentaje de la desviación estándar relativa.

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} * 100$$

Donde:

CV = Coeficiente de variación

σ = Desviación estándar.

\bar{x} = Media de un conjunto de datos.

El coeficiente de variación se utilizó para determinar la precisión del método cuantitativo.

- Error absoluto. Es la diferencia entre el valor medido y el verdadero.

$$E = \bar{x} - x_t$$

Donde:

E = Error absoluto

\bar{x} = Media de un conjunto de datos.

x_t = Valor verdadero.

El error absoluto se utilizó para determinar la exactitud del método cuantitativo.

- Error relativo. Es una medida equivalente al error absoluto dividido el valor teórico.

$$E_r = \frac{\bar{x} - x_t}{x_t} * 100$$

Donde:

E_r = Error relativo.

\bar{x} = Media de un conjunto de datos.

x_t = Valor verdadero.

El error relativo se utilizó para determinar la exactitud del método cuantitativo.

- Comparación de una media experimental y un valor conocido utilizando la t de Student. Permite comprobar la hipótesis nula que una media experimental es igual al valor conocido.

$$t = \frac{\bar{x} - x_t}{\sigma/\sqrt{N}}$$

Donde:

t = t de Student calculada

\bar{x} = Media de un conjunto de datos.

x_t = Valor verdadero.

σ = Desviación estándar.

N = Número total de datos.

Esta herramienta se utilizó para determinar la exactitud del método cuantitativo.

- Comparación de dos medias experimentales utilizando la t de Student. Permite comprobar la hipótesis nula que dos medias son idénticas y que la diferencia entre ellas se debe a errores aleatorios.

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S_{combinada} \sqrt{\frac{N_1 + N_2}{N_1 N_2}}}$$

$$S_{combinada} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_1} (x_i - \bar{x}_1)^2 + \sum_{j=1}^{N_2} (x_j - \bar{x}_2)^2 + \sum_{k=1}^{N_3} (x_k - \bar{x}_3)^2 + \dots}{N_1 + N_2 + N_3 + \dots}}$$

Donde:

t = t de Student calculada

$\bar{x}_{1,2,3\dots}$ = Media de cada conjunto de datos.

$N_{1,2,3\dots}$ = Número total de cada conjunto de datos

Esta herramienta estadística se utilizó para evaluar la reproducibilidad del método cuantitativo.

- Intervalo de confianza. son los valores dentro de los cuales se espera que esté la media poblacional con una probabilidad dada.

$$IC = \bar{x} \pm \frac{ts}{\sqrt{N}}$$

Donde:

IC = Intervalo de confianza

t = T de Student tabulada al 95% de nivel de confianza y con N-1 grados de libertad

N = Número total de datos

σ = Desviación estándar

- Propagación de error de las mediciones. Se utilizó para calcular la incertidumbre de las mediciones aplicando la siguiente formula general. Para cualquier.

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Donde x_n es la n -ésima variable, su incertidumbre está dada por la siguiente ecuación:

$$\Delta f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n |\partial x_i (f(x_1, x_2, \dots, x_n))| * \Delta x_i$$

Donde i es la i -ésima iteración y Δx_i es la i -ésima incertidumbre de la n -ésima variable de la función f .

El análisis estadístico para la evaluación del método analítico cuantitativo consistió en que cada conjunto de datos descrito en la tabla III se sometió al cálculo de media, desviación estándar, coeficiente de variación, error absoluto, error relativo y la comparación de la media experimental con el valor teórico conocido por medio de la *t* de Student; por lo tanto, para que el método sea exacto y repetible, el coeficiente de variación debía ser menor o igual al 10% y el error relativo debía ser menor o igual al 5 %; además, para que fuera exacto, la *t* de Student calculada debía ser menor a la t_{critica} (con un nivel de confianza del 95%).

La linealidad (ámbito lineal) del método se obtuvo graficando los valores experimentales contra los valores teóricos y se realizó una regresión lineal; de esta manera, estadísticamente se verificó mediante el coeficiente de correlación no menor a 0,98.

La reproducibilidad del método se determinó con la comparación de las medias por medio de la *t* de Student, en este caso, para que el método fuera reproducible la *t* de Student calculada debía ser menor a la t_{critica} (con un nivel de confianza del 95%).

4. RESULTADOS

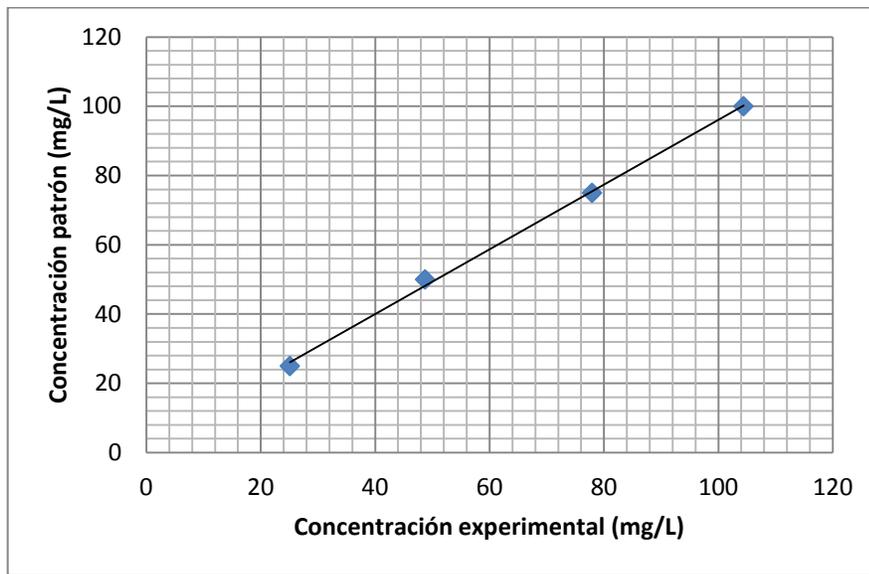
Fase I. Evaluación del método analítico cuantitativo de trazas de azúcar.

Tabla VII. **Concentraciones experimentales, en partes por millón de azúcar, obtenidas de las diferentes soluciones de sacarosa y los resultados de los parámetros estadísticos**

Repetición	Soluciones de sacarosa a:			
	25 ppm	50 ppm	75 ppm	100 ppm
1	23,50	47,17	72,50	100,67
2	26,17	51,00	73,34	93,50
3	27,00	45,50	80,34	114,00
4	25,00	53,17	79,50	109,84
5	24,83	47,33	81,17	109,17
6	24,17	48,33	80,84	99,34
Promedio	25,11	48,75	77,95	104,42
Desviación estándar	1,29	2,82	3,94	7,78
Coefficiente de variación	5,12	5,79	5,06	7,45
Concentración patrón	25,00	50,00	75,00	100,00
t calculada	0,21	1,08	1,83	1,39
t crítica	2,57	2,57	2,57	2,57
Error absoluto	0,11	1,25	2,95	4,42
Error relativo (%)	0,45	2,50	3,93	4,42

Fuente: Apéndice 1 del presente trabajo.

Figura 8. **Curva de linealidad del método analítico cuantitativo de trazas de azúcar en aguas**



Fuente: Apéndice 1 del presente trabajo.

Tabla VIII. **Parámetros estadísticos de la curva de linealidad del método analítico cuantitativo de trazas de azúcar en aguas (figura 8)**

Tipo de regresión	Ecuación	Coefficiente de correlación
Lineal	$y = 0,9345 x + 2,63$	0,9985

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Concentraciones experimentales, en partes por millón de azúcar, obtenidas por dos analistas diferentes en una solución de 50 ppm de azúcar y resultados de los parámetros estadísticos**

Día	Repetición	Analista 1	Analista 2
1	1	49,83	50,50
	2	51,67	46,83
	3	48,17	49,00
2	4	57,50	48,00
	5	57,83	52,50
	6	55,17	53,67
Promedio		53,36	50,08
t crítica			2,23
t calculada			1,81
Grados de libertad			10
Nivel de confianza			95%

Fuente: Apéndice 1 del presente trabajo.

Tabla X. **Check list de cumplimiento a la evaluación del método analítico cuantitativo de trazas de azúcar en aguas**

Parámetro	Cumple	No cumple
Exactitud	X	
Repetibilidad	X	
Reproducibilidad	X	
Linealidad	X	

Fuente: Apéndice 1 del presente trabajo.

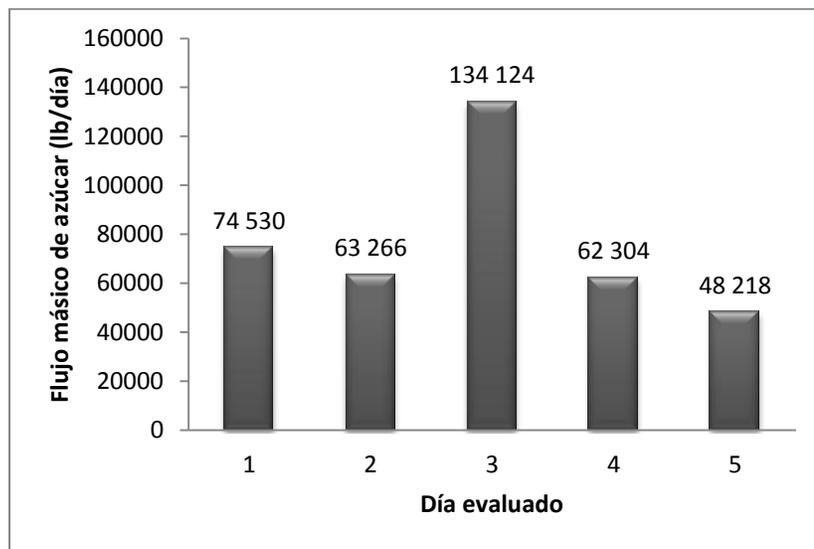
Fase II. Cuantificación de las pérdidas de azúcar

Tabla XI. Ecuaciones determinadas para cada sistema de medición de flujo volumétrico establecido en los puntos de muestreo

Punto de medición	Ecuación	Variables	Unidades	Sistema de medición
Mesas de lavado	$Q = 8391,6$	Caudal (Q)	L/min	Bombeo
Canal de cachaza	$Q = 221,25 \left(\frac{\text{altura}}{100} - 0,12 \right)^{1,5}$	Altura o profundidad del agua Caudal (Q)	cm L/s	Vertedero rectangular contraído
Canal de evaporadores	$Q = 308,16 \left(\frac{\text{altura}}{100} - 0,25 \right)^{1,5}$	Altura o profundidad del agua Caudal (Q)	cm L/s	Vertedero rectangular contraído
Canal de condensados	$Q = 451,4 \left(\frac{\text{altura}}{100} - 0,12 \right)^{1,5}$	Altura o profundidad del agua Caudal (Q)	cm L/s	Vertedero rectangular contraído
Canal general de la fábrica de blanco	$Q = 0,85 \left(\frac{12,64 * \text{alto}}{\text{tiempo}} \right)$	Altura o profundidad del agua Tiempo Caudal (Q)	cm s L/s	Método del flotador
Canal de derrame en molinos	$\text{Caudal} = \frac{\text{Volumen}}{\text{tiempo}}$	Volumen captado Tiempo Caudal (Q)	L s L/s	Método volumétrico
Salida general	$Ce = \left[0,0656 \left(\frac{\text{altura}}{100} \right) \right] + 0,64$ $\text{Caudal} = Ce * \frac{(419,85 * \text{altura})}{\text{tiempo}}$	Coefficiente de corrección de la velocidad (Ce) Altura o profundidad del agua Tiempo Caudal (Q)	Adimensional cm s L/s	Método del flotador

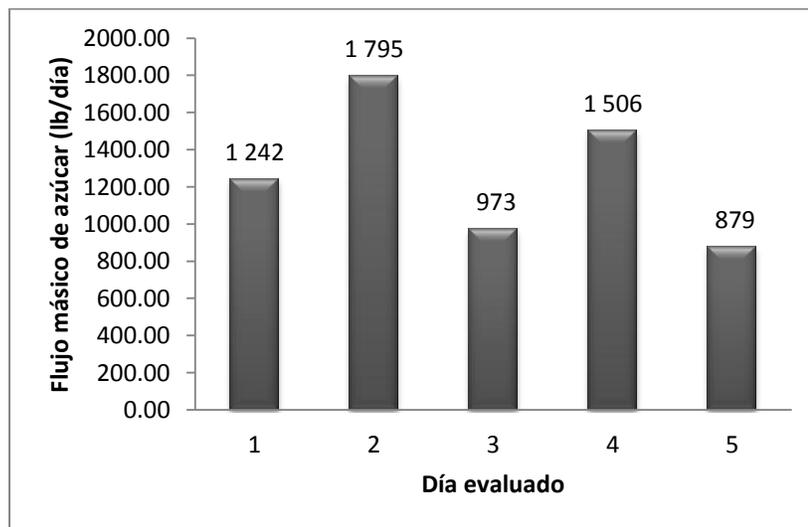
Fuente: Apéndice 2 del presente trabajo.

Figura 9. **Pérdidas promedio diarias de azúcar en mesas de lavado**



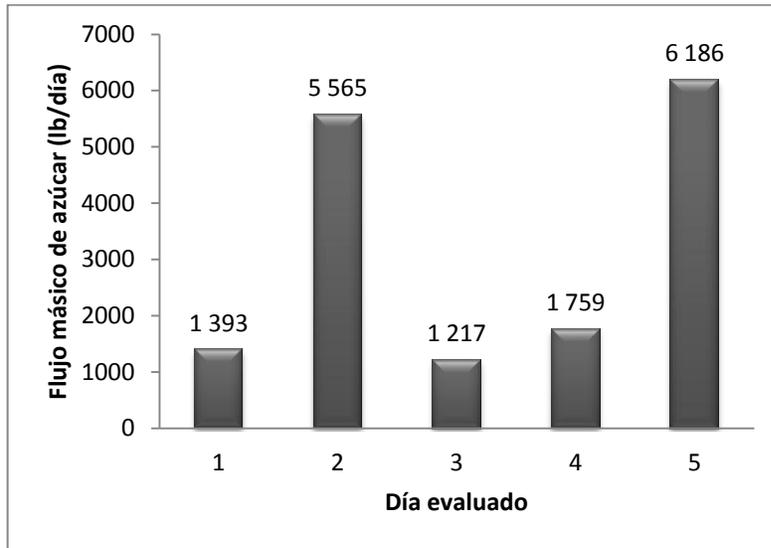
Fuente: Apéndice 1 del presente trabajo.

Figura 10. **Pérdidas promedio diarias de azúcar en el canal de cachaza**



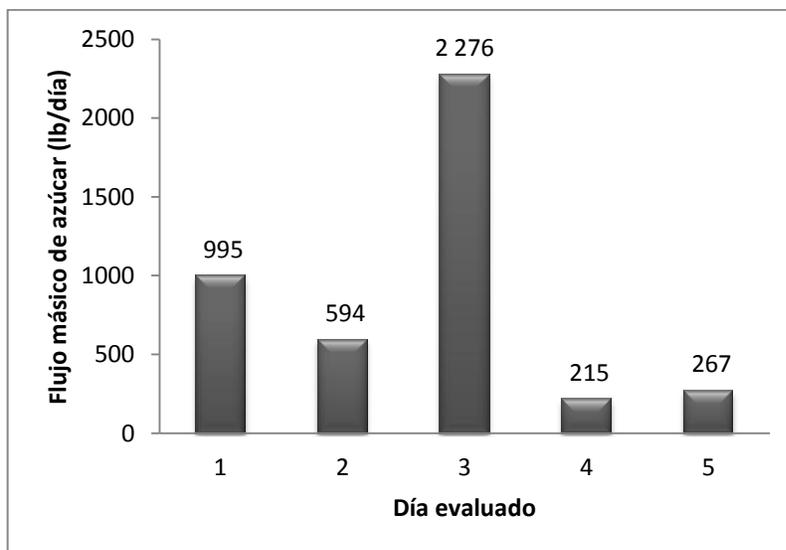
Fuente: Apéndice 1 del presente trabajo.

Figura 11. **Pérdidas promedio diarias de azúcar en el canal de evaporadores de la fábrica de azúcar blanco**



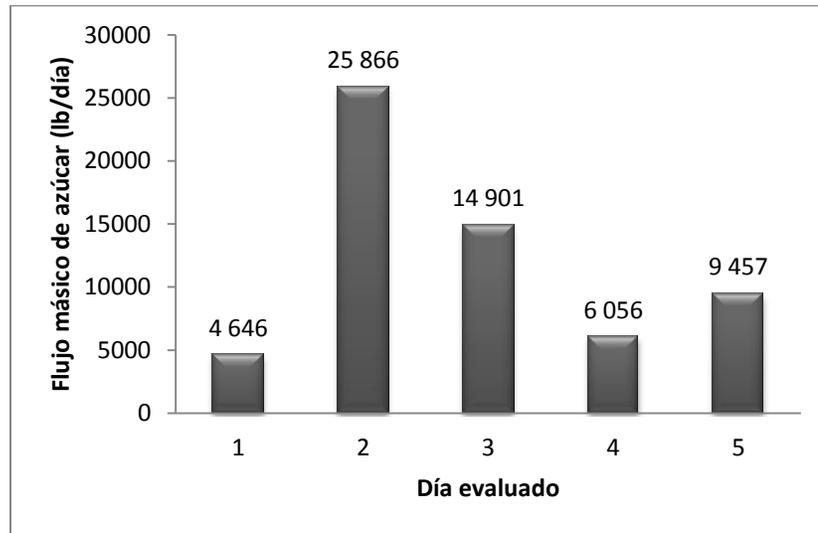
Fuente: Apéndice 1 del presente trabajo.

Figura 12. **Pérdidas promedio diarias de azúcar en el canal de condensados de la fábrica de azúcar blanco**



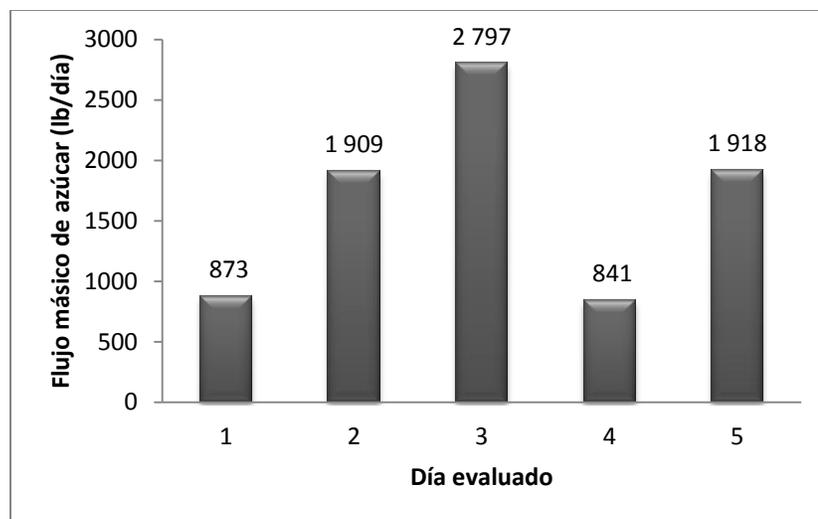
Fuente: Apéndice 1 del presente trabajo.

Figura 13. **Pérdidas promedio diarias de azúcar en el canal general de la fábrica de azúcar blanco**



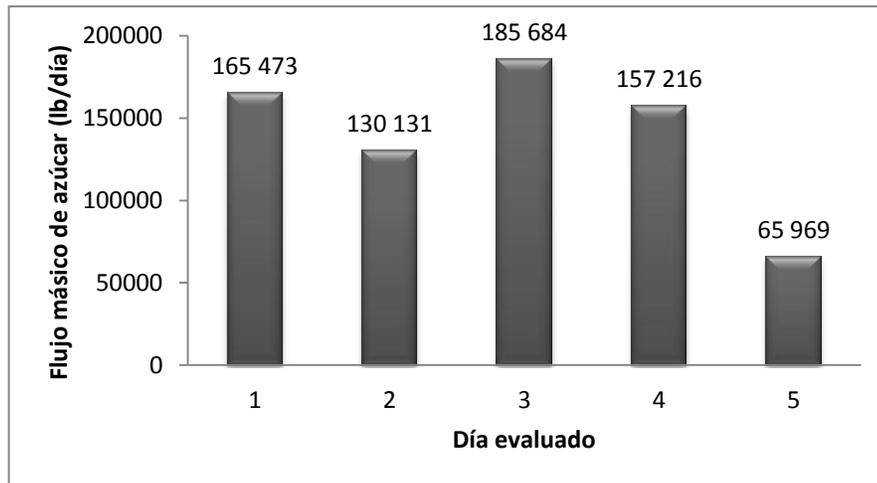
Fuente: Apéndice 1 del presente trabajo.

Figura 14. **Pérdidas promedio diarias de azúcar en el canal de derrame en molinos**



Fuente: Apéndice 1 del presente trabajo.

Figura 15. **Pérdidas promedio diarias de azúcar en la salida general de la fábrica**



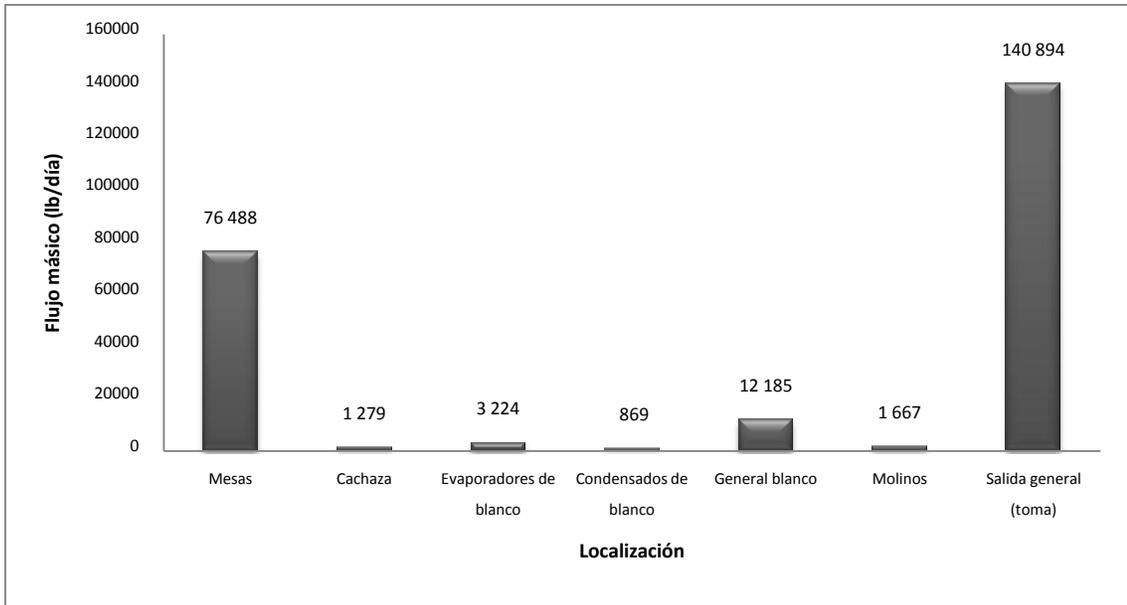
Fuente: Apéndice 1 del presente trabajo.

Tabla XII. **Flujo másico promedio de azúcar como pérdidas en los efluentes evaluados del proceso industrial en el ingenio azucarero**

Localización	Flujo másico	
	lb/día	Intervalo de confianza*
Mesas de lavado	76 488	±24 763
Canal de cachaza	1 279	±546
Canal de evaporadores en fábrica de azúcar blanco	3 224	±2 461
Canal de condensados en fábrica de azúcar blanco	869	±733
Canal general en fábrica de azúcar blanco	12 185	±5 425
Canal de derrame en molinos	1 667	±846
Salida general de fábrica	140 894	±38 475

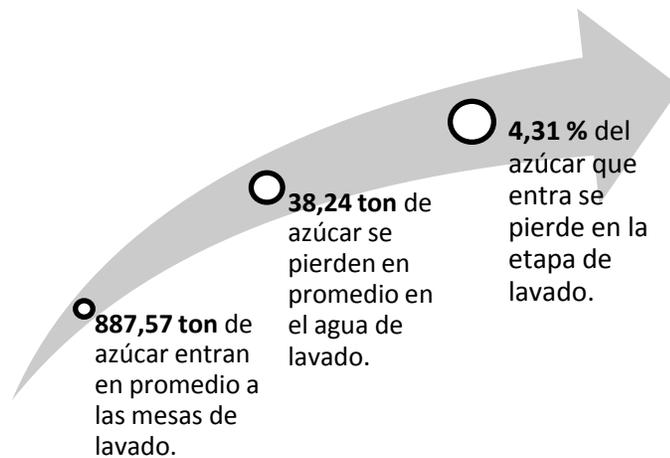
*Evaluado con un nivel de confianza de 95% y 19 grados de libertad
Fuente: Apéndice 1 del presente trabajo.

Figura 16. **Gráfica comparativa del flujo másico de azúcar promedio, al final del período total de evaluación, como pérdidas en los efluentes del proceso industrial en el ingenio azucarero**



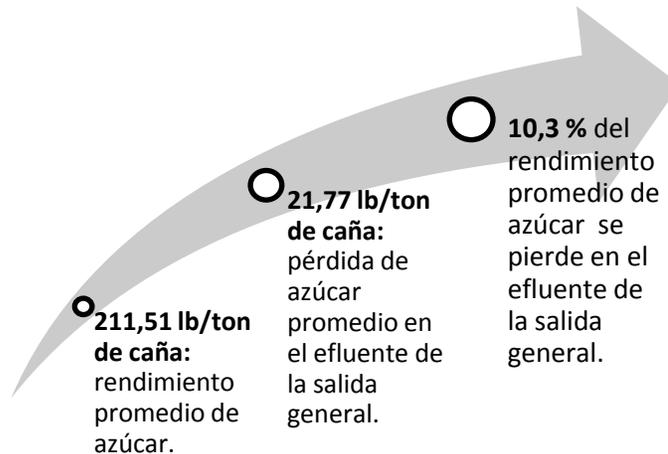
Fuente: Apéndice 1 del presente trabajo.

Figura 17. **Porcentaje de pérdida de azúcar en las mesas de lavado con respecto al azúcar que entra en la caña**



Fuente: Apéndice 1 del presente trabajo.

Figura 18. **Porcentaje de pérdida de azúcar en el efluente de la salida general con respecto al rendimiento promedio de azúcar**



Fuente: Apéndice 1 del presente trabajo.

Tabla XIII. **Pérdidas económicas detectadas al final del período de evaluación**

Pérdida	Valor
Económica (US\$) ^{1,2}	118 641

¹Precio del azúcar crudo internacional 0,2488 \$/lb al 10 de abril de 2011(Bloomberg)

²Se tomó en cuenta la recuperación de la fábrica (SJM)

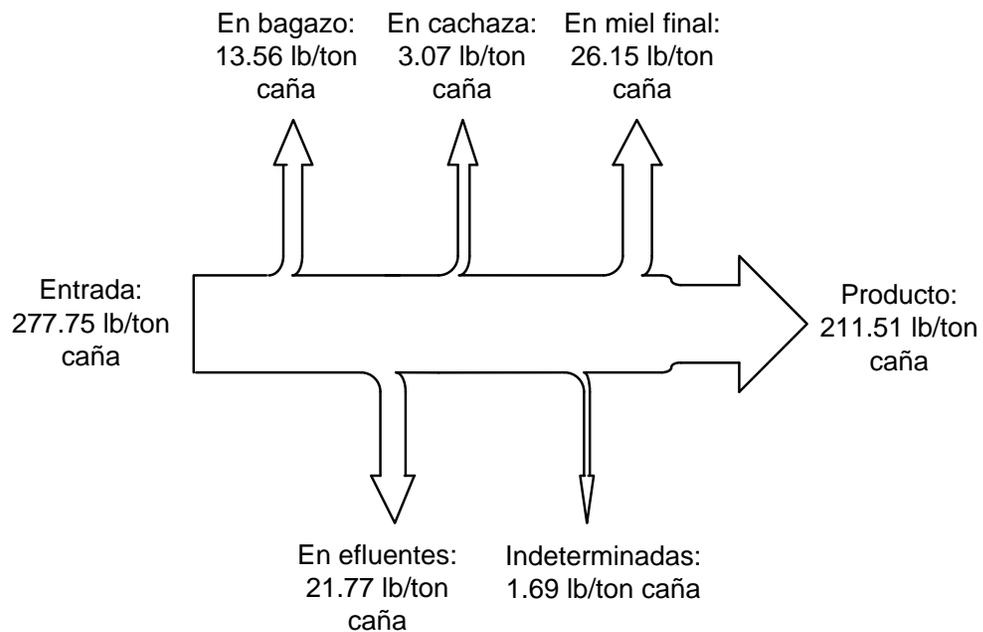
Fuente: Apéndice 1 del presente trabajo.

Tabla XIV. **Comparación entre balances generales de azúcar en la fábrica del ingenio azucarero ($lb_{azúcar}/ton_{caña}$)**

	CORRIENTE	Balance actual	Balance incluyendo efluentes
ENTRADA	Total en caña	277,75	277,75
SALIDAS	Pérdida en miel	26,15	26,15
	Pérdida en cachaza	3,07	3,07
	Pérdida en bagazo	13,56	13,56
	Pérdidas en efluentes	--	21,77
	Pérdidas indeterminadas	23,48	1,69
	Recobrados	211,51	211,51

Fuente: Apéndice 1 del presente trabajo.

Figura 19. **Diagrama del balance general de azúcar en la fábrica del ingenio azucarero descrito en $lb_{azúcar} / ton_{caña}$**



Fuente: Apéndice 1 del presente trabajo.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En un ingenio azucarero es indiscutible, además de las pérdidas determinadas, la presencia de otras fuentes de mermas de azúcar y que simplemente se asumen como indeterminadas. Una fuente conocida aunque no tomada con importancia, corresponde a los efluentes o corrientes de agua que salen del proceso industrial; el motivo de dicha indiferencia se debe al desconocimiento de la cantidad de azúcar que se pierde en los efluentes.

Para cuantificar la cantidad de azúcar en los efluentes, primero se debe identificar un método cuantitativo que permita determinar la presencia de azúcar en estas corrientes de agua. Por lo tanto, la presente investigación inició evaluando un método analítico cuantitativo que fue proporcionado por el ingenio azucarero donde se realizó el estudio. El método consiste en la reacción de la antrona en un medio ácido fuerte como el ácido sulfúrico con los carbohidratos, formando así un compuesto de furano coloreado con una máxima absorción alrededor de 630 nm. La evaluación consistió en determinar la exactitud, repetibilidad, reproducibilidad y linealidad o ámbito lineal del método, para lo cual se emplearon soluciones de sacarosa grado reactivo como patrón. Las concentraciones evaluadas correspondieron a 25, 50, 75 y 100 ppm de azúcar debido a que estos valores son los que el método toma en su curva de calibración.

En la tabla VII de la sección de resultados, se muestran los distintos valores de concentración (en partes por millón de azúcar) obtenidos experimentalmente con las distintas soluciones de sacarosa; además se muestran los resultados de los parámetros estadísticos evaluados. La exactitud

se evaluó por medio del error relativo, el cual no debía superar el 5 % del valor patrón. El error relativo más bajo obtenido corresponde a la solución de 25 ppm, siendo este 0.446 %. Quiere decir que el promedio de los resultados obtenidos (25,11 ppm) no coincide con el valor real o patrón en un 0,449 %. Por otro lado, el error relativo más alto se observó con la solución de 100 ppm de azúcar (4,4%). De esta forma se comprueba que en un rango entre 25 ppm y 100 ppm de azúcar, el método analítico no errará en más del 5 % con respecto al valor real.

Sin embargo, para evaluar la exactitud del método también se aplicó un análisis estadístico por comparación entre la media experimental y el valor conocido utilizando la prueba de la t de Student. Al observar los valores de la t de Student en la tabla VII se observa que el valor calculado es menor al valor crítico (evaluado a un nivel de confianza de 95 % y 5 grados de libertad) para las cuatro soluciones preparadas. Lo cual indica que no existe diferencia significativa entre la media experimental y el valor patrón (concentración patrón de cada solución), comprobando así la segunda hipótesis de trabajo.

La repetibilidad del método, que corresponde a una medida de la precisión de los resultados que se pueden obtener con el método evaluado, se determinó por medio de la desviación estándar y en especial con el coeficiente de variación, los valores de estos parámetros estadísticos también se presentan en la tabla VII; en este caso, para que el método fuese tomado como repetible, su coeficiente de variación debía ser menor al 10 %. Si se observan los resultados de la tabla referida, el coeficiente de variación no supera el 7.5 %, de tal manera que el método sí es repetible; de esta forma se afirma que existirá precisión entre los resultados de las mediciones sucesivas realizadas bajo las mismas condiciones.

Otro parámetro evaluado es la linealidad o ámbito lineal del método, este resultado se observa en la figura 8 y tabla VIII. En este caso, para que el método sea lineal, su coeficiente de correlación debe ser mayor o igual a 0,995 y significa que la señal obtenida para el analito responde linealmente a la concentración. Por lo tanto, según los resultados, el coeficiente de correlación (0,9985) efectivamente es mayor a 0,995, considerándose así la linealidad del método.

Finalmente, la evaluación del método analítico cuantitativo terminó con la determinación de su reproducibilidad o proximidad entre los resultados de mediciones de un mismo mesurando realizadas bajo distintas condiciones de medición, para lo cual, a partir de una solución patrón de 50 ppm de azúcar se procedió a determinar experimentalmente su concentración utilizando el método analítico cuantitativo, en dos días diferentes y por dos analistas diferentes. La evaluación se comprobó estadísticamente por medio de la comparación entre dos medias experimentales utilizando nuevamente la t de Student. La tercer hipótesis de trabajo corresponde a que no existe diferencia significativa entre las medias experimentales obtenidas por los dos analistas, para lo cual la t de Student calculada debía ser menor a la t crítica. Según la Tabla IX, lo anteriormente mencionado se cumple por lo que se comprueba la tercera hipótesis.

De esta manera, al analizar los resultados de la evaluación del método analítico cuantitativo se determinó que dicho método es confiable para detectar y cuantificar el azúcar presente en los efluentes. Esto debido a que, como se resume en la tabla X, el método cumple a los parámetros de exactitud, repetibilidad, reproducibilidad y linealidad. Sabiendo esto, se procedió a cuantificar las pérdidas de azúcar en los efluentes del proceso industrial.

La segunda fase de la investigación inició con diseñar y establecer un método de medición de flujo volumétrico para cada punto de interés, este resultado se presenta en la tabla XI. Para el efluente correspondiente a las mesas de lavado, debido a la dificultad de la medición a la salida se midió el flujo de agua que entraba o que era bombeado; para lo cual se asumió que la mayoría de agua escurría por la mesa de lavado correspondiendo así al flujo de salida. En cuanto al canal de cachaza, de evaporadores y condensados de la fábrica de azúcar blanco, el sistema que mejor se adaptó fue el de vertederos rectangulares; por lo que su medición fue práctica, ya que únicamente se midieron alturas o profundidades del agua. En cuanto al canal general de la fábrica de blanco y la salida general, el método del flotador fue el que más se ajustó; mientras que para el canal de derrame de molinos se aplicó un método volumétrico.

Ahora bien, teniendo establecidos los sistemas de medición de flujo volumétrico y la forma de cuantificar el azúcar presente en los efluentes, fue posible la determinación del flujo másico de azúcar; para cada punto de medición se tomaron 20 muestras distribuidas en cinco días. Las figuras 9 a 15 detallan los resultados promedio diarios de los flujos másicos de azúcar en cada efluente evaluado. La figura 9 en particular indica que en las mesas de lavado, las pérdidas de azúcar ascendían a valores mayores a las 50 000 lb diarias (500 quintales), incluso llegando a un valor máximo de 134 124 lb. Conociendo estos valores surge la pregunta de por qué utilizar el lavado de la caña en la fase de preparación del proceso industrial.

El lavado de la caña responde a la necesidad de eliminar tierra, materias extrañas e incluso piedras que acompañan a la caña debido al proceso de la cosecha. Además, es común que en Guatemala, la cosecha de la caña esté acompañada de la quema de los cañaverales con el fin de eliminar cierta

cantidad de basura y facilitar el proceso de la cosecha, que en su mayoría es realizado manualmente. Sin embargo esto derrite parcialmente la cera que se encuentra en la corteza de la caña poniendo pegajosa la superficie exterior de ésta, causando así la adhesión de tierra y hollín. Por lo tanto, si no se elimina, esto creará dificultades en los molinos y el resto del proceso³².

Ahora bien, el promedio de los resultados en cuanto a las pérdidas de azúcar en las mesas de lavado se presentan en la tabla XII, siendo éste 76 488 lb de azúcar diario. Según datos del ingenio donde se realizó la investigación, a inicios de abril de 2011, el promedio de la caña molida diaria correspondía a 6 390 toneladas, y el Pol % en caña correspondía a 13,89. De tal manera que la cantidad de azúcar que entraba a la fábrica correspondía a 887,57 toneladas, mientras que (según los resultados), el azúcar perdido en las mesas de lavado corresponde a 38,24 toneladas (76 488 lb). Es decir, el 4,31 % del azúcar que entra se pierde en las mesas de lavado tal y como se muestra en la figura 17. Lo cual corresponde a un valor más alto que el determinado por Acra Corporation en Lousiana (2,2 %), Mauritius (1,6%) y Brasil (1,3 %)³³.

Está claro que las pérdidas de azúcar en las mesas de lavado son significativas, sin embargo, no se puede emitir un juicio a favor o en contra de la eliminación del lavado de caña ya que se necesita evaluar qué tan rentable es la recuperación del azúcar que se pierde en el agua de lavado y el impacto que puede tener la eliminación del lavado de caña en el proceso. Por lo tanto, estos datos dan lugar a plantear una nueva investigación que refleje si es técnica y económicamente viable la recuperación del azúcar perdido por el lavado de la caña; inclusive, se puede comparar el lavado de la caña con el uso de un sistema de tamizado para remover la materia extraña, tomando en cuenta la economía del proceso y qué tan perjudicial puede ser en las etapas siguientes,

³² Acra Corporation. Las pérdidas de azúcar son dinero. p. 43.

³³ *Ibid.* p. 44.

por ejemplo en la molienda y clarificación. Por otro lado, las pérdidas de azúcar en el lavado dejan abierta la posibilidad de plantear nuevos sistemas que cubran las necesidades del lavado, con el fin de reducir a un mínimo las pérdidas que actualmente se dan en esta etapa y que se lograron cuantificar con el presente estudio.

Otro punto de medición corresponde al canal de cachaza. La Figura 10 muestra que la menor cantidad en libras de azúcar perdidas correspondió a 879 y la mayor cantidad correspondió a 1795 libras. Mientras que en promedio, las pérdidas ascendieron a 1279 libras de azúcar diarias (tabla XII). El flujo de agua correspondiente a este canal se debe a las descargas de las bombas de vacío de los filtros de cachaza, además del agua no agotada que escurre de la cachaza filtrada. El valor de azúcar perdido es pequeño y corresponde al 0.09 % del azúcar recuperado como producto, por lo que establecer valores de tolerancia pueden ayudar a priorizar el control en otros efluentes.

La figura 11 y 12 muestra el flujo másico de azúcar en los canales de evaporadores y condensados de la fábrica de azúcar blanco. En el canal de evaporadores fluyen corrientes de purga y de lavado de cada vaso o evaporador. Mientras que en el canal de condensados fluye agua proveniente del agua de condensado del último efecto de los evaporadores. La principal causa de contaminación del agua de condensado se debe al arrastre de pequeñas gotas de jugo o meladura por las rápidas corrientes de los vapores producto de la evaporación³⁴. Según las figuras referidas, existe una variabilidad bastante marcada en los resultados. El principal motivo se debe a otras corrientes que eventualmente coincidían en dichos canales. La tabla XII muestra que el flujo de azúcar en el canal de condensados es pequeño (869 lb/día) y se podría prescindir de su medición. Mientras que en el canal de

³⁴ Acra Corporation. Las pérdidas de azúcar son dinero. p. 72.

evaporadores el valor (3224 lb/día) es mayor al anterior. Sin embargo, su medición (al igual que en el canal de cachaza) puede utilizarse para mejorar el control del proceso industrial estableciendo valores de tolerancia ya que puede ayudar a detectar anomalías en cuanto a pérdidas de azúcar en este efluente.

Ahora bien, el flujo másico de azúcar correspondiente al canal general de la fábrica de azúcar blanco es considerable, ya que el valor máximo detectado se encuentra en 25 866 lb de azúcar por día, mientras que el valor promedio es 12 185 lb/día; cabe destacar que en este canal se encuentra el flujo de azúcar determinado en el canal de evaporadores y condensados. Sin embargo, el valor de flujo másico en el canal general es mayor a la suma de los flujos de azúcar de los dos canales anteriormente mencionados. Esto se debe a los derrames y fugas que se detectaron en los equipos cercanos a dicho canal. En cuanto al canal de derrame en molinos, el flujo másico promedio de azúcar es 1667 lb/día (tabla XII). El resultado es similar al encontrado en el canal de cachaza. En cuanto al valor máximo determinado, la figura 14 muestra que corresponde a 2797 lb/día.

Todos los efluentes analizados convergen finalmente en un único flujo que corresponde a la salida general de la fábrica. Según la figura 15, el valor máximo detectado es 185 684 lb de azúcar por día, mientras que el valor promedio es de 140 894 lb de azúcar por día. Al analizar este último valor, y sabiendo que en el ingenio donde se realizó la evaluación el rendimiento promedio de azúcar que se tiene al día corresponde a 21,.51 lb/ton de caña, la pérdida de azúcar en el efluente de la salida adquiere un valor del 10,3 % con respecto a la producción diaria (con 6390 ton de caña molida diariamente), tal y como se muestra en la figura 18. Lo cual es un valor significativo en cuanto a

pérdida de azúcar. Es entonces aquí donde el análisis de los diferentes efluentes toma importancia, ya que permite evaluar los puntos a tomar en cuenta para mejorar el control de las pérdidas.

Los flujos máscicos de azúcar anteriormente analizados y presentes en la tabla XII, al resultar ser el promedio de los valores obtenidos durante el período de evaluación, presentan un intervalo en el cual se afirma que la media estará presente con un 95 % de confianza; dicho intervalo, para los siete efluentes evaluados, se encuentra en ± 45 % alrededor del valor medio del conjunto de datos obtenidos durante el período de evaluación, esto demuestra la alta variabilidad en los flujos máscicos de azúcar presentes en los efluentes del proceso industrial. De esta manera se hace evidente que los flujos máscicos de azúcar son inestables y las principales causas a enumerar son: corrientes de lavado de los equipos, purgas, fugas y derrames; es necesario resaltar que esta variabilidad inherente a los flujos inestables repercute en las estimaciones de las pérdidas económicas. Por otro lado, los flujos máscicos de azúcar son medidas indirectas, de tal forma que se esperaba la influencia de error por cada una de las medidas directas. Al analizar la propagación de error de los datos obtenidos, se detectó que los errores no superaron el ± 12 % de los resultados de la tabla XII, proporcionando así veracidad a las mediciones realizadas.

Ahora bien, en la figura 16 se comparan los valores promedio de las pérdidas de azúcar obtenidas en cada flujo. Observando detenidamente se puede inferir que de los seis efluentes evaluados dentro de la fábrica, el flujo de azúcar en las mesas de lavado implica el 54% de las pérdidas medidas en la salida general de la fábrica. De esta manera, si se logra solucionar adecuadamente el problema que representan las mesas de lavado y si se reducen al mínimo las pérdidas ahí presentes, se esperaría una disminución de al menos el 50 % de pérdidas de azúcar en el efluente de la salida general.

Por otro lado, tomando el promedio de las pérdidas de azúcar en la salida general y aplicándolo a los cinco días de evaluación, las pérdidas económicas ascienden a un valor total de US\$ 118 641. Cabe destacar que para calcular dicho valor se tomó en cuenta la recuperación de la fábrica (factor SJM). Es decir, si el azúcar que fluye en los efluentes fuera procesado, no todo podría terminar en sacos de producto final sino que existiría cierta cantidad que se perdería, por lo tanto, las 140 894 lb/día que se pierden en la salida general no podrían ser recuperadas en un 100% si se procesaran. De tal forma que el factor SJM indica que el ingenio tiene la capacidad de recuperar un cierto porcentaje del azúcar que se procesa. El ingenio donde se realizó el estudio tiene un SJM promedio alrededor de 68%. Este valor se debe a que al existir dos líneas de proceso, una para azúcar blanca y otra para azúcar crudo, fue necesario realizar un promedio ponderando con la producción en cada línea, de tal forma que refleje la capacidad completa del ingenio. El manejo de estos datos se puede observar en la sección de datos calculados.

Enfocándose en las pérdidas económicas, inicialmente, se mencionó el desconocimiento e indiferencia que generalmente se le presenta a las pérdidas en los efluentes, sin embargo, con los resultados de este estudio que da a conocer las pérdidas de azúcar y su valor económico correspondiente, se logra detectar la importancia de controlar el azúcar perdido en los efluentes. La tabla XIII indica que en cinco días la pérdida económica del azúcar en los efluentes es US\$ 118 641, pero al extrapolar las pérdidas económicas a una zafra completa, 150 días, el valor estimado es mucho más significativo. Es decir, al tomar constante el valor promedio de las pérdidas en la salida general del ingenio (95 371 lb/día) y sabiendo que el precio promedio del azúcar crudo internacional (noviembre 2010 – abril 2011) es 0,2957 US\$/lb³⁵, las pérdidas ascenderían a 4,2 millones de dólares al finalizar la zafra.

³⁵ Asocaña. Estadísticas de Asocaña del precio internacional mensual del azúcar a julio de 2011.

Por otro lado, al adicionar las pérdidas de azúcar del efluente final o salida general al balance de azúcar que se realiza en el ingenio azucarero, las pérdidas indeterminadas, que anteriormente tenían valores altos, disminuyeron drásticamente. Esto se observa en la tabla XIV y se representa en la figura 17. Si se observan los valores de la tabla XIV, el valor de las pérdidas indeterminadas sin tomar en cuenta las pérdidas en los efluentes corresponde a 23,48 lb/ton de caña. Mientras que al tomar en cuenta las pérdidas en los efluentes, las pérdidas indeterminadas disminuyeron a 1,69 lb/ ton de caña. Esto quiere decir que las pérdidas de azúcar en el efluente de la salida general del proceso industrial corresponden al 92,72 % de las pérdidas indeterminadas que presenta el ingenio donde se realizó la investigación, por lo tanto se acepta la primera hipótesis de trabajo, la cual menciona que las pérdidas promedio de azúcar en el efluente de la salida general son mayores al 50% de las pérdidas indeterminadas acumuladas a la fecha en el ingenio azucarero.

CONCLUSIONES

1. El método analítico cuantitativo de trazas de azúcar en aguas es exacto con errores relativos $\leq 5\%$ y con el criterio de la t de Student se acepta la segunda hipótesis, por lo que las medias experimentales del método analítico cuantitativo no difieren significativamente de los valores patrón.
2. El método analítico cuantitativo de trazas de azúcar en aguas es repetible con un coeficiente de variación $\leq 10\%$; también es lineal con un coeficiente de correlación de 0,9985.
3. Las medias experimentales del método analítico cuantitativo de trazas de azúcar en aguas, aplicado por dos analistas en diferentes días, no difieren significativamente entre sí, por lo que el método es reproducible y se acepta la tercera hipótesis por la prueba de la t de Student.
4. El sistema de medición de flujo volumétrico aplicado en los canales de cachaza, evaporadores y condensados de la fábrica de blanco corresponde a vertederos rectangulares contraídos; en el canal general de la fábrica de blanco y en la salida general se aplicó el método del flotador; en el canal de derrame en molinos se aplicó el método volumétrico; mientras que en las mesas de lavado se midió constante el flujo bombeado.
5. Los flujos máxicos de azúcar en los efluentes del ingenio azucarero presentan alta variabilidad y se consideran inestables.

6. El flujo másico promedio en el efluente de la salida general es de 140 894 lb de azúcar por día y representa una pérdida del 10,3% con respecto a la producción diaria.
7. De los seis efluentes dentro de la fábrica, el que mayores pérdidas presenta corresponde a las mesas de lavado con 76 488 lb de azúcar por día y representa el 54,3 % de las pérdidas en la salida general.
8. El 4,31 % del azúcar que entra a la fábrica se pierde en las mesas de lavado, mientras que las menores pérdidas de azúcar en los efluentes se obtuvieron en el canal de condensados de la fábrica de azúcar blanco con 869 lb de azúcar por día; asimismo las pérdidas económicas correspondientes a las pérdidas de azúcar en el efluente de la salida general del ingenio azucarero, durante el período de evaluación, son US\$ 118 641.
9. Las pérdidas de azúcar en el efluente de la salida general del proceso industrial corresponden al 92,72 % de las pérdidas indeterminadas que presenta el ingenio donde se realizó la investigación, por lo que se rechaza la primer hipótesis de trabajo; mientras que las pérdidas indeterminadas en el balance general de azúcar, tomando en cuenta las pérdidas de azúcar en el efluente de la salida general, son 1,69 libras de azúcar por tonelada de caña.

RECOMENDACIONES

1. Realizar un estudio comparativo que evalúe técnica y económicamente el uso de las mesas de lavado y el tamizado para la remoción de materia extraña de la caña, tomando en cuenta su impacto en el proceso industrial, a fin de reducir las pérdidas de azúcar que se dan actualmente por el lavado.
2. Evaluar o diseñar otro sistema que permita eliminar la materia extraña con la que entra la caña debido al proceso de cosecha a fin de eliminar las pérdidas de azúcar por lavado.
3. Realizar un mapeo con los puntos de muestreo de los efluentes dentro de la fábrica para determinar pérdidas de azúcar y de ser necesario ampliar el número de estos puntos como método de control del proceso industrial.
4. Establecer parámetros de tolerancia en cada efluente o punto de medición para llevar un control de procesos y registrar de mejor manera las pérdidas de azúcar.
5. Capacitar personal para el monitoreo de las pérdidas de azúcar en los efluentes debido a que son puntos de oportunidad para mejorar el proceso industrial.
6. Diseñar, evaluar y construir un sistema de medición mucho más exacto en la salida general para incluir dentro del balance de masa de producción las pérdidas de azúcar en la salida general.

BIBLIOGRAFÍA

1. ACRA Corporation. *Las pérdidas de azúcar son dinero*. Reporte técnico. Miami: ACRA, 1986. p. 41 – 77, 105 – 130.
2. ASOCAÑA. *Estadísticas de Asocaña del precio internacional mensual del Azúcar a julio de 2011* [en línea]. [ref. de 25 de agosto de 2011]. Disponible en Web: <<http://www.asocana.org/modules/documentos/secciones.aspx?tipo=3&valor=196>>.
3. BLOOMBERG. *Commodity futures online trading* [en línea]. [ref. de 10 de abril de 2011]. Disponible en Web: <<http://www.bloomberg.com/markets/commodities/futures/>>.
4. CALERO, L., et al. *Factores que inciden en las pérdidas indeterminadas del proceso de elaboración de azúcar*. Técnicaña (Asociación Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar). VIII Congreso. Memorias. Septiembre 16 a 18. Cali: 2009. p. 664 – 672.
5. CARDONA, J. *Identificación y cuantificación de pérdidas de sacarosa reportadas normalmente como pérdidas indeterminadas*. Carta Trimestral, CENICAÑA. Año 23, No. 1. Cali: 2001. p. 35 – 36.
6. CHEN, James. *Manual del azúcar de caña*. 11a edición. México D.F: Limusa, 1991. p. 1013.

7. CUTZ, L. *Determinación de la pérdida de azúcar por exceso de lavado en una centrífuga semiautomática 1.22m x 0.76m Ingenio Trinidad*. Escuintla, Guatemala. Trabajo de graduación de Ing. Químico. Facultad de Ingeniería, Guatemala: Universidad de San Carlos, 2004. p. 3 – 16.
8. DAY, R.; UNDERWOOD, A. *Química analítica cuantitativa*. 5ª ed. México: Prentice Hall, 1989. p. 49, 69, 515 – 517.
9. DÍAZ, S.; SUÁREZ, K. *Las aguas residuales de los centrales azucareros; un vehículo a controlar*. Revista trimestral sobre la producción de azúcar y sus derivados de la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, Año 26, No. 1. Cuba: 1999. p. 56 – 58.
10. Ingenio La Unión. *Instructivo: análisis de aguas*. 5ª ed. Guatemala: Ingenio La Unión, 2010. p. 1 – 4.
11. Ingenio Magdalena. *El proceso de la fabricación de azúcar* [en línea]. [ref. de 26 de febrero de 2011]. Disponible en Web: <<http://iasmag.imsa.com.gt/inow/web/guest/azucar>>.
12. MARTIN, E. *Cómo medir el flujo de agua en los canales de riego a cielo abierto y en las tuberías de compuertas*. Arizona: The University of Arizona, 2010. p. 1 – 7.
13. MOTT, R. *Mecánica de fluidos*. 6ª ed. México: Pearson Education, 2006. p. 462 – 464.

14. Organismo Argentino de Acreditación (OAA). *Guía para validación de métodos de ensayo* [en línea]. [ref. de 27 de febrero de 2011]. Disponible en Web: <<http://www.oaa.org.ar/evaluadores/DC-LE-05.pdf>>.

15. RAMOS, A. *Pérdidas indeterminadas en el proceso de elaboración del azúcar de caña*. Técnicaña (Capacitación técnica para la Agroindustria Azucarera), Volumen 6, Revista No. 12. Colombia: 2002. p. 10 – 12.

16. SKOOG, W., et al. *Fundamentos de química analítica*. Octava edición. México: Editorial Thomson, 2005. p. 146 – 158.

APÉNDICE 1

Datos calculados

Tabla XV. **Concentraciones experimentales obtenidas para la solución de 25 ppm de azúcar con su respectivo valor de absorbancia y parámetros estadísticos**

Solución de sacarosa a 25 ppm		
Muestra	Abs	ppm
1	0,141	23,50
2	0,157	26,17
3	0,162	27,00
4	0,150	25,00
5	0,149	24,83
6	0,145	24,17
Promedio		25,11
Desviación estándar		1,29
Coeficiente de variación		5,12
Concentración patrón		25,00
t calculada		0,21
t crítica		2,57
Error absoluto		0,11
Error relativo (%)		0,45

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Concentraciones experimentales obtenidas para la solución de 50 ppm de azúcar con su respectivo valor de absorbancia y parámetros estadísticos**

Solución de sacarosa a 50 ppm		
Muestra	Abs	ppm
1	0,283	47,17
2	0,306	51,00
3	0,273	45,50
4	0,319	53,17
5	0,284	47,33
6	0,290	48,33
Promedio		48,75
Desviación estándar		2,82
Coeficiente de variación		5,79
Concentración patrón		50,00
t calculada		1,08
t crítica		2,57
Error absoluto		1,25
Error relativo (%)		2,50

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Concentraciones experimentales obtenidas para la solución de 75 ppm de azúcar con su respectivo valor de absorbancia y parámetros estadísticos**

Solución de sacarosa a 75 ppm		
Muestra	Abs	ppm
1	0,435	72,50
2	0,440	73,34
3	0,482	80,34
4	0,477	79,50
5	0,487	81,17
6	0,485	80,84
Promedio		77,95
Desviación estándar		3,94
Coeficiente de variación		5,06
Concentración patrón		75,00
t calculada		1,83
t crítica		2,57
Error absoluto		2,95
Error relativo (%)		3,93

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Concentraciones experimentales obtenidas para la solución de 100 ppm de azúcar con su respectivo valor de absorbancia y parámetros estadísticos**

Solución de sacarosa a 100 ppm		
Muestra	Abs	ppm
1	0,604	100,67
2	0,561	93,50
3	0,684	114,00
4	0,659	109,84
5	0,655	109,17
6	0,596	99,34
Promedio		104,42
Desviación estándar		7,78
Coeficiente de variación		7,45
Concentración patrón		100,00
t calculada		1,39
t crítica		2,57
Error absoluto		4,42
Error relativo (%)		4,42

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Concentraciones experimentales obtenidas por dos analistas y dos días diferentes con sus respectivos valores de absorbancia**

Día	Muestra	Analista 1		Analista 2	
		Absorbancia	ppm	Absorbancia	ppm
1	1	0,299	49,83	0,303	50,50
	2	0,310	51,67	0,281	46,83
	3	0,289	48,17	0,294	49,00
2	4	0,345	57,50	0,288	48,00
	5	0,347	57,83	0,315	52,50
	6	0,331	55,17	0,322	53,67
		Promedio	53,36	Promedio	50,08

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Valores calculados para evaluar la similitud de las medias obtenidas con los resultados de la tabla XIX**

	Analista 1	Analista 2
Promedio	53,36	50,08
Muestra	$(x_i - \bar{x}_1)^2$	$(x_j - \bar{x}_2)^2$
1	12,47	0,17
2	2,87	10,56
3	26,98	1,17
4	17,13	4,34
5	20,00	5,84
6	3,26	12,84
Sumatoria	82,69	34,93
Desviación combinada	3,13	
t calculada	1,81	
t crítica	2,23	
Grados de libertad	10	
Nivel de confianza	95%	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Datos de calibración para el vertedero del canal de cachaza**

Q (m³/s)	Altura o profundidad del agua (m)	Altura de cresta (m)	Ancho de cresta L (m)	Ce
2,38E-03	0,168	0,12	0,15	1,507
2,60E-03	0,170	0,12	0,15	1,550
2,72E-03	0,171	0,12	0,15	1,573
2,79E-03	0,178	0,12	0,15	1,332
2,78E-03	0,175	0,12	0,15	1,436
2,80E-03	0,175	0,12	0,15	1,449
			Promedio	1,475
			Desv. Est.	0,088
			CV	5,986

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Datos de calibración para el vertedero del canal de evaporadores de la fábrica de azúcar blanco**

Q (m³/s)	Altura o profundidad del agua (m)	Altura de cresta (m)	Ancho de cresta L (m)	Ce
1,32E-03	0,270	0,25	0,18	2,593
1,84E-03	0,283	0,25	0,18	1,703
1,81E-03	0,288	0,25	0,18	1,357
2,38E-03	0,295	0,25	0,18	1,383
2,57E-03	0,290	0,25	0,18	1,783
1,36E-03	0,280	0,25	0,18	1,453
			Promedio	1,712
			Desv. Est.	0,465
			CV	27,176

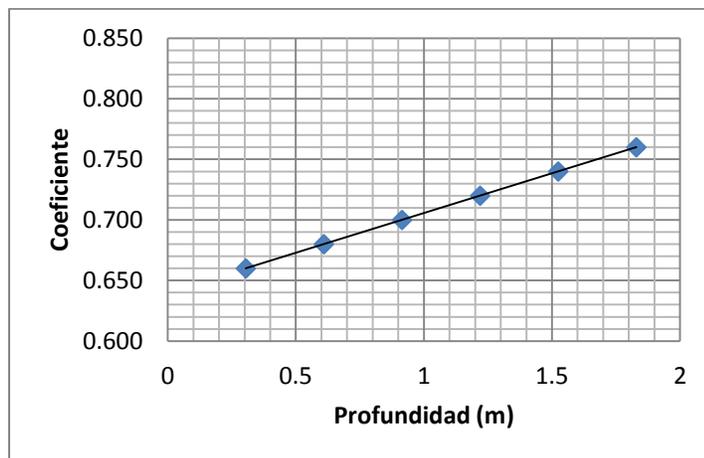
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Datos de calibración para el vertedero del canal de condensados de la fábrica de azúcar blanco**

Q (m ³ /s)	Altura o profundidad del agua (m)	Altura de cresta (m)	Ancho de cresta L (m)	Ce
2,01E-03	0,150	0,12	0,185	2,093
2,64E-03	0,153	0,12	0,185	2,378
2,57E-03	0,151	0,12	0,185	2,540
2,51E-03	0,149	0,12	0,185	2,752
2,29E-03	0,152	0,12	0,185	2,160
2,61E-03	0,150	0,12	0,185	2,718
Promedio				2,440
Desv. Est.				0,278
CV				11,412

Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Curva de correlación para el coeficiente de corrección de la velocidad media de un río**



Fuente: elaboración propia.

Ecuación de la correlación: $\text{Coeficiente} = 0,0656 (\text{profundidad}) + 0,64$

Tabla XXIV. Datos calculados de las pérdidas de azúcar en el efluente de las mesas de lavado

Día	Hora	Concentración				Flujo l/min	Pérdidas de azúcar		Promedio diario	
		mg/l	+/-	mg/l (real)	+/-		lb/día	+/-	lb/día	(+/-)
1	09:00	1 603	8	1 484	8	8 392	38 971	210	74 530	210
	11:00	5 350	8	5 332	8	8 392	140 080	210		
	13:00	2 883	8	2 856	8	8 392	75 022	210		
	15:00	2 000	8	1 677	8	8 392	44 046	210		
2	09:00	1 240	8	1 020	8	8 392	26 795	210	63 266	210
	11:00	4 400	8	4 158	8	8 392	109 237	210		
	13:00	2 533	8	2 417	8	8 392	63 486	210		
	15:00	2 133	8	2 038	8	8 392	53 547	210		
3	08:30	6 367	8	6 288	8	8 392	165 176	210	134 124	210
	10:00	866	8	668	8	8 392	17 539	210		
	12:30	7 000	8	6 975	8	8 392	183 232	210		
	14:50	6 600	8	6 492	8	8 392	170 548	210		
4	08:30	4 033	8	4 006	8	8 392	105 224	210	62 304	210
	10:00	3 267	8	3 228	8	8 392	84 795	210		
	12:30	1 967	8	1 957	8	8 392	51 406	210		
	14:50	314	8	297	8	8 392	7 793	210		
5	09:00	2 140	8	2 086	8	8 392	54 793	210	48 217	210
	11:00	1 917	8	1 901	8	8 392	49 948	210		
	13:00	2 600	8	2 567	8	8 392	67 439	210		
	15:00	817	8	788	8	8 392	20 692	210		
							Promedio acumulado		76 488	210
							Desviación estándar		52 785	
							Grados de libertad	19	Nivel de confianza	95%
							t de Student		2,098	
							Intervalo de confianza (+/-)		24 763	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Datos calculados de las pérdidas de azúcar en el efluente del canal de cachaza**

Día	Hora	Concentración		Flujo				Pérdidas		Promedio diario	
		mg/l	+/-	Altura (cm)	+/-	l/s	+/-	lb/día	+/-	lb/día	+/-
1	09:00	2 460	8	15,5	0,1	1,45	0,06	669	31	1 242	41
	11:00	2 600	8	17,3	0,1	2,70	0,08	1 318	41		
	13:00	1 202	8	17,8	0,1	3,09	0,08	698	23		
	15:00	4 633	8	17,2	0,1	2,62	0,08	2 283	70		
2	09:00	612	8	16,5	0,1	2,11	0,07	243	11	1 795	56
	11:00	11 350	8	17,2	0,1	2,62	0,08	5 593	165		
	13:00	1 307	8	16,2	0,1	1,90	0,07	467	20		
	15:00	1 433	8	18,0	0,1	3,25	0,08	875	27		
3	08:30	542	8	16,9	0,1	2,40	0,07	244	11	973	32
	10:00	3 500	8	16,9	0,1	2,40	0,07	1 578	52		
	12:30	2 317	8	17,2	0,1	2,62	0,08	1 142	37		
	14:50	1 563	8	17,9	0,1	3,17	0,08	931	28		
4	08:30	2 342	8	16,3	0,1	1,97	0,07	868	33	1 506	48
	10:00	3 417	8	17,1	0,1	2,57	0,08	1 650	52		
	12:30	3 367	8	17,0	0,1	2,47	0,07	1 564	51		
	14:50	3 433	8	17,7	0,1	3,01	0,08	1 942	56		
5	09:00	1 683	8	14,0	0,1	0,63	0,05	198	16	879	31
	11:00	1 825	8	16,8	0,1	2,33	0,07	798	28		
	13:00	2 083	8	17,7	0,1	3,01	0,08	1 178	36		
	15:00	2 725	8	17,2	0,1	2,62	0,08	1 343	43		
Promedio acumulado									1 279	42	
Desviación estándar									1 165		
Grados de libertad									19	Nivel de Confianza	95%
t de Student									2,098		
Intervalo de confianza (+/-)									546		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Datos calculados de las pérdidas de azúcar en el efluente del canal de evaporadores de la fábrica de azúcar blanco**

Día	Hora	Concentración		Flujo				Pérdidas		Promedio diario	
		mg/l	+/-	Altura (cm)	+/-	l/s	+/-	lb/día	+/-	lb/día	+/-
1	09:00	1 375	8	35,0	0,1	9,74	0,15	2 517	52	1 393	69
	11:00	12 642	8	26,5	0,1	0,57	0,06	1 344	135		
	13:00	4 650	8	28,0	0,1	1,60	0,08	1 399	72		
	15:00	483	8	30,0	0,1	3,45	0,10	313	15		
2	09:00	698 347	8	25,5	0,1	0,11	0,03	14 291	4287	5 565	1479
	11:00	230 005	8	25,5	0,1	0,11	0,03	4 707	1412		
	13:00	1 663	8	33,5	0,1	7,64	0,13	2 385	54		
	15:00	21 167	8	25,8	0,1	0,22	0,04	877	165		
3	08:30	500	8	32,5	0,1	6,33	0,13	594	21	1 217	109
	10:00	50 168	8	25,5	0,1	0,11	0,03	1 027	308		
	12:30	2 767	8	32,1	0,1	5,83	0,12	3 030	73		
	14:50	3 750	8	26,0	0,1	0,31	0,05	217	33		
4	08:30	1 542	8	29,5	0,1	2,94	0,10	852	33	1 759	90
	10:00	17 067	8	28,0	0,1	1,60	0,08	5 133	259		
	12:30	2 200	8	27,7	0,1	1,37	0,08	565	33		
	14:50	2 417	8	27,3	0,1	1,07	0,07	488	33		
5	09:00	16 234	8	27,0	0,1	0,87	0,07	2 658	201	6 186	163
	11:00	15 467	8	33,2	0,1	7,24	0,13	21 021	395		
	13:00	1 517	8	29,4	0,1	2,84	0,10	810	32		
	15:00	1 833	8	26,8	0,1	0,74	0,06	256	22		
Promedio acumulado									3 224	382	
Desviación estándar									5 247		
Grados de libertad								19	Nivel de Confianza		95%
t de Student									2,098		
Intervalo de confianza (+/-)									2 461		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Datos calculados de las pérdidas de azúcar en el efluente del canal de condensados de la fábrica de azúcar blanco**

Día	Hora	Concentración		Flujo				Pérdidas		Promedio diario	
		mg/l	+/-	Altura (cm)	+/-	l/s	+/-	lb/día	+/-	lb/día	+/-
1	09:00	2 087	2	14,5	0,1	1,8	0,1	699	43	995	29
	11:00	211	2	19,8	0,1	9,8	0,2	389	11		
	13:00	510	2	20,0	0,1	10,2	0,2	978	22		
	15:00	997	2	20,0	0,1	10,2	0,2	1 912	40		
2	09:00	1 162	2	17,0	0,1	5,0	0,2	1 101	35	594	19
	11:00	135	2	20,0	0,1	10,2	0,2	259	9		
	13:00	735	2	18,0	0,1	6,6	0,2	916	25		
	15:00	180	2	15,5	0,1	3,0	0,1	100	5		
3	08:30	253	2	20,0	0,1	10,2	0,2	486	13	2 276	48
	10:00	262	2	20,0	0,1	10,2	0,2	502	13		
	12:30	388	2	21,0	0,1	12,2	0,2	889	19		
	14:50	4 150	2	19,5	0,1	9,3	0,2	7 227	148		
4	08:30	233	2	16,0	0,1	3,6	0,1	158	7	215	9
	10:00	235	2	19,5	0,1	9,3	0,2	409	12		
	12:30	483	2	15,3	0,1	2,7	0,1	246	12		
	14:50	137	2	14,5	0,1	1,8	0,1	46	3		
5	09:00	168	2	17,1	0,1	5,2	0,2	164	7	267	12
	11:00	141	2	20,4	0,1	11,0	0,2	290	9		
	13:00	1 023	2	14,6	0,1	1,9	0,1	364	22		
	15:00	265	2	17,0	0,1	5,0	0,2	251	9		
Promedio acumulado									869	23	
Desviación estándar									1 562		
Grados de libertad									19	Nivel de confianza	95%
t de Student									2,098		
Intervalo de confianza (+/-)									733		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. Datos calculados de las pérdidas de azúcar en el efluente del canal general de la fábrica de azúcar blanco

Día	Hora	Concentración		Flujo						Pérdidas		Promedio diario		
		mg/l	+/-	Altura (cm)	+/-	Tiempo (s)	+/-	l/s	+/-	lb/día	+/-	lb/día	+/-	
1	09:00	1 318	8	8,0	0,1	3,25	0,3	26	3	6 549	726	4 646	709	
	11:00	100	8	26,0	0,1	2,28	0,3	123	17	2 305	496			
	13:00	258	8	16,0	0,1	2,00	0,3	86	13	4 171	781			
	15:00	415	8	16,0	0,1	2,41	0,3	71	9	5 560	834			
2	09:00	9 675	8	6,0	0,1	3,41	0,3	19	2	34 354	3 623	25 866	2,596	
	11:00	2 708	8	10,0	0,1	2,94	0,3	37	4	18 590	2 138			
	13:00	6 792	8	12,0	0,1	3,78	0,3	34	3	43 511	3 867			
	15:00	1 817	8	6,5	0,1	3,40	0,3	21	2	7 009	757			
3	08:30	1 733	8	18,0	0,1	3,00	0,3	64	7	20 988	2 312	14 901	1,388	
	10:00	3 400	8	7,5	0,1	4,43	0,3	18	1	11 616	969			
	12:30	1 500	8	8,0	0,1	4,97	0,3	17	1	4 873	381			
	14:50	5 367	8	8,5	0,1	4,16	0,3	22	2	22 129	1 889			
4	08:30	1 200	8	8,0	0,1	4,59	0,3	19	1	4 221	357	6 056	573	
	10:00	2 133	8	12,5	0,1	3,50	0,3	38	4	15 376	1 499			
	12:30	488	8	7,0	0,1	3,94	0,3	19	2	1 751	187			
	14:50	733	8	9,0	0,1	4,63	0,3	21	2	2 877	250			
5	09:00	1 525	8	9,0	0,1	5,47	0,3	18	1	5 064	361	9 457	709	
	11:00	4 550	8	10,5	0,1	4,44	0,3	25	2	21 714	1 712			
	13:00	3 033	8	9,0	0,1	5,75	0,3	17	1	9 581	632			
	15:00	353	8	10,7	0,1	5,19	0,3	22	1	1 470	132			
Promedio acumulado											12 185	1 195		
Desviación estándar											11 563			
Grados de libertad											19	Nivel de confianza		95%
t de Student											2,098			
Intervalo de confianza (+/-)											5 425			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. Datos calculados de las pérdidas de azúcar en el efluente del canal de derrame en molinos

Día	Hora	Concentración		Flujo						Pérdidas		Promedio diario	
		mg/l	+/-	Vol. (l)	+/-	Tiempo (s)	+/-	l/s	+/-	lb/día	+/-	lb/día	+/-
1	09:00	6 933	8	3,03	0,001	2,14	0,3	1,4	0,20	1 844	261	873	129
	11:00	4 967	8	1,46	0,001	1,72	0,3	0,8	0,10	792	140		
	13:00	1 983	8	2,9	0,001	2,78	0,3	1,0	0,10	389	44		
	15:00	23 584	8	0,21	0,001	2,00	0,3	0,1	0,02	466	72		
2	09:00	11 467	8	3,12	0,001	1,59	0,3	2,0	0,40	4 226	802	1 909	340
	11:00	5 533	8	2,26	0,001	1,94	0,3	1,2	0,20	1 211	190		
	13:00	7 000	8	0,28	0,001	1,66	0,3	0,2	0,03	222	41		
	15:00	5 067	8	3,78	0,001	1,82	0,3	2,1	0,30	1 977	329		
3	08:30	2 733	8	3,12	0,001	2,00	0,3	1,6	0,20	801	123	2 797	445
	10:00	10 667	8	3,74	0,001	2,06	0,3	1,8	0,30	3 637	533		
	12:30	2 617	8	3,62	0,001	1,82	0,3	2,0	0,30	978	164		
	14:50	17 600	8	3,16	0,001	1,81	0,3	1,7	0,30	5 771	961		
4	08:30	2 050	8	3,79	0,001	2,00	0,3	1,9	0,30	730	112	841	140
	10:00	5 167	8	3,6	0,001	1,97	0,3	1,8	0,30	1 773	273		
	12:30	950	8	3,34	0,001	1,65	0,3	2,0	0,40	361	69		
	14:50	1 150	8	3,48	0,001	1,50	0,3	2,3	0,50	501	104		
5	09:00	858	8	3,64	0,001	2,16	0,3	1,7	0,20	272	40	1 918	416
	11:00	2 342	8	3,74	0,001	1,97	0,3	1,9	0,30	835	130		
	13:00	1 750	8	3,64	0,001	2,29	0,3	1,6	0,20	522	71		
	15:00	11 067	8	3,72	0,001	1,28	0,3	2,9	0,70	6 041	1 422		
Promedio acumulado											1 667	294	
Desviación estándar											1 804		
Grados de libertad											19	Nivel de Confianza	95%
t de Student											2,098		
Intervalo de confianza (+/-)											846		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Datos calculados de las pérdidas de azúcar en la pileta de enfriamiento**

Día	Hora	Concentración	
		mg/l	(+/-)
1	09:00	119,8	0,2
	11:00	17,7	0,2
	13:00	27,5	0,2
	15:00	323,3	0,2
2	09:00	220,0	0,2
	11:00	241,7	0,2
	13:00	116,7	0,2
	15:00	95,0	0,2
3	08:30	79,0	0,2
	10:00	198,3	0,2
	12:30	25,0	0,2
	14:50	107,8	0,2
4	08:30	27,8	0,2
	10:00	38,8	0,2
	12:30	9,8	0,2
	14:50	17,0	0,2
5	09:00	54,3	0,2
	11:00	15,3	0,2
	13:00	32,8	0,2
	15:00	29,0	0,2

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. Datos calculados de las pérdidas de azúcar en el efluente de la salida general

Día	Hora	Concentración		Flujo								Pérdidas		Promedio diario	
		mg/l	+/-	Altura (cm)	+/-	t (s)	+/-	Coef.	+/-	l/s	+/-	lb/día	+/-	lb/día	+/-
1	09:00	1 788	8	36,33	0,1	29,36	0,3	0,664	7,E-05	345	5	115 844	2 032	165 473	2 488
	11:00	783	8	44,83	0,1	27,42	0,3	0,669	7,E-05	460	6	67 608	1 588		
	13:00	2 733	8	45,00	0,1	28,23	0,3	0,670	7,E-05	448	6	230 014	3 651		
	15:00	4 450	8	46,83	0,1	44,37	0,3	0,671	7,E-05	297	3	248 425	2 681		
2	09:00	3 300	8	44,33	0,1	47,46	0,3	0,669	7,E-05	262	2	162 638	1 805	130 131	1 669
	11:00	2 560	8	53,00	0,1	40,15	0,3	0,675	7,E-05	374	4	179 822	2 262		
	13:00	1 783	8	40,67	0,1	38,50	0,3	0,667	7,E-05	296	3	99 043	1 469		
	15:00	1 533	8	43,33	0,1	44,32	0,3	0,668	7,E-05	274	3	79 020	1 137		
3	08:30	2 200	8	41,00	0,1	33,90	0,3	0,667	7,E-05	339	4	139 934	2 102	185 684	2 836
	10:00	3 917	8	39,67	0,1	31,05	0,3	0,666	7,E-05	357	4	262 824	3 765		
	12:30	3 300	8	32,00	0,1	30,91	0,3	0,661	7,E-05	287	4	178 082	2 734		
	14:50	2 433	8	35,50	0,1	27,91	0,3	0,663	7,E-05	354	5	161 894	2 744		
4	08:30	4 067	8	37,83	0,1	23,01	0,3	0,665	7,E-05	459	7	350 525	6 221	157 216	3 064
	10:00	1 650	8	37,33	0,1	24,37	0,3	0,664	7,E-05	427	6	132 444	2 640		
	12:30	900	8	32,67	0,1	23,18	0,3	0,661	7,E-05	391	6	66 164	1 654		
	14:50	1 183	8	32,53	0,1	25,18	0,3	0,661	7,E-05	359	5	79 729	1 742		
5	09:00	1 383	8	31,33	0,1	32,47	0,3	0,661	7,E-05	268	3	69 530	1 273	65 969	1 039
	11:00	1 667	8	32,67	0,1	45,99	0,3	0,661	7,E-05	197	2	61 763	895		
	13:00	2 200	8	35,67	0,1	41,26	0,3	0,663	7,E-05	241	2	99 494	1 374		
	15:00	917	8	31,67	0,1	45,72	0,3	0,661	7,E-05	192	2	33 088	614		
												Promedio acumulado		140 894	2 219
												Desviación estándar		82013	
												Grados de libertad	19	Nivel de Confianza	95%
												t de Student		2,098	
												Intervalo de confianza (+/-)		38 475	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. Valor del SJM ponderado

DATOS PARA CÁLCULO DEL SJM PONDERADO				SJM PONDERADO	
PRODUCTO	RETENCIÓN	PRODUCCIÓN	PRODUCCIÓN x RETENCIÓN	SJM	PORCENTAJE
CRUDO	57,40	5 982,31	343 384,59		68,87
BLANCO	80,66	5 815,84	469 105,65		FRACCIÓN
TOTAL	138,06	11 798,15	812 490,25		0,689
PRODUCTO	RETENCIÓN	PRODUCCIÓN	PRODUCCIÓN x RETENCIÓN	SJM	PORCENTAJE
CRUDO	56,00	9 131,73	511 376,88		67,90
BLANCO	82,99	7 198,08	597 368,66		FRACCIÓN
TOTAL	138,99	16 329,81	1 108 745,54		0,679
PRODUCTO	RETENCIÓN	PRODUCCIÓN	PRODUCCIÓN x RETENCIÓN	SJM	PORCENTAJE
CRUDO	53,70	8 363,21	449 104,38		65,96
BLANCO	81,69	6 520,00	532 618,80		FRACCIÓN
TOTAL	135,39	14 883,21	981 723,18		0,660
PRODUCTO	RETENCIÓN	PRODUCCIÓN	PRODUCCIÓN x RETENCIÓN	SJM	PORCENTAJE
CRUDO	55,01	7 000,00	385 070,00		68,10
BLANCO	83,05	6 128,80	508 996,84		FRACCIÓN
TOTAL	138,06	13 128,80	894 066,84		0,681
PRODUCTO	RETENCIÓN	PRODUCCIÓN	PRODUCCIÓN x RETENCIÓN	SJM	PORCENTAJE
CRUDO	57,38	7 287,80	418 173,96		68,22
BLANCO	82,50	5 528,96	456 139,20		FRACCIÓN
TOTAL	139,88	12 816,76	874 313,16		0,682

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. **Pérdidas económicas correspondientes a las pérdidas de azúcar en el efluente de la salida general**

Día	Pérdidas de azúcar	SJM (ponderado)	Pérdidas (con SJM)	Pérdidas económicas	Caña molida ton caña	Pérdidas de azúcar
	lb/día		lb/día	\$/día		lb/ton caña
1	115 844	0,689	79 777	19 848,59	6647,90	17,43
	67 608		46 559	11 583,85		10,17
	230 014		158 401	39 410,28		34,60
	248 425		171 080	42 564,71		37,37
2	162 638	0,679	110 426	27 474,02	6674,47	24,37
	179 822		122 094	30 376,98		26,94
	99 043		67 247	16 731,04		14,84
	79 020		53 652	13 348,66		11,84
3	139 934	0,660	92 303	22 965,00	6850,73	20,43
	262 824		173 364	43 132,87		38,36
	178 082		117 466	29 225,55		25,99
	161 894		106 788	26 568,92		23,63
4	350 525	0,681	238 706	59 390,11	5882,07	59,59
	132 444		90 194	22 440,26		22,52
	66 164		45 057	11 210,30		11,25
	79 729		54 295	13 508,72		13,55
5	69 530	0,682	47 431	11 800,77	6220,06	11,18
	61 763		42 132	10 482,49		9,93
	99 494		67 872	16 886,44		16,00
	33 088		22 571	5 615,72		5,32
Media	140 894	Media	95 371	23 728,26	Media	21,77
Desv.	82 013	Desv.	55 485	13 804,61	Desv.	12,99
t de Student	2,098	t de Student	2,098	2,098	t de Student	2,098
IC (+/-)	38 475	IC (+/-)	26 029	6 476	IC (+/-)	6

Fuente: elaboración propia.

APÉNDICE 2

Desarrollo de las ecuaciones de medición de flujo.

- Ecuación para el flujo volumétrico en el canal de cachaza.

La ecuación general de un vertedero para determinar el flujo volumétrico incluye tres variables: el coeficiente del vertedero (C), la amplitud de la cresta (L) y la carga (H).

$$Q = C L H^{1.5}$$

Ec. A3.1

Según los datos de calibración para el vertedero en el canal de cachaza (tabla XXII), el coeficiente del vertedero es igual a $1.475 \text{ m}^{1/2} \text{ s}^{-1}$. Además, según el diseño del vertedero, la amplitud de la cresta es de 0.15 m. Por lo tanto, sustituyendo en A3.1, se tiene:

$$Q = (1.475)(0.15)H^{1.5}$$

$$Q = (0.22125)H^{1.5}$$

Ec. A3.3

La carga H es la diferencia entre la altura o profundidad del agua y la altura de la cresta del vertedero. Por lo tanto, sabiendo que la altura de la cresta del vertedero es 0.12 m, $H^{1.5}$ se puede escribir como:

$$H^{1.5} = \left(\frac{\text{altura}}{100} - 0.12 \right)^{1.5}$$

Ec. A3.4

Donde la altura está en unidades de centímetro. Sustituyendo A3.4 en A3.3, se obtiene:

$$Q = (0.22125)\left(\frac{\text{altura}}{100} - 0.12\right)^{1.5}$$

Ec. A3.4

La ecuación anterior tiene unidades en m³/s, y para convertirla a L/s se aplica el factor de 1000 L/m³. Por lo tanto, se obtiene la ecuación final:

$$Q = (221.25)\left(\frac{\text{altura}}{100} - 0.12\right)^{1.5}$$

Ec. A3.5

- Ecuación para el flujo volumétrico en el canal de evaporadores de la fábrica de azúcar blanco.

En este caso, según la tabla XXIII, el valor del coeficiente del vertedero es 1.712 m^{1/2} s⁻¹. Los datos de diseño del vertedero indican una amplitud de cresta (L) de 0.18 m, mientras que la altura de la cresta es 0.25 m. Siguiendo los pasos anteriormente descritos se obtiene la ecuación en unidades de L/s.

$$Q = (308.16)\left(\frac{\text{altura}}{100} - 0.25\right)^{1.5}$$

Ec. A3.6

- Ecuación para el flujo volumétrico en el canal de condensados de la fábrica de azúcar blanco.

El valor del coeficiente del vertedero es $2.440 \text{ m}^{1/2} \text{ s}^{-1}$ (tabla 24). Los datos de diseño del vertedero indican una amplitud de cresta (L) de 0.185 m, mientras que la altura de la cresta es 0.12 m. Siguiendo los pasos anteriormente descritos se obtiene la ecuación en unidades de L/s.

$$Q = (451.4) \left(\frac{\text{altura}}{100} - 0.12 \right)^{1.5}$$

Ec. A3.7

- Ecuación para el flujo volumétrico en el canal general de la fábrica de azúcar blanco.

Sabiendo que el ancho del canal es 0.79 m, el área de sección transversal es:

$$A = 0.79 \left(\frac{\text{altura}}{100} \right)$$

Ec. A3.8

Donde la altura o profundidad del agua se da en centímetros y el área de sección transversal en metros cuadrados.

Por otro lado, el recorrido del flotador en el canal es 1.6 m. De esta forma, tomando el coeficiente de corrección de velocidad media constante (por la geometría y la cantidad de flujo), la velocidad media es:

$$v = (0.85)\left(\frac{1.6}{tiempo}\right)$$

Ec. A3.9

Donde el tiempo se da en segundos y la velocidad en metros por segundo.

Ahora bien, el flujo volumétrico se puede determinar multiplicando la velocidad del fluido por el área de sección transversal. Multiplicando la ecuación A3.8 y A3.9, el flujo volumétrico en m³/s es:

$$Q = 0.79 \left(\frac{altura}{100}\right)(0.85)\left(\frac{1.6}{tiempo}\right)$$

$$Q = 0.85\left(\frac{0.01264 altura}{tiempo}\right)$$

Ec. A3.10

Aplicando el factor de conversión de 1000 L/m³ a la ecuación A3.10, el flujo volumétrico en L/s es:

$$Q = 0.85\left(\frac{12.64 altura}{tiempo}\right)$$

Ec. A3.11

- Ecuación para el flujo volumétrico en la salida general del Ingenio Azucarero.

El procedimiento es igual al descrito anteriormente, con la única diferencia que el coeficiente de corrección de la velocidad depende de la profundidad o altura promedio del agua. Esto se debe a la geometría y cantidad de flujo volumétrico.

Según la ecuación de la figura 19 de los datos calculados, el coeficiente de corrección de velocidad media corresponde a:

$$Coeficiente = 0.0656 \left(\frac{altura}{100} \right) + 0.64$$

Ec. A3.12

Donde la altura se da en centímetros y el coeficiente es adimensional.

El ancho del canal es de 2.70 m y el recorrido del flotador en el canal es de 15.55 m. Tomando estos valores y desarrollando, el flujo volumétrico en L/s es:

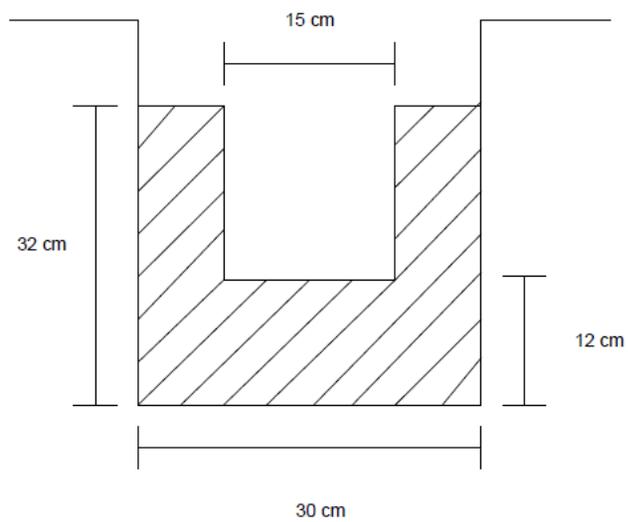
$$Q = Coeficiente \left(\frac{419.85 \text{ altura}}{tiempo} \right)$$

Ec. A3.13

APÉNDICE 3

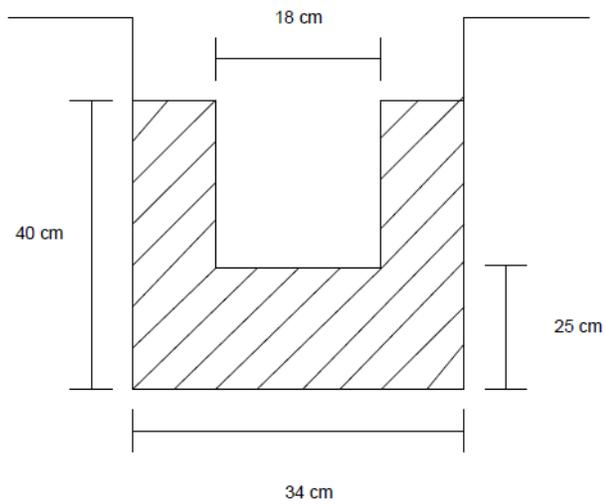
Diseño de los vertederos.

Figura 21. Dimensiones del vertedero del canal de cachaza



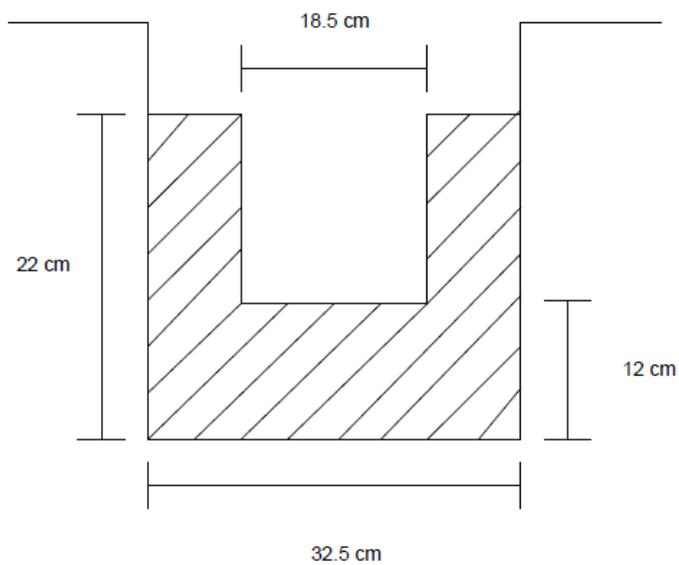
Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Dimensiones del vertedero del canal de evaporadores de la fábrica de azúcar blanco**



Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Dimensiones del vertedero del canal de condensados de la fábrica de azúcar blanco**



Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Instalación y medición de flujo en los vertederos**



Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Flujo sobre los vertederos.**

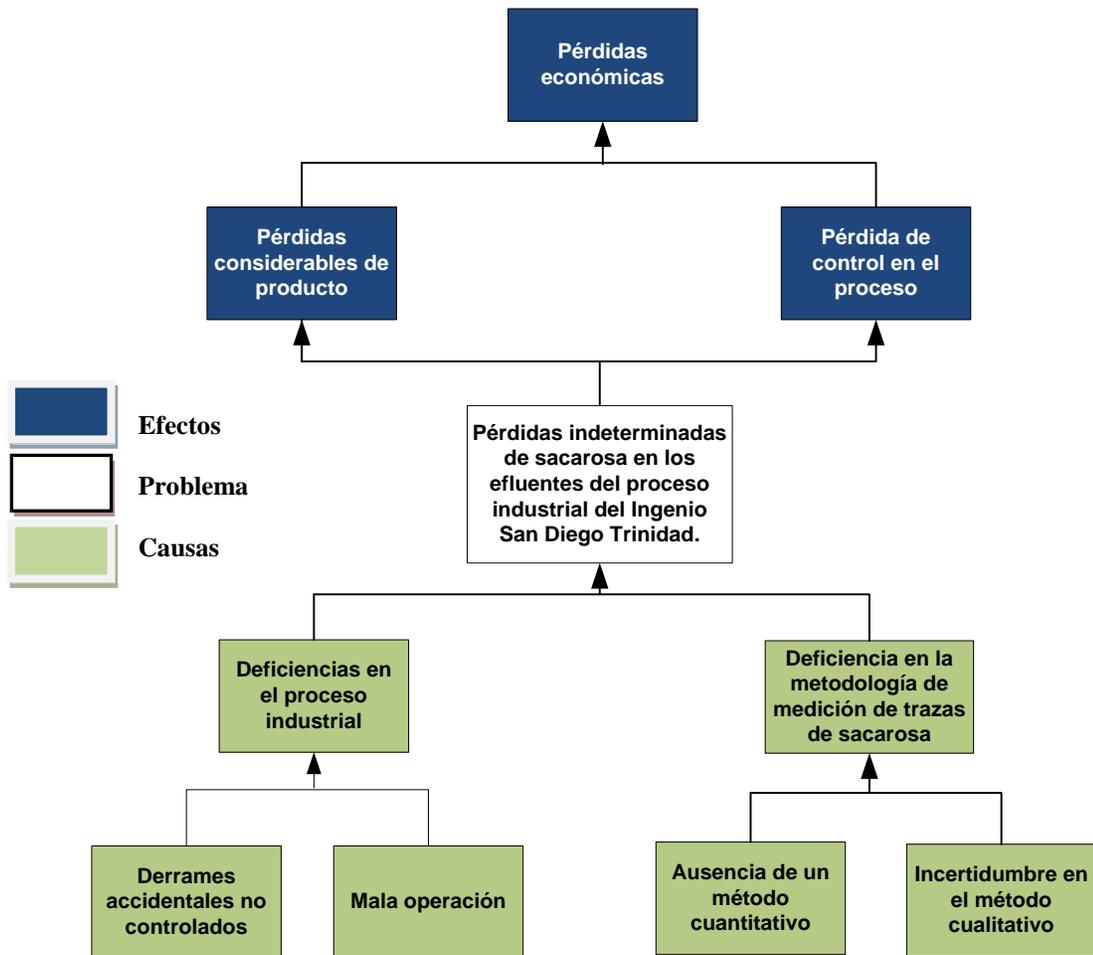


Fuente: ingenio azucarero.

APÉNDICE 4

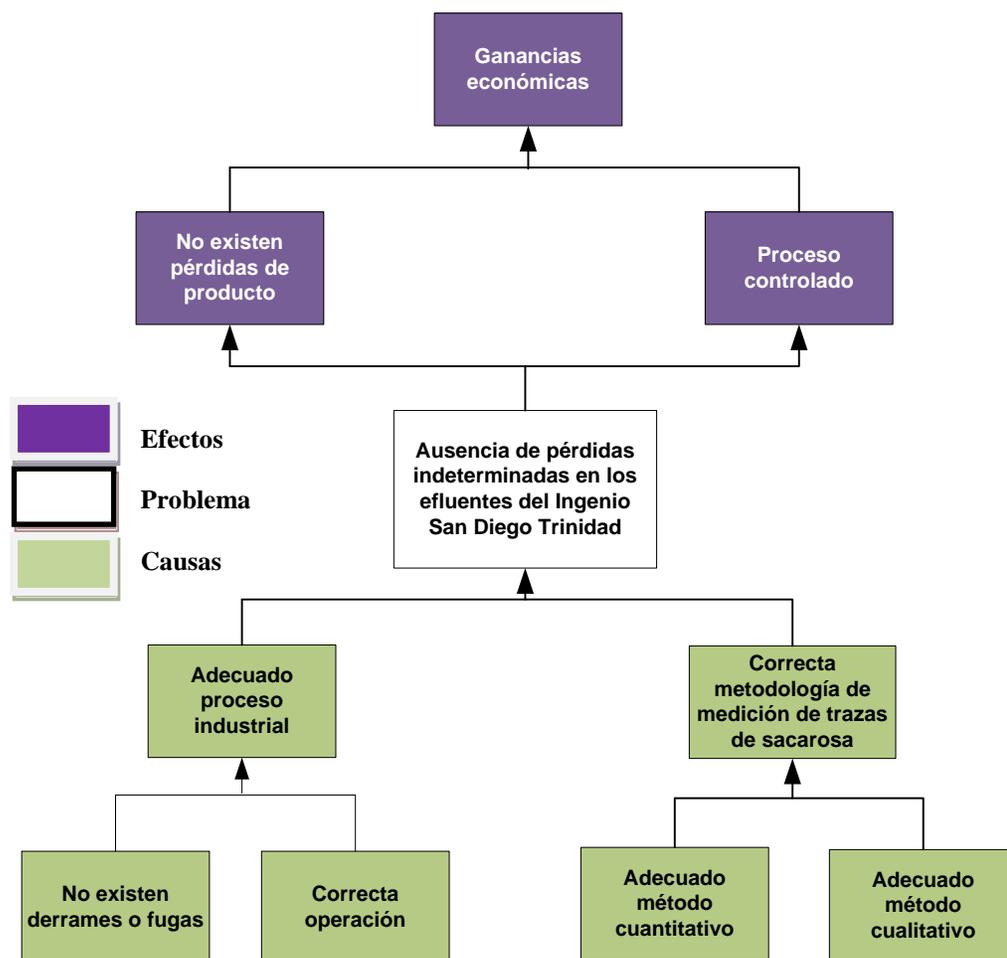
Árbol de problemas

Figura 26. **Árbol de problemas (en negativo) del presente estudio**



Fuente: elaboración propia.

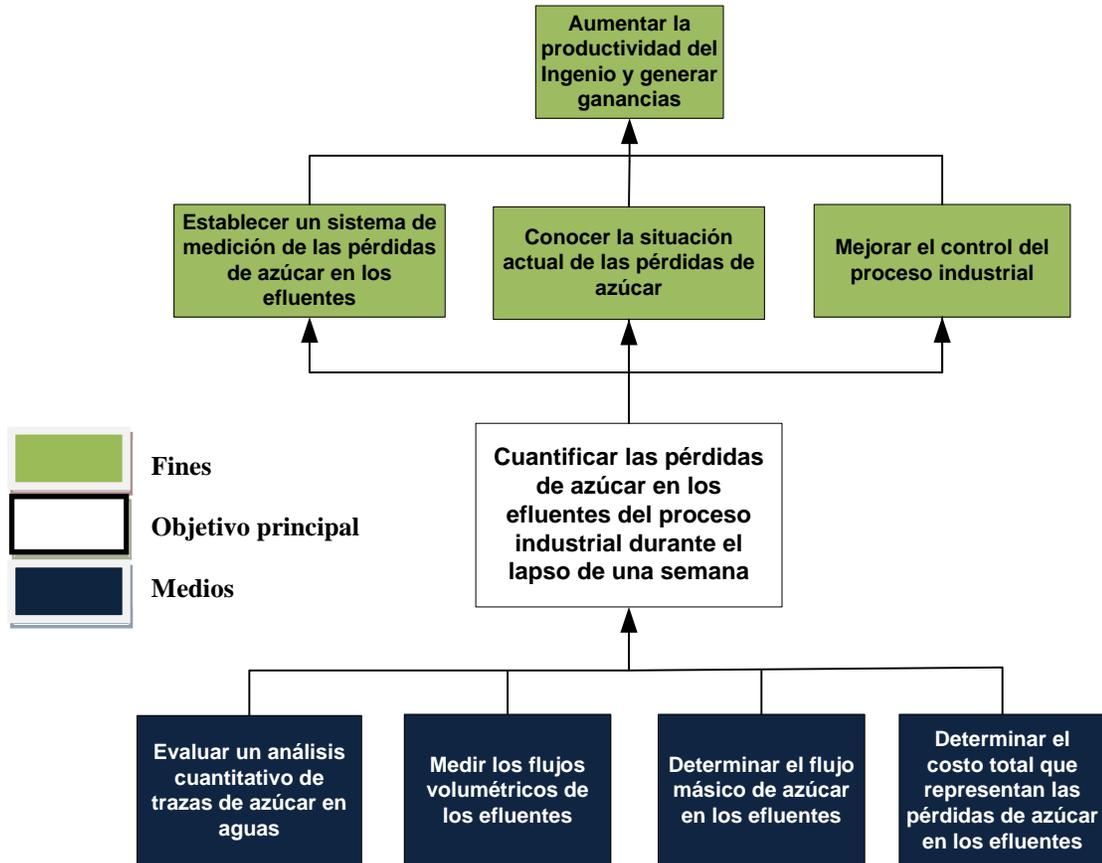
Figura 27. **Árbol de problema (en positivo) del presente estudio**



Fuente: elaboración propia.

Árbol de objetivos

Figura 28. **Árbol de objetivos del presente estudio**



Fuente: elaboración propia.

APÉNDICE 5

Tabla XXXIV. Cuadro de requisitos académicos

Carrera	Licenciatura en Ingeniería Química							
Área	Química	Operaciones Unitarias		Fisicoquímica	Área de especialización			
Tema genérico	Análisis Cualitativo	Análisis Cuantitativo	Bioquímica	Balance de masa y energía (IQ1)	Flujo de fluidos (IQ2)	Laboratorio de Ingeniería Química 1	Laboratorio de Físicoquímica 2	Ingeniería del azúcar
Tema específico	Equilibrio heterogéneo	Metodos analíticos clásicos o estequiométricos	Los carbohidratos	Balance de masa	Dinámica de fluidos	Medidores de flujo	Técnicas ópticas	Proceso industrial
Especificación	Equilibrio de solubilidad	Metodos gravimétricos y volumétricos	Polisacáridos	Mermas	Medidores de flujo	Medidores de vertedero	Espectroscopía	Pérdidas de azúcar
Problema a resolver	Establecer un sistema de medición de pérdidas de azúcar en los efluentes de un Ingeniero Azucarero							
Hipótesis	El método cuantitativo de trazas de azúcar en aguas es exacto y reproducible dentro del laboratorio del Ingeniero Azucarero							

Fuente: elaboración propia.

ANEXO. 1

Trazas de azúcar (método cuantitativo).

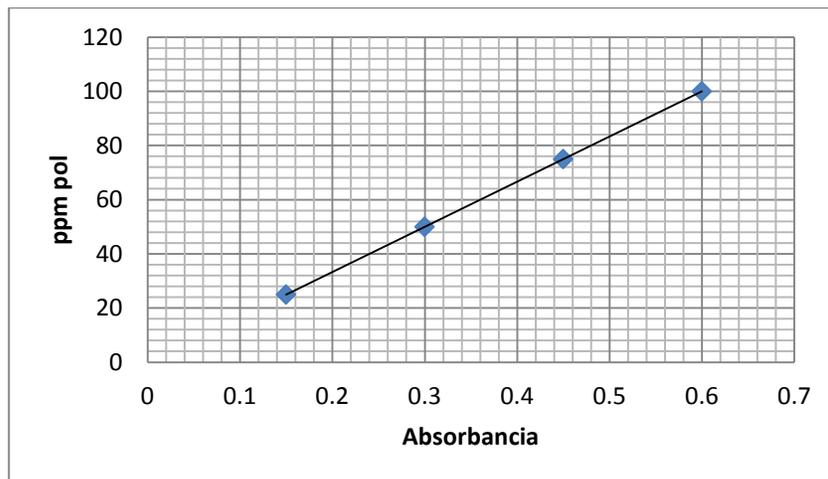
- Colar la muestra para eliminar materia flotante
- Tomar 100 ml de agua y agregarle 1.0 g de tierra silíceo mezclar bien y filtrar. Llevar un blanco de agua destilada.
- Colocar 1 ml de la muestra filtrada en un tubo de ensayo y agregar 5 ml de solución de antrona a cada tubo, mezclar bien.
- Colocar los tubos de ensayo en baño maría a 40 ° C durante 12 minutos
- Enfriar rápidamente los tubos con la ayuda de baño de agua fría.
- Encender el espectrofotómetro en el modo de Absorbancia y elegir una longitud de onda de 630 nm.
- Colocar en una celda de 10 mm la solución blanco y colocar a cero el equipo, luego colocar la muestra y realizar la lectura de absorbancia y anotar.

Tabla XXXV. **Datos de calibración para el método analítico de trazas de azúcar en aguas**

Absorbancia	ppm Pol
0,15	25
0,30	50
0,45	75
0,60	100

Fuente: elaboración propia.

Figura 29. **Curva de calibración del método analítico de trazas de azúcar en aguas**



Fuente: elaboración propia.

Ecuación de la correlación lineal:

$$\text{ppm} = 166,67 * \text{Absorbancia}$$

Nota.

1. Si el valor de absorbancia es mayor de 0,60 debe realizar una dilución y se multiplica el resultado de ppm por el factor de dilución.
2. Solución de antrona: 0,2 g de antrona en 100 ml de ácido sulfúrico al 95 – 98 % v/v.